

**ANÁLISIS Y APLICACIÓN DE EMULSIONES ASFÁLTICAS DE  
ROTURA LENTA (RL) PARA LA ESTABILIZACIÓN DE  
'ZAHORRAS' DESTINADAS PARA CAPAS DE PAVIMENTOS**



**AUGUSTO ADRIÁN PINEDO FORTICH**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
CARTAGENA DE INDIAS D. T. y C.**

**2016**



**ANÁLISIS Y APLICACIÓN DE EMULSIONES ASFÁLTICAS DE  
ROTURA LENTA (RL) PARA LA ESTABILIZACIÓN DE  
'ZAHORRAS' DESTINADAS PARA CAPAS DE PAVIMENTOS**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN DE GEOTECNIA Y MATERIALES (GEOMAVIT)**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

**INVESTIGADOR**

**AUGUSTO ADRIÁN PINEDO FORTICH**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero Civil**

**DIRECTOR**

**RAMÓN TORRES ORTEGA**

**INGENIERÍA CIVIL, MSc. INGENIERÍA DE VÍAS TERRESTRES**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
CARTAGENA DE INDIAS D. T. y C.**

**2016**



## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del Director**  
MSc., Ramón Torres Ortega

---

**Firma del Jurado**  
MSc., Guilliam Barboza Miranda

---

**Firma del Jurado**  
Modesto Barrios Fontalvo

Cartagena de Indias D. T. y C., \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ 2016



## **DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS**

Primeramente agradezco a mis padres, que con la educación y formación que me brindaron, hicieron que fuera la persona que soy. Quiero nombrar de forma especial al Ingeniero Ramón Torres Ortega quien con sus enseñanzas y colaboración hizo posible la culminación de este trabajo y me formó como un ingeniero correcto, innovador con amor por el trabajo y la investigación. También quiero agradecer a los Ingenieros Guilliam Barboza Miranda, Modesto Barrios Fontalvo, Dalia Moreno Egel y Javier Mouthon Bello, así como a Juan Montenegro quienes me colaboraron y guiaron constantemente y desinteresadamente en la realización de este trabajo.

En general, agradezco a mis maestros de la Universidad por formarme académica, profesional y personalmente, también a todos aquellos que han contribuido en mi crecimiento como persona e ingeniero.



## CONTENIDO

<b>RESUMEN.....</b>	<b>15</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>16</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>17</b>
<b>1. MARCO DE REFERENCIA.....</b>	<b>21</b>
<b>1.1. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>21</b>
<b>1.2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>24</b>
1.2.1. MATERIAL SELECCIONADO CALCÁREO (ZAHORRA).....	24
1.2.2. EMULSIÓN ASFÁLTICA.....	25
1.2.3. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS.....	25
1.2.4. BASES Y SUB-BASES DE PAVIMENTO.....	27
1.2.5. ESTABILIZACIÓN CON EMULSIÓN ASFÁLTICA.....	27
1.2.6. DISEÑO DE PAVIMENTOS POR EL MÉTODO AASHTO 1993.....	29
<b>2. OBJETIVOS Y ALCANCE.....</b>	<b>34</b>
<b>2.1. OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>34</b>
<b>2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>34</b>
<b>2.3. ALCANCE.....</b>	<b>35</b>
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>37</b>
<b>3.1. ESTABILIZACIÓN CON EMULSIÓN ASFÁLTICA.....</b>	<b>39</b>
3.1.1. MATERIAL SELECCIONADO CALCÁREO (ZAHORRA).....	39
3.1.2. EMULSIÓN ASFÁLTICA.....	40
3.1.3. AGUA.....	40
3.1.4. DISEÑO DE LA MEZCLA.....	41
<b>3.2. COMPARACIÓN COSTOS MEZCLAS M1 Y M2.....</b>	<b>42</b>



<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>44</b>
<b>4.1. GRADACIÓN DEL MATERIAL SELECCIONADO CALCÁREO.....</b>	<b>44</b>
<b>4.2. ENSAYOS DEL MATERIAL SELECCIONADO CALCÁREO.....</b>	<b>45</b>
4.2.1. DUREZA.....	45
4.2.1.1. Desgaste De Los Ángeles.....	45
4.2.2. DURABILIDAD.....	46
4.2.2.1. Ensayo de solidez en sulfatos.....	46
4.2.3. LIMPIEZA.....	47
4.2.3.1. Límite Líquido, Índice de Plasticidad y Clasificación del agregado.....	47
4.2.3.2. Equivalente de arena.....	48
4.2.4. CAPACIDAD DE SOPORTE.....	49
4.2.4.1. CBR del material sin emulsión asfáltica.....	49
<b>4.3. COMPARACIÓN RESULTADOS OBTENIDOS CONTRA REQUISITOS INVIAS.....</b>	<b>53</b>
4.3.1. GRADACIÓN DE LOS AGREGADOS PARA BASES ESTABILIZADAS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA.....	53
4.3.2. REQUISITOS DE LOS AGREGADOS PÉTREOS PARA BASES ESTABILIZADAS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA.....	55
<b>4.4. ENSAYO DE INMERSIÓN-COMPRESIÓN.....</b>	<b>56</b>
<b>4.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE INMERSIÓN-COMPRESIÓN.....</b>	<b>58</b>
4.5.1. DETERMINACIÓN PORCENTAJE ÓPTIMO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA.....	62
<b>4.6. COMPARACIÓN DE COSTOS ESTABILIZACIÓN CON EMULSIÓN ASFÁLTICA Y CON CEMENTO PORTLAND.....</b>	<b>63</b>
4.6.1. DETERMINACIÓN COEFICIENTES ESTRUCTURALES ( $a_i$ ) PARA CADA MÉTODO DE ESTABILIZACIÓN.....	63
4.6.2. DETERMINACIÓN NÚMEROS ESTRUCTURALES ( $SN_i$ ).....	65



4.6.2.1. Generalidades.....	65
4.6.2.2. Variable Tránsito.....	67
4.6.2.2.1. Proyección del Tránsito.....	67
4.6.2.2.2. Número de Ejes Equivalentes.....	70
4.6.2.3. Variable Subrasante.....	74
4.6.2.4. Variable Materiales.....	74
4.6.2.4.1. Sub-Base.....	74
4.6.2.4.2. Base Estabilizada.....	75
4.6.2.4.3. Carpeta Asfáltica.....	75
4.6.2.5. Serviciabilidad Inicial Po y Serviciabilidad Final Pt.....	76
4.6.2.6. Confiabilidad R.....	77
4.6.2.7. Desviación normal estándar Zr y Error estándar combinado So.....	77
4.6.2.8. Coeficiente de Drenaje Cd (mi).....	78
4.6.2.9. Solución Fórmula Método AASHTO 93 para determinar el Número Estructural (SN) de cada capa (Sub-Base, Base y Carpeta Asfáltica).....	79
4.6.3. DETERMINACIÓN DE ESPESORES.....	85
4.6.3.1. Estructura con base estabilizada con Emulsión Asfáltica.....	85
4.6.3.2. Estructura con base estabilizada con Cemento Portland.....	88
4.6.4. ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS (APU) PARA BASE ESTABILIZADA CON EMULSIÓN ASFÁLTICA Y BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO PORTLAND.....	95
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>100</b>
<b>6. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>102</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>104</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>107</b>



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> <i>Material Seleccionado Calcáreo (Zahorra)</i> .....	24
<b>Figura 2.</b> <i>Fórmula de diseño según el Método AASHTO 93</i> .....	29
<b>Figura 3.</b> <i>Número Estructural</i> .....	31
<b>Figura 4.</b> <i>Coficiente Estructural de Bases Tratadas</i> .....	32
<b>Figura 5.</b> <i>Fórmulas para determinación de Espesores</i> .....	33
<b>Figura 6.</b> <i>Universidad de Cartagena sede Piedra de Bolívar</i> .....	35
<b>Figura 7.</b> <i>Conjunto Residencial Los Tamarindos</i> .....	35
<b>Figura 8.</b> <i>Esquema del procedimiento a realizar con los estabilizantes estudiados</i> .....	38
<b>Figura 9.</b> <i>Correlaciones de Coficiente Estructural para Bases tratadas</i> .....	43
<b>Figura 10.</b> <i>Correlaciones de Coficiente Estructural Módulo y Resistencia para Bases tratadas</i> .....	64
<b>Figura 11.</b> <i>Ubicación Cereté</i> .....	66
<b>Figura 12.</b> <i>Modificación vía debido al proyecto</i> .....	66
<b>Figura 13.</b> <i>Fórmula Número de Ejes Equivalentes</i> .....	70
<b>Figura 14.</b> <i>Designación vehículos de Transporte de Carga</i> .....	71
<b>Figura 15.</b> <i>Factores Daño para cada tipo de Vehículo</i> .....	72
<b>Figura 16.</b> <i>Factor Direccional y Factor Carril</i> .....	73



<b>Figura 17.</b> <i>Correlación AASHTO para hallar el Mr teniendo el valor de CBR.....</i>	<i>75</i>
<b>Figura 18.</b> <i>Número Estructural sobre la Subrasante.....</i>	<i>80</i>
<b>Figura 19.</b> <i>Número Estructural sobre la Sub-Base.....</i>	<i>81</i>
<b>Figura 20.</b> <i>Número Estructural sobre la Base Estabilizada con Emulsión Asfáltica.....</i>	<i>82</i>
<b>Figura 21.</b> <i>Número Estructural sobre la Base Estabilizada con Cemento Portland.....</i>	<i>83</i>
<b>Figura 22.</b> <i>Fórmulas para determinación de Espesores.....</i>	<i>85</i>
<b>Figura 23.</b> <i>Opción 1 Estructura Pavimento con Base tratada con Emulsión.....</i>	<i>92</i>
<b>Figura 24.</b> <i>Opción 1 Estructura Pavimento con Base tratada con Cemento.....</i>	<i>92</i>
<b>Figura 25.</b> <i>Opción 2 Estructura Pavimento con Base tratada con Emulsión.....</i>	<i>93</i>
<b>Figura 26.</b> <i>Opción 2 Estructura Pavimento con Base tratada con Cemento.....</i>	<i>93</i>
<b>Figura 27.</b> <i>Opción 3 Estructura Pavimento con Base tratada con Emulsión.....</i>	<i>94</i>
<b>Figura 28.</b> <i>Opción 3 Estructura Pavimento con Base tratada con Cemento.....</i>	<i>94</i>
<b>Figura 29.</b> <i>Lista de precios para base estabilizada en municipios de Cundinamarca.....</i>	<i>97</i>



## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> <i>Aditivos Recomendados Según Tipo de Suelo a Estabilizar (Clasificación U.S.C.)</i> .....	26
<b>Cuadro 2.</b> <i>Especificaciones INVIAS para estabilización de materiales granulares con emulsión asfáltica</i> .....	28
<b>Cuadro 3.</b> <i>Confiabilidad Recomendada por AASHTO</i> .....	30
<b>Cuadro 4.</b> <i>Valores de <math>Z_r</math> y <math>S_o</math></i> .....	31
<b>Cuadro 5.</b> <i>Coefficientes de Drenaje para Pavimentos Flexibles según Método AASHTO</i> .....	32
<b>Cuadro 6.</b> <i>Gradaciones de agregados para construcción de bases estabilizadas con emulsión asfáltica (Tabla 340.1)</i> .....	39
<b>Cuadro 7.</b> <i>Requisitos de los agregados pétreos para la construcción de bases estabilizadas con emulsión asfáltica (Tabla 340.2)</i> .....	40
<b>Cuadro 8.</b> <i>Requerimientos de las mezclas con emulsión asfáltica. (Tabla 340.7)</i> .....	41
<b>Cuadro 9.</b> <i>Granulometría del material seleccionado calcáreo (zahorra)</i> .....	44
<b>Cuadro 10.</b> <i>Ensayo de Desgaste de Los Ángeles del material seleccionado calcáreo (zahorra)</i> .....	45
<b>Cuadro 11.</b> <i>Ensayo de solidez a los sulfatos del material seleccionado calcáreo (zahorra)</i> .....	46
<b>Cuadro 12.</b> <i>Límite líquido, Índice de Plasticidad y clasificación del material seleccionado calcáreo (zahorra)</i> .....	47
<b>Cuadro 13.</b> <i>Ensayo de equivalente de arena del material seleccionado calcáreo (zahorra)</i> .....	48
<b>Cuadro 14.</b> <i>Ensayo Proctor en el material seleccionado</i> .....	49
<b>Cuadro 15.</b> <i>Prueba Compactación en el ensayo de CBR</i> .....	51
<b>Cuadro 16.</b> <i>Resultado penetraciones ensayo CBR</i> .....	52



<b>Cuadro 17.</b> <i>Resumen cumplimiento de la gradación estipulada en la Norma INVIAS, del material seleccionado calcáreo utilizado.....</i>	<i>53</i>
<b>Cuadro 18.</b> <i>Resumen cumplimiento los requisitos de Dureza, Durabilidad, Limpieza y Capacidad de soporte estipulados en la Norma INVIAS, del material seleccionado calcáreo utilizado.....</i>	<i>55</i>
<b>Cuadro 19.</b> <i>Resultados ensayo Inmersión-Compresión.....</i>	<i>57</i>
<b>Cuadro 20.</b> <i>Resultados de Resistencia Seca y Resistencia Húmeda para cada porcentaje de Emulsión.....</i>	<i>58</i>
<b>Cuadro 21.</b> <i>Resistencias Conservadas Promedio para cada porcentaje de Emulsión.....</i>	<i>62</i>
<b>Cuadro 22.</b> <i>Serie Histórica 1997 a 2011.....</i>	<i>68</i>
<b>Cuadro 23.</b> <i>TPDS del 2016 y acumulados a 10 y 20 años.....</i>	<i>69</i>
<b>Cuadro 24.</b> <i>Número de Ejes Equivalentes a 10 y a 20 años.....</i>	<i>74</i>
<b>Cuadro 25.</b> <i>Serviciabilidad Inicial y Final a utilizar.....</i>	<i>76</i>
<b>Cuadro 26.</b> <i>Confiabilidad a utilizar.....</i>	<i>77</i>
<b>Cuadro 27.</b> <i>Desviación estándar y Error estándar a utilizar.....</i>	<i>78</i>
<b>Cuadro 28.</b> <i>Valor a utilizar de Coeficiente de Drenaje.....</i>	<i>78</i>
<b>Cuadro 29.</b> <i>Variables para diseño con base estabilizada utilizando emulsión.....</i>	<i>84</i>
<b>Cuadro 30.</b> <i>Variables para diseño con base estabilizada utilizando cemento.....</i>	<i>84</i>
<b>Cuadro 31.</b> <i>Opción 1 Valores de las variables para el diseño de la estructura de pavimento con base Estabilizada con Emulsión Asfáltica.....</i>	<i>86</i>
<b>Cuadro 32.</b> <i>Opción 2 Valores de las variables para el diseño de la estructura de pavimento con base Estabilizada con Emulsión Asfáltica.....</i>	<i>87</i>



<b>Cuadro 33.</b> <i>Opción 3 Valores de las variables para el diseño de la estructura de pavimento con base Estabilizada con Emulsión Asfáltica.....</i>	<i>88</i>
<b>Cuadro 34.</b> <i>Opción 1 Valores de las variables para el diseño de la estructura de pavimento con base Estabilizada con Cemento Portland.....</i>	<i>89</i>
<b>Cuadro 35.</b> <i>Opción 2 Valores de las variables para el diseño de la estructura de pavimento con base Estabilizada con Cemento Portland.....</i>	<i>90</i>
<b>Cuadro 36.</b> <i>Opción 3 Valores de las variables para el diseño de la estructura de pavimento con base Estabilizada con Cemento Portland.....</i>	<i>91</i>
<b>Cuadro 37.</b> <i>APU para Base Estabilizada con Emulsión Asfáltica.....</i>	<i>96</i>
<b>Cuadro 38.</b> <i>APU para Base Estabilizada con Cemento Portland.....</i>	<i>98</i>



## LISTA DE GRÁFICAS

<b>Gráfica 1.</b> <i>Curva Humedad VS Densidad Seca</i> .....	50
<b>Gráfica 2.</b> <i>Relación para obtener valores de C.B.R. al 100% y 95% de compactación</i> .....	52
<b>Gráfica 3.</b> <i>Curva Granulométrica para comprobar que los resultados obtenidos cumplen el rango de la gradación BEE-1</i> .....	54
<b>Gráfica 4.</b> <i>Curvas de Porcentaje de Emulsión vs Resistencias Promedio</i> .....	59
<b>Gráfica 5.</b> <i>Resistencia del Suelo Sebkhá incorporándole emulsión asfáltica</i> .....	60
<b>Gráfica 6.</b> <i>Resistencia del Suelo incorporándole cemento</i> .....	61
<b>Gráfica 7.</b> <i>Porcentaje de Emulsión vs Resistencia Conservada Promedio</i> .....	62
<b>Gráfica 8.</b> <i>TDPS vs Año. Comportamiento Histórico</i> .....	68



## **LISTA DE ANEXOS**

<b>Anexo 1.</b> Material Seleccionado Calcáreo (Zahorra).....	107
<b>Anexo 2.</b> Emulsión Asfáltica.....	107
<b>Anexo 3.</b> Pesado del Material Seleccionado.....	108
<b>Anexo 4.</b> Lavado del Material Seleccionado.....	108
<b>Anexo 5.</b> Ensayo de Granulometría.....	109
<b>Anexo 6.</b> Ensayo de Desgaste de Los Ángeles.....	109
<b>Anexo 7.</b> Ensayo de Equivalente de Arena.....	110
<b>Anexo 8.</b> Ensayo de Límites de Atterberg.....	110
<b>Anexo 9.</b> Ensayo de Próctor y CBR.....	111
<b>Anexo 10.</b> Preparación Briqueta para Ensayo de Inmersión-Compresión.....	111
<b>Anexo11.</b> Máquina de Compresión Simple Inconfinada.....	112
<b>Anexo 12.</b> Briqueta Preparada para Ensayo de Inmersión Compresión.....	112
<b>Anexo 13.</b> Tamices Utilizados para Ensayo de Inmersión-Compresión.....	113
<b>Anexo 14.</b> Briquetas con 3%, 4%, 5% y 6% de emulsión.....	113
<b>Anexo 15.</b> Ensayo de Compresión a briquetas preparadas.....	114



## **RESUMEN**

La estabilización de bases para estructuras de pavimentos es una opción muy utilizada en el campo de la construcción, pues con esto se consiguen menores costos en los materiales aplicados y se obtienen resultados positivos estructuralmente hablando. En esta investigación se tuvo como objetivo analizar las ventajas y desventajas de la aplicación de emulsiones asfálticas en la estabilización de material seleccionado calcáreo utilizado como capas de pavimentos, y examinar los costos de esta solución mediante la comparación con otros métodos de estabilización. Para comprobar el método se realizaron las verificaciones de los requisitos establecidos por la Norma INVIAS para bases estabilizadas, los cuales son verificar la gradación y requisitos del material seleccionado, realizar ensayos de humedad e inmersión-compresión para así tener el porcentaje de emulsión óptimo. Se obtuvieron resultados positivos, cumpliendo con todos los requisitos evaluados. El porcentaje óptimo de ligante fue de 4% para una Resistencia Conservada de 93,31%, superando el valor mínimo establecido por la Norma que es de 75%. También se analizó el método en un diseño de pavimento, utilizando información secundaria y comparándolo con un diseño utilizando una base estabilizada con Cemento Portland. Para todos los espesores estudiados se obtuvieron las mismas estructuras tanto utilizando base estabilizada con emulsión como con cemento. El diseño escogido fue el de una estructura con una Carpeta Asfáltica de 10 cm, una base de 15 cm, una Sub-base granular de 30 cm y la Subrasante. El último parámetro para comparar ambos métodos de estabilización fue hacer un Análisis de Precios Unitarios (APU) como lo establece el INVIAS para bases, siendo el metro cúbico (m<sup>3</sup>) la unidad utilizada. De esta comparación se obtuvo que una base estabilizada con emulsión es aproximadamente \$ 11.000,00 pesos más económica que una base estabilizada con cemento. Todo esto permite concluir que las bases estabilizadas con emulsión son una opción que presenta muchas ventajas tanto estructurales como económicas, lo que la convierte en una posibilidad muy viable para ser utilizada tanto a nivel local como nacional.

**Palabras Clave:** Emulsión Asfáltica, Resistencia Conservada, Ensayo de Inmersión-Compresión, Estructura de Pavimento, Análisis de Precios Unitarios (APU).



## **ABSTRACT**

Stabilizing bases for pavement structures is commonly used in the field of construction, because with it lower costs are achieved with the materials and positive structural results are obtained. This investigation was aimed to analyze the advantages and disadvantages of the application of asphalt emulsions in stabilizing calcareous selected material used as pavement layers, and examine the costs of this solution by comparison with other methods of stabilization. To analyze the method were checked the requirements established by the INVIAS for stabilized bases, which are verify gradation and requirements of the selected material, perform moisture tests and immersion-compression so they have the optimal percentage of emulsion. With positive results, beating all the requirements evaluated. The optimum percentage of binder was 4% for a Conserved Resistance of 93.31%, exceeding the minimum value set by the Standard that is 75%. The method was also tested on a pavement design using secondary information and comparing it with a design using a Portland Cement stabilized base. For all thicknesses studied the same structures was obtained using both emulsion stabilized base as cement. The chosen design was a structure with an asphalt layer of 10 cm, 15 cm base, a granular sub-base of 30 cm and the subgrade. The last parameter to compare both methods was to make a Unit Price Analysis (UPA) as established by the INVIAS for bases, being the cubic meter (m<sup>3</sup>) the unit used. From this comparison was obtained that a stabilized emulsion base is approximately \$ 11,000.00 COP cheaper than a base stabilized with cement. All this leads to the conclusion that the stabilize bases with emulsion is an option that has many structural and economic advantages, making it very viable to be used both locally and nationally.

**Keywords:** Asphalt Emulsion, Conserved Resistance, Immersion-Compression Test, Pavement Structure, Unit Price Analysis (UPA).



## **INTRODUCCIÓN**

Uno de los elementos más importantes en toda civilización son las comunicaciones terrestres, pues estas son las que permiten el desarrollo cómodo y eficiente de todas las actividades que las personas necesitan llevar a cabo, como las de transportarse y movilizar cargas. Desde tiempos antiguos es reconocida la trascendencia de la existencia de vías terrestres para comunicar las civilizaciones. Los romanos consideraban que la falta de vías de comunicación hacía que los pueblos del norte carecieran de sociabilidad y humanidad (Blázquez Martínez, 1978). Esto hace que todo estudio que pueda mejorar o beneficiar el campo de las comunicaciones terrestres sea de suma importancia.

En la actualidad, las conexiones viales se realizan mediante la pavimentación de caminos que permitan el correcto tránsito de los diferentes medios de transporte que se utilicen. Para conseguir una pavimentación correcta y duradera es esencial brindarle al pavimento una estructura uniforme y resistente. Otro de los elementos asociado con las estructuras de pavimento es la economía, debido a esto han aparecido métodos de reducir los costos de las bases y sub-bases de pavimento mediante la mezcla de suelos con aditivos que mejoren las características físicas y mecánicas de estos, permitiendo tener estructuras de menores espesores, disminuyendo las excavaciones y los costos en materiales.

Hablando del ámbito de la ingeniería, Los costos de las conexiones viales se ven aumentados debido al proceso de remoción del material no utilizable, compra, transporte y colocación del que lo reemplazará. Lo que hace fundamental buscar la manera de reducir los costos mencionados.

Una alternativa es utilizar materiales de costos no tan elevados y mezclarlos con otro que física o químicamente mejore las condiciones y lo haga utilizable para las estructuras de pavimentos. Entre estos materiales se encuentran los aditivos, la cal, el cemento y el asfalto.

Los aditivos y el cemento son productos costosos en el mercado, por lo que no siempre es provechoso o rentable utilizarlos en el proceso de estabilización. La cal es uno de los materiales económicos utilizados y tiene muchos beneficios, pero un problema es la



durabilidad a largo plazo en presencia de mucha humedad, condición común en Cartagena, por lo que la aplicación del asfalto como agente estabilizante resultaría provechosa tanto en costos como en durabilidad. Debido a esto se busca demostrar que las emulsiones asfálticas pueden ser utilizadas como agente estabilizante para materiales como las 'zahorras' y que estas tienen bondades y beneficios mejorando las condiciones mecánicas que pongan en consideración su utilización tanto local como nacionalmente. Mundialmente se han obtenido resultados positivos utilizando el asfalto como estabilizante, existen ejemplos en diferentes países del mundo, tanto asiáticos como Emiratos Árabes y Omán, y americanos como Estados Unidos, Ecuador y Colombia, en los cuales se presentaron resultados con aumento en la resistencia, cohesión y estabilidad de los materiales estabilizados, además de disminución en los costos de los procesos de estabilización. Esto permite considerar aún más a las emulsiones asfálticas como un posible estabilizante para la ingeniería Colombiana.

En la presente investigación se deseó saber si las emulsiones asfálticas presentaban bondades como estabilizante de capas de pavimento, mejorando sus condiciones mecánicas y disminuyendo los costos comparándolos con los costos de métodos clásicos de estabilización como el de estabilizar con Cemento Portland.

El Objetivo General de la investigación fue analizar la aplicación de emulsiones asfálticas de Rotura Lenta para estabilizar un material seleccionado calcáreo utilizado en capas de pavimento, sus ventajas, desventajas y costos, comparándolos con el método más comúnmente utilizado de estabilización, aplicando Cemento Portland. Además de este objetivo, se tuvieron los de caracterizar las propiedades de la 'zahorra' utilizada, verificar que las especificaciones colombianas fueran cumplidas tanto por la emulsión asfáltica, como por el material granular seleccionado, que se encuentran reglamentadas el Artículo 340-13 '*BASE ESTABILIZADA CON EMULSIÓN ASFÁLTICA*' de la Norma INVIAS. Se estableció el porcentaje óptimo de emulsión a utilizarse y los espesores de las capas estabilizadas, esto último utilizando el Método AASHTO 93. Por último se compararon los costos de la estabilización con emulsión asfáltica con una utilizando Cemento, teniendo los espesores de ambos métodos y utilizando un estudio como información secundaria para suponer una longitud a estabilizar.



Sumándole a todo lo anterior, se sabe que la 'zahorra' es un material bastante común y muy utilizado en el campo de la construcción, por lo cual es sumamente beneficioso aplicar esta estabilización con asfalto en dicho material. Como también se mencionó, las bondades del asfalto se ven perfectamente reflejadas en el material seleccionado, pues este está compuesto en su mayoría por material granular, que se complementa de muy buena forma con el asfalto, brindándole adherencia e impermeabilización al suelo (de Solminihac T., Echeverría G., & Thenoux Z., 1989).

Por todo lo anterior se puede considerar el estabilizar material seleccionado calcáreo utilizando asfalto, específicamente emulsiones asfálticas de Rotura Lenta (RL) y utilizar el producto obtenido en capas para pavimentos en la ciudad de Cartagena como una opción de interés para el campo de la construcción vial, que además favorecerá a los futuros usuarios de las vías que serán construidas, pues se tendrán productos de calidad y en un menor tiempo al comúnmente esperado.

En el campo profesional es de mucha importancia que se demuestre la eficiencia de diferentes maneras de realizar los proyectos, es por esto que la presente investigación aporta al área de la ingeniería un método para estabilizar capas de pavimento utilizando emulsiones asfálticas, que es muy poco utilizado en el país. Esto permite tener un abanico de opciones cuando se vaya a realizar una estabilización de algún suelo que vaya a ser utilizado en pavimentación de vías. Además, le informa al ámbito ingenieril las bondades de las emulsiones asfálticas como un material para mejorar mecánicamente suelos que presenten problemas de este tipo. También le servirá a futuras investigaciones con diferentes materiales estabilizantes, mostrando los pasos a seguir para comprobar si un material funciona para estabilizar suelos utilizados en capas de pavimentos. Sumándose a lo anterior, la investigación permite dar más usos a un material bastante común como lo es el asfalto y así tener una alternativa técnica y económica de bajo costo que permitirá fácilmente tener vías de mayor calidad y más duración, reduciendo así la necesidad de mantenimiento tan constante como se ve hoy en día.



La investigación se realizó en la ciudad de Cartagena de Indias (Bolívar, Colombia), en los laboratorios de Geotecnia y Materiales de la sede Piedra de Bolívar de la Universidad de Cartagena, entre los meses de Enero y Mayo del año 2016.

Se analizaron dos estabilizaciones, una con Emulsión Asfáltica y otra con Cemento Portland. La estabilización con emulsión se realizó en laboratorio, mientras que la de cemento fue tomada de resultados de información secundaria. Inicialmente se verificó que los materiales cumplieran con las reglamentaciones para cada procedimiento, luego se procedió a realizar las pruebas necesarias. Cada una se hizo con tres porcentajes de emulsión diferentes. Los porcentajes utilizados fueron de tres, cuatro y cinco por ciento. A las tres pruebas con emulsión se le realizaron los ensayos especificados en la Norma INVIAS en el Artículo 340-13 sobre estabilización con emulsión asfáltica. De las pruebas de la emulsión se determinaron el porcentaje óptimo de estabilizante para luego hacer el diseño de la mezcla. Como resultado se obtuvo una mezcla de material seleccionado calcáreo y emulsión (M1), y se comparó con una mezcla de material seleccionado y cemento (M2), obtenida de información secundaria.

Como la presente investigación tiene el objetivo de demostrar las posibles ventajas y desventajas de usar emulsión asfáltica como estabilizante se realizan pruebas con este material, los resultados se comparan con resultados de estabilizaciones con cemento (material que está probado como un muy buen agente estabilizante), obtenidos de información secundaria. No se realizaron pruebas con cemento ya que está comprobado que funciona de buena forma para estabilizar capas de pavimentos, entonces el hacerlas hubiese generado mayores costos y haría que la investigación durara más tiempo innecesariamente.

Con los resultados obtenidos se pudo demostrar que los anteriores estudios con resultados positivos estaban correctos y permiten afianzar a las emulsiones asfálticas como un material funcional para la estabilización. Y además se aporta que el método también funciona correctamente con un material que no se había probado anteriormente, el cual es el material seleccionado calcáreo (zahorra), dando así mayor rango de posibilidades al método.



## **1. MARCO DE REFERENCIA**

A continuación se desarrollarán los fundamentos conceptuales y teóricos, los antecedentes y el estado actual del tema de estudio a nivel local, nacional e internacional.

### **1.1. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE**

Para tener claridad de las posibles soluciones a la problemática de la estabilidad en estructuras de pavimentos, es esencial conocer lo realizado con respecto al tema y analizar la información secundaria relacionada con la estabilización de suelos con asfalto. Por lo anterior, se presenta información general y primordial sobre diferentes estudios realizados acerca del uso de materiales asfálticos como agentes estabilizantes.

La estabilización de suelos para estructuras de pavimentos es una necesidad para la construcción de vías, puesto que en muchos casos estos no son aptos para ser utilizados en las bases y sub-bases de los pavimentos. El tener que remover el material y tener que reemplazarlo con otro que si cumpla las especificaciones generará mayores gastos económicos y demoras en la ejecución. Esto hace que el estabilizar los suelos, en lugar de cambiarlos, sea beneficioso en todo sentido.

Mundialmente se han estudiado las posibles formas de estabilizar suelos que no cumplen con las especificaciones por medio del uso de asfalto como medio estabilizante, ya sean asfaltos espumados (Mohamed Asi, 2001), obteniendo resultados positivos de resistencia, cohesión y estabilidad en presencia de agua agregando un 2% de Cemento Portland a la mezcla estabilizada. Resultados muy similares fueron obtenidos al utilizar espuma de betún y analizar los beneficios de costo que este trae (Mofreh F., 2007), necesitando espesores de capas de base reducidos al adicionarle a la mezcla un 2% de Cemento Portland.

También se ha analizado la utilización de asfalto recuperado del proceso de fresado para el mismo fin, estabilizar dichas estructuras. Pero los estudios sobre este método han tenido resultados que concluyen la ineficacia del asfalto recuperado para estabilizar, debido a que



las mezclas no alcanzan los valores mínimos de CBR, tampoco las especificaciones mínimas para ser usadas en bases y sub-bases de pavimento, ni las resistencias necesarias para cumplir con su fin (Arulrajah, Piratheepan, & Disfani, 2014).

Aunque, si al asfalto recuperado y al suelo se le agrega cemento como colaborador en el proceso de estabilización, si se consiguen resultados provechosos para el fin de pavimentar (Taha, Al-Harthy, Al-Shamsi, & Al-Zubeidi, 2002), logrando cumplir con los requerimientos para su uso en bases y sub-bases.

En un plano más cercano a Colombia se han realizado estudios aplicando otro método de estabilización con asfalto, la cual es la de la Emulsión Asfáltica. Está a diferencia de la del asfalto espumado y la espuma de betún, requiere de un proceso menos complicado para lograr mezclarla con el suelo, por lo cual ha sido analizada por varios autores en los últimos tiempos.

Entre los usos de la emulsión asfáltica se presenta la de estabilizar suelos de material granular, logrando brindar al agregado cohesión de la cual carece, mejorando su comportamiento al corte y la flexión (Rosero Alvarado, 2013).

De los estudios nombrados se concluye que el asfalto podría ser utilizado para estabilizar y mejorar materiales granulares seleccionados (zahorra), pues estas poseen en su mayoría material granular, que como se ha visto, responde positivamente al adicionársele asfalto como agente estabilizante.

Pero el material seleccionado calcáreo (zahorra) también tiene un contenido de material fino, aunque en un menor porcentaje al granular. Por esto es necesario analizar el uso de emulsiones asfálticas con suelos finos.

Un estudio de lo anterior fue uno realizado en Ecuador (Almeida Navarrete & Sánchez Quintero, 2011) en el que se obtuvieron resultados negativos al usar suelos con una muy alta presencia de finos debido a que se necesitaba demasiada emulsión para rodear tantos granos finos, esto da como resultado un muy alto costo. Otra conclusión negativa fue que por la misma existencia de muchos finos fue difícil mezclar homogéneamente el suelo con la emulsión para obtener buenos resultados. A pesar de los malos resultados al mezclar el



asfalto con el suelo, se consiguió algo muy importante, que fue disminuir la absorción de agua de los granos finos. De los resultados negativos se concluye que la estabilización con emulsiones asfálticas presenta problemas ante un exceso de partículas finas. Esto fue lo más importante de la investigación, pues lo que se busca es estabilizar 'zahorras', que poseen un pequeño porcentaje de finos.

Este estudio dio un aporte sumamente importante para saber cuándo se puede aplicar este método y cuando no, para evitar errores que generen pérdida de tiempo y de dinero. Dependiendo a la cantidad de material fino que esté presente en el material a estabilizar, como en este caso es el material seleccionado calcáreo, habrá que controlar el pequeño porcentaje que en esta se encuentre.

Por último se destacan estudios que han permitido concluir que las estabilizaciones con asfalto se comportan de mejor manera en climas calientes (de Solminihac T., Echeverría G., & Thenoux Z., 1989). Esto permite pensar lo positivo y útil que el método resultaría para el gremio de la ingeniería de la ciudad de Cartagena. Sumado a la positiva reacción climática, también se tiene registro de diversos casos en los que estabilizar con asfalto ha producido disminución en tiempo, costos y espesores de capas necesarias (Barnhardt, 2005). Tal vez este sea el mayor beneficio para la construcción, pues los costos y los tiempos siempre favorece que sean lo menores posibles.

Es necesario marcar las limitaciones halladas en investigaciones pasadas:

- El material a estabilizar no podrá tener un porcentaje de finos que exceda al 20%, ya que en cuantos más finos tenga, mayor superficie específica del material y mayor consumo de asfalto, lo cual no sería rentable (Torres Gracia, 2014) (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2005).
- Para que sea rentable la aplicación del método es necesario que los costos reducidos en excavación y el espesor de las capas sean mayores a los costos generados por el mayor costo que tiene el asfalto comparado con otros métodos de estabilización (Australian Stabilisation Industry Association Ltd (ASIA), 2000).

El método no podrá ejecutarse en lugares con una temperatura ambiente inferior a los cinco grados Celsius (5°C) como está establecido en la Norma INVIAS Artículo 340-13.



## 1.2. MARCO TEÓRICO

Ahora se mostrarán con detalle todos los conceptos necesarios para poder analizar la utilización de emulsiones asfálticas como agentes estabilizantes de 'zahorra' para bases y sub-bases de pavimentos, y así poder hacer una comparación de esta estabilización con el método de estabilización más comúnmente aplicado en Colombia, que es utilizando Cemento como agente estabilizante.

### 1.2.1. MATERIAL SELECCIONADO CALCÁREO (ZAHORRA)

Se define como material seleccionado calcáreo un material gravoso con un menor contenido de arcilla, de granulometría continua, utilizado como capa de firme, que contiene un elevado contenido de calcio. Los materiales usados para su elaboración son áridos no triturados procedentes de graveras o depósitos naturales, o bien suelos granulares, o una mezcla de ambos. En Cartagena de Indias es comúnmente conocido como 'zahorra'.

*Figura 1. Material Seleccionado Calcáreo (Zahorra).*



*Fuente. ARIDS ANOIA. Barcelona, España, 2015.*



### **1.2.2. EMULSIÓN ASFÁLTICA**

Existen asfaltos para la construcción, entre ellos las emulsiones asfálticas. Estas son un sistema heterogéneo de dos fases normalmente inmiscibles, como son el asfalto (60-70%) y el agua, al que se le incorpora una pequeña cantidad de un agente activador de superficie (0.2-1%), tensoactivo o emulsificante, de base jabonosa o solución alcalina, que mantiene en dispersión el sistema, siendo la fase continua el agua y la discontinua los glóbulos de asfalto de tamaño entre 1 y 10 micrones. Cuando la emulsión se pone en contacto con el agregado se produce un desequilibrio eléctrico que la rompe, llevando a las partículas de asfalto a unirse a la superficie del agregado; el agua fluye o se evapora separándose de las partículas pétreas recubiertas por el asfalto. Existen emulsificantes que permiten que esta rotura sea instantánea y otros que retardan este fenómeno (Torres Ortega, Asfalto, 2015). Se clasifican en emulsiones de rotura rápida (RR), de rotura media (RM) y de rotura lenta (RL) (Sánchez Sabogal, Materiales para Base y Subbase, 2005) (Root, 1979).

### **1.2.3. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS**

Con el fin de tener un material apto, que cumpla con todas las especificaciones necesarias para su uso se utilizan diferentes métodos para mejorar dichos materiales. Si de suelos se habla, un método muy aplicado es el de la estabilización. La cual consiste en combinar el suelo a ser utilizado con un aditivo que mejore sus condiciones. Entre los aditivos más utilizados se encuentran el cemento, la cal, cenizas, aceites de petróleo, asfalto, resinas naturales y polímeros. Cada aditivo funciona de mejor manera o es más utilizado para tipos específicos de suelo. Por ejemplo; el cemento, el asfalto y las cenizas son utilizados para estabilizar suelos granulares. Mientras que la cal es usada en suelos arcillosos. Los usos de aditivos varían según las características que puedan aportarle a los diferentes tipos de suelo. Los objetivos de la estabilización son diversos, y dependen del tipo del suelo que se esté estabilizando. Pero principalmente se busca controlar la expansión, reducir los índices de plasticidad, incrementar la resistencia, disminuir la compresibilidad, disminuir la permeabilidad y disminuir la erosionabilidad. Todo esto para hacer el material eficiente para el uso propuesto. (Suárez Díaz, 2012) (U.S. Department of the Army, United States Department of the Air Force, & Navy U. S. Navy, 2004).



**Cuadro 1.** Aditivos Recomendados Según Tipo de Suelo a Estabilizar (Clasificación U.S.C.).

GRUPO	SUELOS	ADITIVO RECOMENDADO
1A	SW	ASFALTO (IP $\leq$ 25)
	SP	CEMENTO PORTLAND (IP $\leq$ 25)
		CENIZAS+CAL+CEMENTO (IP $\leq$ 25)
1B	SW-SM	ASFALTO (IP $\leq$ 10)
	SP-SM	CEMENTO PORTLAND (IP $\leq$ 30)
	SW-SC	CAL (IP $\leq$ 12)
	SP-SC	CENIZAS+CAL+CEMENTO (IP $\leq$ 25)
1C	SM	ASFALTO (IP $\leq$ 10) (FINOS<30%)
	SC	CEMENTO PORTLAND (IP $\leq$ 20)
	SM-SC	CENIZAS+CAL+CEMENTO (IP $\leq$ 25)
2A	GW	ASFALTO
	GP	C. PORTLAND (PASA TAMIZ #4>45%)
		CENIZAS+CAL+CEMENTO
2B	GW-GM	ASFALTO (IP $\leq$ 10)
	GP-GM	CEMENTO PORTLAND (IP $\leq$ 30)
	GW-GC	CENIZAS+CAL+CEMENTO (IP $\leq$ 25)
	GP-GC	
2C	GM	ASFALTO (IP $\leq$ 10)
	GC	CEMENTO PORTLAND (IP $\leq$ 20)
	GM-GC	CAL (IP $\geq$ 12)
		CENIZAS+CAL+CEMENTO (IP $\leq$ 25)
3	CH	C. PORTLAND (IP $\leq$ 40) (LL<40) CAL (IP $\geq$ 12)
	CL	
	MH	
	OH	
	OL	
	ML-C	

**Fuente.** Ingeniero Jaime Suárez Díaz. Estabilización de Suelos, 2012. Modificado por autor.



#### **1.2.4. BASES Y SUB-BASES DE PAVIMENTO**

Los pavimentos cuentan con diferentes capas que conforman una estructura que trabaja en conjunto, y cada una cumple con funciones específicas. La primera capa es la Capa Subrasante, la segunda es la Sub-base, luego la Base y por último la Capa de Rodadura. Esta es la estructura para un pavimento flexible, para un pavimento rígido tan solo se utiliza la Subrasante, la Sub-base y la Capa de Rodadura (Losa) (Torres Ortega, Materiales de Construcción, 2015).

La Base es la capa que se encuentra bajo la capa de rodadura de un pavimento asfáltico. Debido a su proximidad con la superficie, debe poseer alta resistencia a la deformación, para soportar las altas presiones que recibe. Se construye con materiales granulares procesados o estabilizados y, eventualmente, con algunos materiales marginales.

La Sub-base es la capa que se encuentra entre la base y la subrasante en un pavimento asfáltico. Debido a que está sometida a menores esfuerzos que la base, su calidad puede ser inferior y generalmente está constituida por materiales locales granulares o marginales.

El material que se coloca entre la subrasante y las losas de un pavimento rígido también se denomina sub-base. En este caso, debe permitir el drenaje libre o ser altamente resistente a la erosión, con el fin de prevenir el bombeo. En algunas partes a esta capa la llaman base.

#### **1.2.5. ESTABILIZACIÓN CON EMULSIONES ASFÁLTICAS**

Uno de los aditivos utilizados en la estabilización de suelos es el asfalto. Este proceso se realiza a temperatura ambiente, con productos asfálticos que presenten una consistencia adecuada bajo esta condición. Los productos asfálticos que tienen esta característica son las emulsiones asfálticas y el asfalto espumado. Las emulsiones asfálticas son muy utilizadas debido a su satisfactorio comportamiento con los agregados pétreos.

En la estabilización de materiales granulares donde ya existe aporte friccional, el asfalto cumple dos funciones. La primera es la de Impermeabilización, creando una membrana que previene o dificulta la entrada del agua, reduciendo la tendencia del material a perder



resistencia y módulo en presencia de agua. La otra es la Adhesión, brindando al agregado la cohesión de la cual carece, aumentando la resistencia al corte y a la flexión, así como el módulo elástico (Sánchez Sabogal, Materiales para Base y Subbase, 2005).

**Cuadro 2.** Especificaciones INVIAS para estabilización de materiales granulares con emulsión asfáltica.

GRANULOMETRÍA		
Tamiz	% Pasa	
	BEE-1	BEE-2
1 1/2 "	100	100
1 "	70 - 100	100
1/2 "	50 - 80	60 - 90
3/8 "	45 - 75	50 - 80
# 4	30 - 60	30 - 60
# 8	20 - 45	20 - 45
# 40	10 - 27	10 - 27
# 100	5 - 18	5 - 18
# 400	3 - 15	3 - 15
OTROS REQUISITOS		
Índice Plástico	< 7	
Desgaste de Los Ángeles	< 50%	
IP Pasa tamiz # 200	< 72	

**Fuente.** INVIAS. Artículo 340-13. Base Estabilizada con Emulsión Asfáltica, 2013. Modificado por autor.

El diseño de mezclas con emulsiones asfálticas aplica métodos que tienen la durabilidad como criterio de comportamiento de la mezcla después de compactada y curada. La mayoría de los métodos incluyen la determinación de la pérdida de capacidad resistente de la mezcla después de un periodo de inmersión en agua, comparando la resistencia inicial con la resistencia después de la inmersión (Sánchez Sabogal, Materiales para Base y Subbase, 2005).

El Ensayo de inmersión-compresión, mide el efecto del agua sobre las mezclas asfálticas compactadas, y está especificado en la Norma INV E-738 del 2013, la cual se referencia en la Norma ASTM D 1075. Este ensayo determina la humedad óptima de compactación.



También se realiza el ensayo de compresión y se determina el contenido óptimo de emulsión.

Los materiales estabilizados con emulsión asfáltica con fines de diseño de pavimento deberán cumplir también unas especificaciones tales como el Módulo Dinámico y el comportamiento a la fatiga.

Las especificaciones y las características que deben cumplir las bases o sub-bases estabilizadas con emulsión asfáltica se encuentran reglamentadas en el INVIAS Artículo 340-13 Base Estabilizada con Emulsión Asfáltica.

### 1.2.6. DISEÑO DE PAVIMENTOS POR EL MÉTODO AASHTO 1993

Es un método basado en resultados obtenidos por AASHTO Road Test y que tiene como criterio de falla el índice de Servicio Final ( $P_f$ ). Su fundamento es que el tránsito que lleva a la falla del pavimento es función del Número Estructural, de la Resistencia de la Subrasante, de la pérdida deseada de Índice de Serviciabilidad y de la Confiabilidad elegida (Sánchez Sabogal, Diseño de Pavimentos Asfálticos para Calles y Carreteras, 2005).

Tiene como variables de diseño: el Tránsito ( $N$ ), la Serviciabilidad ( $\Delta PSI$ ,  $P_o$ ,  $P_f$ ), la Confiabilidad ( $R$ ,  $Z_r$ ,  $S_o$ ), la Resistencia de la Subrasante ( $Mr$ ), las Propiedades de los Materiales ( $E$ ,  $a_i$ ), el Drenaje ( $m_i$ ), el Número Estructural ( $SN$ ) y los Efectos Ambientales (Torres Ortega, Diseño Pavimentos Flexibles, 2015).

La Fórmula General del Método es la siguiente.

**Figura 2.** Fórmula de diseño según el Método AASHTO 93.

$$\log W_{18} = Z_r * S_o + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \left(\frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}\right)} + 2.32 \log Mr - 8.07$$

**Fuente.** AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993.



Donde,

$W_{18}$ = Número esperado de repeticiones de ejes equivalentes de 8.2 Ton en el periodo de diseño.

$Z_r$ = Desviación Estándar del error combinado en la predicción del tráfico y comportamiento estructural.

$S_o$ = Error Estándar combinado.

$SN$ = Número Estructural, indicador de la Capacidad Estructural requerida (materiales y espesores).

$\Delta PSI$ = Diferencia entre la Serviciabilidad Inicial ( $P_o$ ) y Final ( $P_t$ ).

$M_r$ = Módulo Resiliente de la Subrasante, Base o Sub-Base.

- La Variable Tránsito es el número acumulado de ejes equivalentes a 8.2 Toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.
- La Serviciabilidad Inicial es la condición que tiene el pavimento inmediatamente después de la construcción, para pavimento Asfáltico tiene un valor de 4.2.
- La Confiabilidad de Diseño es el grado de seguridad de que una determinada alternativa de diseño alcance a durar, en realidad, el tiempo establecido en el periodo seleccionado.

**Cuadro 3.** Confiabilidad Recomendada por AASHTO.

CLASIFICACIÓN FUNCIONAL	URBANO	RURAL
AUTOPISTAS	85% - 99%	80% - 99%
ARTERIAS PRINCIPALES	80% - 99%	75% - 99%
COLECTORAS	80% - 95%	75% - 95%
LOCALES	50% - 80%	50% - 80%

**Fuente.** Ingeniero Ramón Torres Ortega. *Diseño de Pavimentos Flexibles*, 2015.  
Modificado Por Autor.



**Cuadro 4.** Valores de Zr y So.

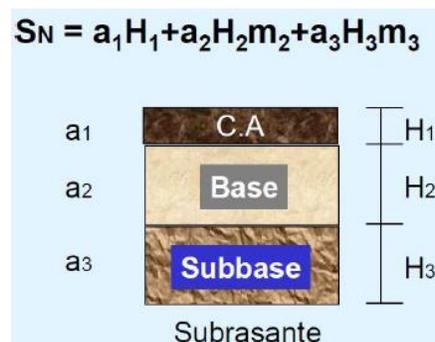
Confiabilidad	Zr
50%	-0,000
60%	-0,253
70%	-0,524
75%	-0,674
80%	-0,841
85%	-1,037
90%	-1,282
91%	-1,340
92%	-1,405
93%	-1,476
94%	-1,555
95%	-1,645
96%	-1,751
97%	-1,881
98%	-2,054
99%	-2,327
99,9	-3,090
99,99%	-3,750

<b>So</b>	0,30 - 0,50
-----------	-------------

**Fuente.** Ingeniero Ramón Torres Ortega. *Diseño de Pavimentos Flexibles*, 2015.  
Modificado por Autor.

- El Número Estructural es utilizado para determinar los espesores de las capas del pavimento.

**Figura 3.** Número Estructural.

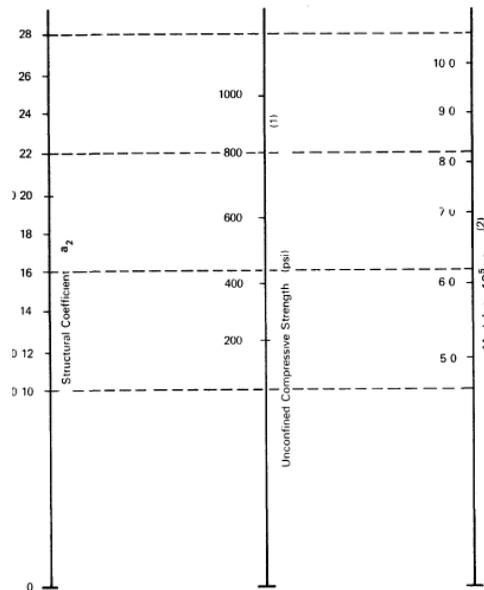


**Fuente.** Ingeniero Ramón Torres Ortega. *Diseño de Pavimentos Flexibles*, 2015.



Para determinar los coeficientes estructurales de cada capa ( $a_i$ ), se utilizan las gráficas de correlación de la AASHTO 93.

**Figura 4.** Coeficiente Estructural de Bases Tratadas.



**Fuente.** Ingeniero Ramón Torres Ortega. *Diseño de Pavimentos Flexibles*, 2015.

- Clasificación del Drenaje.

**Cuadro 5.** Coeficientes de Drenaje para Pavimentos Flexibles según Método AASHTO.

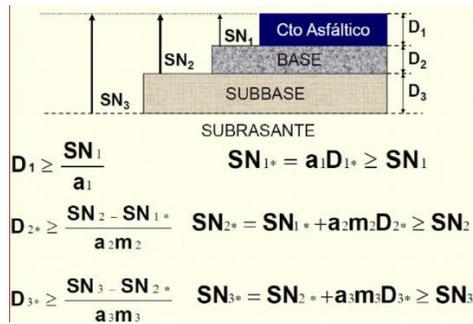
CALIDAD DE DRENAJE	PORCENTAJE DE TIEMPO EN EL QUE EL PAVIMENTO ESTÁ EXPUESTO A NIVELES DE HUMEDAD PRÓXIMOS A LA			
	< 1%	1 - 5%	5 - 25%	> 25%
<b>EXCELENTE</b>	1,40 - 1,35	1,35 - 1,30	1,30 - 1,20	1,20
<b>BUENO</b>	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,15 - 1,00	1,00
<b>REGULAR</b>	1,25 - 1,15	1,15 - 1,05	1,00 - 0,80	0,80
<b>POBRE</b>	1,15 - 1,05	1,05 - 0,80	0,80 - 0,60	0,60
<b>MUY POBRE</b>	1,05 - 0,95	0,95 - 0,75	0,75 - 0,40	0,40

**Fuente.** Ingeniero Ramón Torres Ortega. *Diseño de Pavimentos Flexibles*, 2015.  
Modificado por Autor.



- Para determinar los espesores de las capas se aplican las siguientes fórmulas basadas en la estructura del pavimento.

**Figura 5.** Fórmulas para determinación de Espesores.



**Fuente.** Ingeniero Ramón Torres Ortega. *Diseño de Pavimentos Flexibles*, 2015.



## **2. OBJETIVOS Y ALCANCE**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Analizar las ventajas y desventajas de la aplicación de emulsiones asfálticas de Rotura Lenta (RL) en la estabilización de material seleccionado calcáreo (zahorra) utilizado como capa de pavimentos, y examinar los costos de esta solución mediante la comparación con otros métodos para estabilizar.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar las propiedades del material seleccionado a estabilizar.
- Verificar que la emulsión asfáltica a utilizar cumpla con las especificaciones de las normas colombianas.
- Determinar que el material seleccionado utilizado cumpla con los requerimientos para las estabilizaciones con emulsión asfáltica y cemento.
- Establecer el porcentaje óptimo de emulsión a utilizarse en la estabilización dependiendo de los resultados obtenidos al ensayar las diferentes proporciones de emulsión.
- Determinar espesores de las capas estabilizadas utilizando el Método AASHTO 93.
- Comparar los costos de una estabilización con emulsión asfáltica y una con cemento Portland.



### 2.3. ALCANCE

El proyecto fue realizado en la ciudad de Cartagena de Indias, capital del departamento de Bolívar, ubicado en la zona norte de Colombia, a orillas del Mar Caribe.

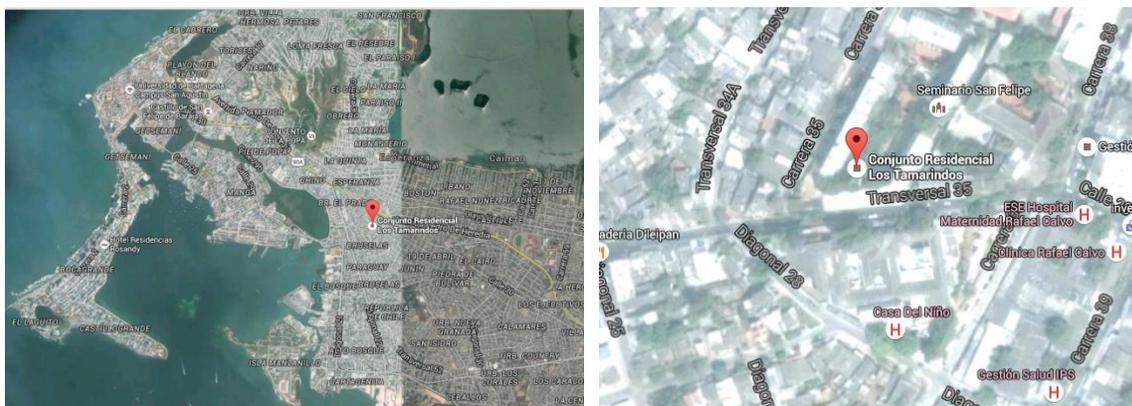
Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Geotecnia Y Materiales en la sede Piedra de Bolívar de la Universidad de Cartagena, ubicada en la Avenida del Consulado Calle 30 No. 48-152 y en el Laboratorio de Geotecnia del Ingeniero Modesto Barrios Fontalvo ubicado en el Conjunto Residencial Los Tamarindos en el Prado Carrera 35 No.29-75 en Cartagena.

*Figura 6. Universidad de Cartagena sede Piedra de Bolívar.*



*Fuente. Google Maps, 2015.*

*Figura 7. Conjunto Residencial Los Tamarindos.*



*Fuente. Google Maps, 2016.*



La investigación fue realizada en el año 2016 durante el primer semestre, comprendido entre los meses de Enero y Mayo de dicho año.

Los materiales utilizados fueron material seleccionado calcáreo (zahorra) de la cantera La Constancia ubicada en Turbaco, Bolívar. Y la Emulsión Asfáltica Catiónica de Rotura Lenta (CRL-1) suministrada por la planta La Pilarica, ubicada en el Kilómetro 19+700 en la vía de la Cordialidad antes del peaje de Bayunca. El utilizar un suelo diferente trae cambios en los resultados, pues los agentes estabilizantes tienen propiedades que hacen que varíe su efecto dependiendo de las características físicas y mecánicas del material a estabilizar. Las características de los materiales utilizados fueron verificadas con las especificaciones reglamentadas en Colombia, en la Norma INVIAS. La misma reglamentación se utilizó como guía para la realización del método de estabilización.

Debido a la falta de disponibilidad de los equipos necesarios para hacer una estabilización con emulsión en el campo, solamente se realizaron pruebas de laboratorio, que también nos permiten saber si el método estudiado es funcional y provechoso para el campo profesional.



### **3. METODOLOGÍA**

La presente investigación es de tipo experimental cuantitativa. Se analizaron dos factores, el primero es el material a estabilizar, que es un material seleccionado calcáreo (zahorra). El segundo es el agente estabilizante. Se utilizaron dos variables en este factor, los agentes son Emulsión Asfáltica de Rotura Lenta, analizada en la presente investigación y Cemento Portland, que se obtuvo de información secundaria. El Cemento Portland se utilizó como comparativo, para analizar las posibles ventajas y desventajas que trajera utilizar la Emulsión Asfáltica, pues el cemento es más utilizado para estabilizar suelos en el medio local.

Para poder plantear la metodología a utilizar en el análisis de los factores fue necesaria la recopilación de información de diferentes fuentes, esta etapa de la investigación será explicada a continuación.

Mediante la utilización de bases de datos como las de la Universidad de Cartagena, distintos medios virtuales y físicos como fuentes de información confiable para conocer los antecedentes sobre el tema tratado a nivel nacional e internacional. Utilizando las mismas fuentes se revisaron diferentes casos de estudios realizados en distintas partes del mundo para conocer posibles limitaciones o resultados encontrados en procesos parecidos.

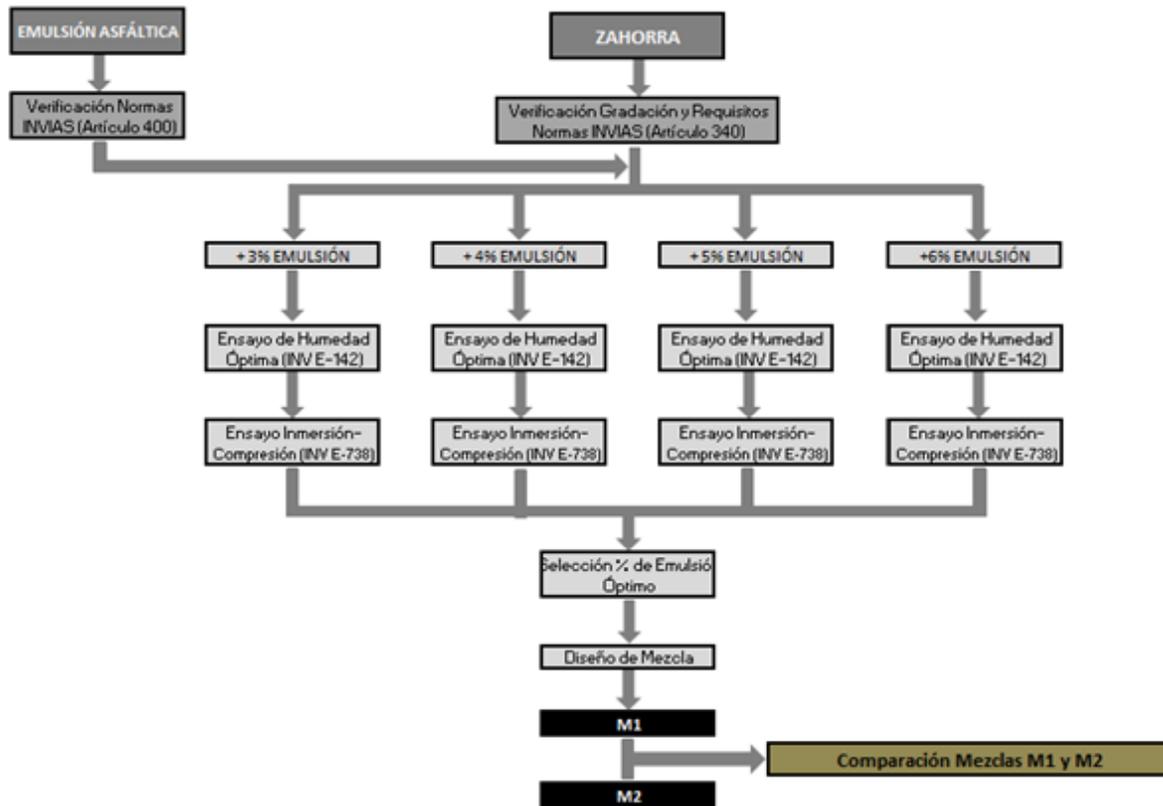
Otra etapa de este proceso fue la de realizar entrevistas con especialistas en la temática para así tener recomendaciones que fueron tenidas en cuenta durante el desarrollo de las experimentaciones con los diferentes materiales a analizar.

Lo último fue hacer la búsqueda de toda la reglamentación existente a nivel nacional sobre los procesos que se debían realizar para hacer las diferentes pruebas a los materiales tanto independientes como combinados, para así saber la calidad necesaria que requerían los materiales para la investigación y lograr determinar si los resultados alcanzados fueron positivos o no.

En el siguiente esquema se representa gráficamente lo anteriormente explicado sobre el procedimiento que se realizará.



Figura 8. Esquema del procedimiento a realizar con los estabilizantes estudiados.



Fuente. Autor, 2015.



### 3.1. ESTABILIZACIÓN CON EMULSIÓN ASFÁLTICA

Reglamentado en la Norma INVIAS Artículo 340-13 'BASE ESTABILIZADA CON EMULSIÓN ASFÁLTICA'.

#### 3.1.1. MATERIAL SELECCIONADO CALCÁREO (ZAHORRA)

El Material seleccionado a utilizar debió presentar una gradación que se ajustara a las especificaciones de la Tabla 340.1 y cumpliera con los requisitos expuestos en la Tabla 340.1 del Artículo 340-13 de la Norma INVIAS (INVIAS, Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras, 2013).

*Cuadro 6. Gradaciones de agregados para construcción de bases estabilizadas con emulsión asfáltica (Tabla 340.1).*

TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA	
NORMAL	ALTERNO	BEE-1	BEE-2
37,5 mm	1 1/2"	100	-
25 mm	1"	70 - 100	100
12,5 mm	1/2"	50 - 80	60 - 90
9,5 mm	3/8"	45 - 75	50 - 80
4,75 mm	No.4	30 - 60	30 - 60
2,36 mm	No.8	20 - 45	20 - 45
425 µm	No.40	10 - 27	10 - 27
150 µm	No.100	5 - 18	5 - 18
75 µm	No.200	3 - 15	3 - 15

*Fuente. INVIAS, Artículo 340-13 'Base Estabilizada con Emulsión Asfáltica', 2013.  
Modificado por autor.*



**Cuadro 7.** Requisitos de los agregados pétreos para la construcción de bases estabilizadas con emulsión asfáltica (Tabla 340.2).

ENSAYO		REQUISITO	NORMA DE ENSAYO INV	
<b>Dureza</b>		En seco, 500 revoluciones, % máximo	50	E - 218
		En seco, 100 revoluciones, % máximo	10	
	Desgaste de Los Ángeles (Gradación A)	Después de 48 horas de inmersión, 500 revoluciones, % máximo	70	
		Relación húmedo/seco, 500 revoluciones, máximo	2	
	Micro-Deval	Agregado grueso, % máximo	45	E - 238
	10% de finos	Valor en seco, kN mínimo	30	E - 224
	Relación húmedo/seco, % mínimo	50		
<b>Durabilidad</b>	Pérdidas en el ensayo de solidez en sulfatos,	Sulfato de sodio	12	E - 220
	% máximo	Sulfato de magnesio	18	
<b>Limpieza</b>		Límite líquido, % máximo	35	E - 125
		Índice de plasticidad, % máximo	7	E - 126
		Equivalente de arena, % mínimo	20	E - 133
		Terrones de arcilla y partículas deleznable, % máximo	2	E - 211
<b>Capacidad de soporte</b>		CBR del material sin emulsión asfáltica, % mínimo	20	E - 148

*Fuente.* INVIAS, Artículo 340-13 'Base Estabilizada con Emulsión Asfáltica', 2013. Modificado por autor.

### 3.1.2. EMULSIÓN ASFÁLTICA

Debió ser una emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta, que correspondiera a los tipos CRL-1 o CRL-1h, que cumpliera los requisitos de calidad establecidos en el Artículo 411-13 'Suministro de emulsión asfáltica'.

### 3.1.3. AGUA

El agua que se requirió para la estabilización debió ser limpia y libre de materia orgánica, álcalis y otras sustancias perjudiciales. Su pH medio de acuerdo con la norma de ensayo ASTM D-1293 debió estar entre cinco y medio y ocho (5.5 y 8.0), el contenido de sulfatos expresado como  $SO_4^-$  y determinado según norma ASTM D-516, no pudo ser mayor de un



gramo por litro (1 g/L). Si se empleó agua reconocida como potable no era necesario efectuar ensayos para la verificación de sus características.

### 3.1.4. DISEÑO DE LA MEZCLA

La humedad a utilizar fue aquella que cubriera uniforme y homogéneamente el material mineral por parte del ligante, y la humedad óptima de compactación fue la óptima del ensayo modificado de compactación sobre el material seleccionado calcáreo, reglamentado en la norma de ensayo INV E-142 del 2013.

El diseño de la mezcla se efectuó empleando el ensayo de inmersión-compresión reglamentado en la norma de ensayo INV E-738 del 2013. Se aplicó el siguiente criterio para la determinación del contenido óptimo de ligante:

Resistencia seca ----  $R_s > 15 \text{ kg/cm}^2$

Resistencia conservada ----  $R_c = R_h/R_s * 100 > 75\%$

**Cuadro 8.** Requerimientos de las mezclas con emulsión asfáltica (Tabla 340.7).

ENSAYO		REQUISITO	NORMA DE ENSAYO INV
Humedad a utilizar	Que cubra uniforme y homogéneamente el material con el ligante	-	-
Humedad óptima	Ensayo modificado de compactación sobre la zahorra	-	E - 142
Diseño de la mezcla	Inmersión-Compresión	$R_s \geq 10 \text{ Kg/cm}^2$	E - 738
		$R_h \geq 7.5 \text{ Kg/cm}^2$	
		$R_c \geq 75\%$	

**Fuente.** INVIAS, Artículo 340-13 'Base Estabilizada con Emulsión Asfáltica', 2013. Modificado por autor.

Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cartagena en la sede Piedra de Bolívar y en el Laboratorio de Geotecnia del ingeniero Modesto Barrios Fontalvo entre los meses de Enero y Mayo del año 2016.



### 3.2. COMPARACIÓN COSTOS MEZCLAS M1 Y M2

Como uno de los objetivos de la investigación es comparar los costos de la estabilización con emulsión asfáltica con la de cemento, se procedió a realizar dos diseños de pavimento, uno para cada base estabilizada. El diseño del pavimento con base estabilizada con cemento fue realizado con información secundaria en su totalidad, mientras que en el de la emulsión se utilizaron los valores de estabilidad obtenidos por el ensayo de inmersión-compresión para hallar por correlación el coeficiente estructural de la capa de base estabilizada con la emulsión.

Teniendo la mezcla M1, determinada en la presente investigación y la mezcla M2 obtenida mediante información secundaria se realizó una comparación de estas utilizando como parámetro los espesores de capas obtenidos mediante la aplicación del Método AASHTO 93 para pavimentos flexibles.

Inicialmente se determinaron los Números Estructurales (SN) aplicando la fórmula del método.

Las variables fueron tomadas de información secundaria, excepto el  $M_r$  que depende de los valores obtenidos por el ensayo de Inmersión-Compresión para el caso de la estabilización con emulsión.

Luego de obtener los Números Estructurales se determinaron los espesores de las capas:

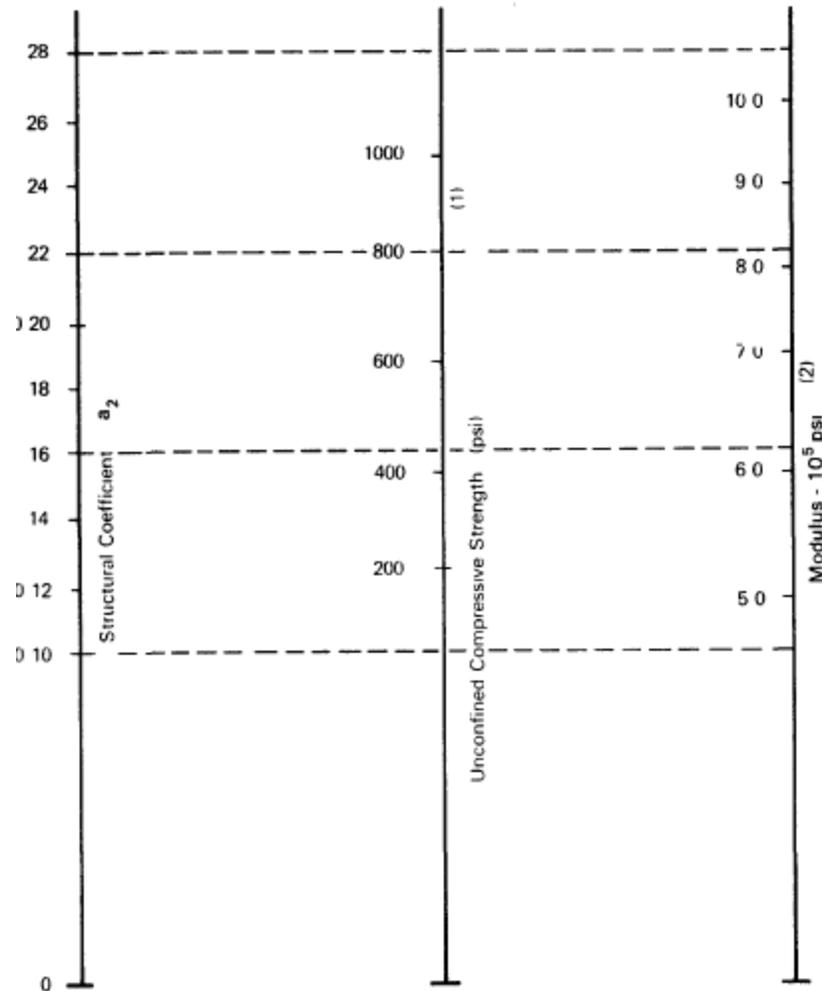
$$D_i = \frac{SN_i}{a_i}$$

Donde  $D_i$  es el espesor de la capa,  $SN_i$  es el Número Estructural y  $a_i$  es el coeficiente estructural (AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993, 1993).

El valor de  $a_i$  fue determinado mediante correlación según la teoría de la AASHTO 93.



Figura 9. Correlaciones de Coeficiente Estructural para Bases tratadas.



Fuente. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993.

Para finalizar, teniendo los espesores de las capas, se realizó una comparación de los costos según el método utilizado, para concluir si se justifica económicamente utilizar el método de estabilización con emulsión asfáltica. La comparación de costos se hace mediante el Análisis de Precios Unitarios (APU) utilizando la forma indicada por el INVIAS.



#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos sobre el material seleccionado calcáreo (zahorra) de los ensayos necesarios para comprobar que pueda ser utilizado en el proceso de estabilización con emulsión asfáltica. Y los resultados de los ensayos requeridos sobre la mezcla del material seleccionado con emulsión asfáltica, todos los anteriores reglamentados en la Norma INVIAS Artículo 340-13 'Base Estabilizada con Emulsión Asfáltica'.

##### 4.1. GRADACIÓN DEL MATERIAL SELECCIONADO CALCÁREO

Ahora se muestra el resultado de la gradación del material seleccionado.

*Cuadro 9. Granulometría del material seleccionado calcáreo (zahorra).*

GRANULOMETRÍA			
ANÁLISIS POR TAMIZADO			
FECHA: MARZO 08 DE 2016			
P1 =	<b>3400,00</b>	g	
P2 =	<b>2924</b>	g	
Tamiz No.	W Ret.	% Ret.	% Pasa
2"	0,00	0,000	100,00
1 1/2"	0,00	0,000	100,00
1"	251,03	7,383	92,62
3/4"	174,44	5,131	87,49
1/2"	546,25	16,066	71,42
3/8"	377,00	11,088	60,33
No. 4	575,25	16,919	43,41
No. 8	332,76	9,787	33,63
No. 40	279,56	8,222	25,40
No. 100	251,60	7,400	18,00
No. 200	135,80	3,994	14,01
FINOS	476,31	14,01	

*Fuente. Laboratorio de Geotecnia Y Materiales de La Universidad de Cartagena, 2016.*

*Modificado por autor.*



De los resultados de esta prueba se comprobó que el material seleccionado se ajusta una gradación que se ajuste a las especificaciones de la Tabla 340.1 del Artículo 340-13 de la Norma INVIAS (*Cuadro 6*), cumpliendo con una gradación tipo BEE-1.

## 4.2. ENSAYOS AL MATERIAL SELECCIONADO CALCÁREO

Se presentan los resultados de los requisitos del material seleccionado en los ensayos de Dureza, Durabilidad, Limpieza y Capacidad de Soporte.

### 4.2.1. DUREZA

#### 4.2.1.1. Desgaste de Los Ángeles

*Cuadro 10. Ensayo de Desgaste de Los Ángeles del material seleccionado calcáreo (zahorra).*

ENSAYO DE DESGASTE EN LA MÁQUINA DE "LOS ÁNGELES"								
FECHA: ABRIL 04 DE 2016								
PASA TAMIZ No.	RETENIDO SOBRE TAMIZ No.	500 REVOLUCIONES				1000 REVOLUCIONES		
		A	B	C	D	E	F	G
3"	2 1/2"					2500		
2 1/2"	2 "					2500		
2 "	1 1/2"					5000	5000	
1 1/2"	1 "	1250					5000	5000
1 "	3/4"	1250						5000
3/4"	1/2"	1250	2500					
1/2"	3/8"	1250	2500					
3/8"	No. 3			2500				
No. 3	No. 4			2500				
No. 4	No. 8				5000			
No. De Esferas :		12	11	8	6	12	12	12
Peso Inicial	10000 g							
Peso Final	5103,3 g							
% De Desgaste	48,97%							

*Fuente. Laboratorio de Geotecnia Y Materiales de La Universidad de Cartagena, 2016. Modificado por autor.*



Con el ensayo de Desgaste de Los Ángeles comprobamos que el material seleccionado cumple el requisito de porcentaje máximo estipulado en la Tabla 340.1 del Artículo 340-13 del INVIAS (Cuadro 6), obteniendo un porcentaje de desgaste de 48,97% y el máximo estipulado en la Norma es de 50%.

#### 4.2.2. DURABILIDAD

##### 4.2.2.1. Ensayo de solidez en sulfatos

*Cuadro 11. Ensayo de solidez a los sulfatos del material seleccionado calcáreo (zahorra).*

ENSAYO DE SOLIDEZ EN SULFATOS								
TIPO: SULFATO DE MAGNESIO								
FECHA: ABRIL 11 DE 2016								
FRACCIÓN		GRADACIÓN ORIGINAL % RETENIDO	PESO FRACCIÓN ANTES DEL ENSAYO (g)	Nº PARTÍCULAS ANTES DEL ENSAYO	PESO RETENIDO DESPUÉS DEL ENSAYO (g)	PORCENTAJE DE PÉRDIDA TOTAL	PORCENTAJE DE PÉRDIDA CORREGIDA	Nº PARTÍCULAS EN BUEN ESTADO DESPUÉS DEL ENSAYO
PASA	RETENIDO	1	2	3	4	5	6	7
1 1/2	1"	3,7	1500	48,0	1046,0	<b>30,27</b>	<b>1,12</b>	24
1"	3/4"	5,1	670	47,0	524,0	<b>21,79</b>	<b>1,11</b>	18
3/4	1/2"	16,0	500	92,0	371,5	<b>25,70</b>	<b>4,11</b>	45
1/2"	3/8"	11,0	330	174,0	229,8	<b>30,36</b>	<b>3,34</b>	69
<b>TOTALES:</b>		35,80	3000,0		2171,3	<b>108,12</b>	<b>9,683</b>	
NOTA: SOLO SE CUENTAN LAS PARTICULAS (COLUMNA 3 Y 7) PARA TAMAÑOS MAYORES DE 3/4".								
<b>PORCENTAJE DE PÉRDIDA : 9,683</b>								

*Fuente. Laboratorio de Geotecnia Y Materiales de La Universidad de Cartagena, 2016. Modificado por autor.*

Del ensayo de Pérdidas en el ensayo de solidez en sulfatos de magnesio comprobamos que la 'zahorra' utilizada también cumple este requisito expuesto en la misma Tabla 340.1 (Cuadro 6), pues el resultado obtenido fue de 9,683% y el porcentaje máximo según la Norma es del 18%.



#### 4.2.3. LIMPIEZA

##### 4.2.3.1. Límite líquido, Índice de plasticidad y clasificación del agregado

*Cuadro 12. Límite líquido, Índice de Plasticidad y clasificación del material seleccionado calcáreo (zahorra).*

<b>LÍMITE LÍQUIDO</b>			
<b>No. Golpes</b>	44	34	19
<b>Recipiente #</b>	12	6	34
<b>Peso Rec. + Suelo Húmedo</b>	31,28	30,30	25,98
<b>Peso Rec. + Suelo Seco</b>	27,84	26,31	23,08
<b>Peso del Recipiente</b>	11,58	8,97	10,84
<b>Peso Agua</b>	3,44	3,99	2,90
<b>Peso Material Seco</b>	16,26	17,34	12,24
<b>% Humedad</b>	21,16	23,01	23,69
<b>L.L.</b>	<b>22,85</b>	<b>23,98</b>	<b>22,88</b>
<b>LÍMITE PLÁSTICO</b>			
<b>Recipiente #</b>	14	36	28
<b>Peso Rec. + Suelo Húmedo</b>	12,48	11,81	14,95
<b>Peso Rec. + Suelo Seco</b>	12,07	11,40	14,40
<b>Peso del Recipiente</b>	9,59	9,15	10,80
<b>Peso Agua</b>	0,41	0,41	0,55
<b>Peso Material Seco</b>	2,48	2,25	3,60
<b>% Humedad</b>	16,53	18,22	15,28
<b>L.P.</b>	<b>16,68</b>		
<b>CLASIFICACIÓN</b>			
<b>Límite Líquido</b>	<b>23,24</b>	<b>Índice de Grupo</b>	<b>3</b>
<b>Límite Plástico</b>	<b>16,68</b>	<b>A.A.S.H.T.O.</b>	<b>A-1-b</b>
<b>Índice Plasticidad</b>	<b>6,56</b>	<b>U.S.C.S.</b>	<b>GC-GM</b>

*Fuente. Laboratorio de Geotecnia Y Materiales de La Universidad de Cartagena, 2016.  
Modificado por autor.*

De los ensayos de Límite líquido y Límite plástico se obtuvieron varios resultados muy importantes para la investigación, el primero es que el material seleccionado según sus límites y gradación es un suelo tipo GC-GM en la clasificación del Sistema Unificado de



Clasificación de Suelos (U.S.C.S.) y como se mostró en el 'Cuadro 1' los suelos de esta clasificación tienen como mejor estabilizante el asfalto, mientras que tengan un Índice de Plasticidad inferior al 10%. El otro resultado favorable de estos ensayos es que el material cumple lo expuesto en la Norma INVIAS, obteniendo un Límite líquido de 23,24% y cuyo requisito es de máximo 35%. Y un Índice de plasticidad de 6,56% y la Norma estipula un máximo de 7%, además cumple con el valor inferior al 10% para la clasificación de la U.S.C.S. demostrando que la emulsión asfáltica es la indicada para estabilizar el material seleccionado calcáreo utilizado.

#### 4.2.3.2. Equivalente de arena

*Cuadro 13. Ensayo de equivalente de arena del material seleccionado calcáreo (zahorra).*

<b>ENSAYOS DE EQUIVALENTE DE ARENA</b>			
FECHA: ABRIL08 DE 2016			
<b>Ensayo No.</b>	1	2	3
<b>Lectura De Arena</b>	6,0	5,9	6,0
<b>Lectura De Arcilla</b>	18,7	18,4	18,9
<b>Equivalente De Arena</b>	32,0%	31,5%	31,7%
<b>Equivalente Promedio</b>	<b>31,7%</b>		

*Fuente. Laboratorio de Geotecnia Y Materiales de La Universidad de Cartagena, 2016.  
Modificado por autor.*

El ensayo de Equivalente de arena termina de comprobar que el material utilizado cumple todos los requisitos de las pruebas de Limpieza indicadas en el Artículo 340-13 de la Norma INVIAS, teniendo como resultado un porcentaje de equivalente del 31,7% y el requisito es un porcentaje mínimo de 20%.



#### 4.2.4. CAPACIDAD DE SOPORTE

##### 4.2.4.1. CBR del material sin emulsión asfáltica

*Cuadro 14. Ensayo Proctor en el material seleccionado.*

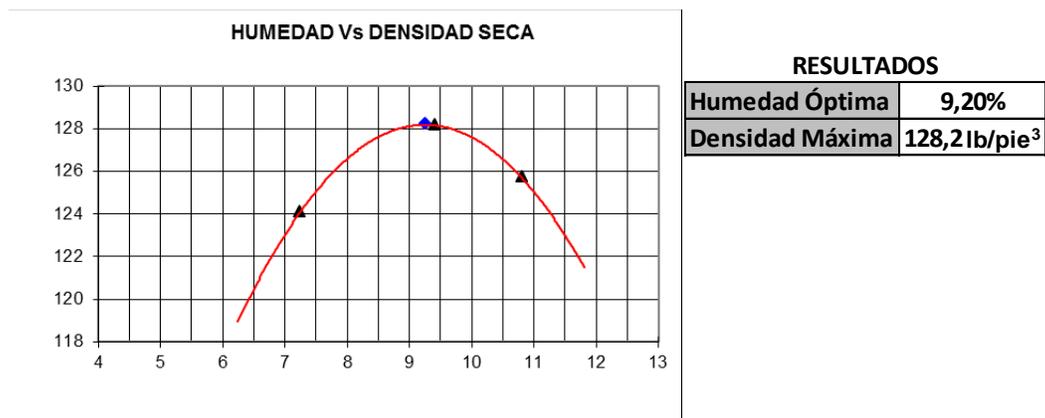
<b>FECHA: ABRIL 01 DE 2016</b>					
<b>Golpes/Capa</b>	25/5	<b>W. Martillo (lb)</b>	10		
<b>No. Capas</b>	5	<b>Diámetro (pulg)</b>	4	<b>Altura Cil. (pulg)</b>	4,58
<b>Volumen (cm<sup>3</sup>)</b>	944,00				
<b>DENSIDAD</b>					
<b>No. Ensayo</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
<b>Molde No.</b>					
<b>Peso Suelo Compactado + Molde (g)</b>		3.740,00	3.848,30	3.834,30	
<b>Peso Molde (g)</b>		1.728,10	1.728,10	1.728,10	
<b>Peso Suelo Compactado (g)</b>		2.011,90	2.120,20	2.106,20	
<b>Densidad Suelo Húmedo (g/cm<sup>3</sup>)</b>		2,13	2,25	2,23	
<b>Densidad Suelo Seco (g/cm<sup>3</sup>)</b>		1,99	2,05	2,01	
<b>Densidad Suelo Seco (lb/pie<sup>3</sup>)</b>		<b>124,07</b>	<b>128,15</b>	<b>125,71</b>	
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD</b>					
<b>No. Ensayo</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
<b>Recipiente No.</b>					
<b>Peso Suelo Húmedo (g)</b>		200,00	200,00	200,00	
<b>Peso Suelo Seco (g)</b>		186,50	182,80	180,50	
<b>Peso Agua (g)</b>		13,50			
<b>Contenido de Humedad (%)</b>		<b>7,24</b>	<b>9,41</b>	<b>10,80</b>	

*Fuente. Laboratorio de Geotecnia Y Materiales de La Universidad de Cartagena, 2016.  
Modificado por autor.*



De este resultado podemos ver los contenidos de humedad y las densidades secas a graficar para obtener la humedad óptima y la densidad máxima, como se muestra en la *Gráfica 1*. Esta humedad es la óptima también en el diseño de la mezcla de emulsión y material seleccionado, como lo estipula la Norma INVIAS.

*Gráfica 1. Curva Humedad VS Densidad Seca.*



**Fuente.** Laboratorio de Geotecnia Y Materiales de La Universidad de Cartagena, 2016.  
*Modificado por autor.*



**Cuadro 15. Prueba Compactación en el ensayo de CBR.**

<b>FECHA: ABRIL 01 DE 2016</b>					
<b>Golpes/Capa</b>	56-26-12	<b>W. Martillo (lb)</b>	10		
<b>No. Capas</b>	5	<b>Diámetro (pulg)</b>	6	<b>Altura Cil. (pulg)</b>	5,00
<b>Volumen (cm<sup>3</sup>)</b>	2316,7				
<b>DENSIDAD</b>					
<b>No. Ensayo</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
<b>Molde No.</b>		-	7	3	
<b>Peso Suelo Compactado + Molde (g)</b>		9.387,00	8.825,00	8.853,00	
<b>Peso Molde (g)</b>		4.185,00	3.734,00	4.277,00	
<b>Peso Suelo Compactado (g)</b>		5.202,00	5.091,00	4.576,00	
<b>Densidad Suelo Húmedo (g/cm<sup>3</sup>)</b>		4.763,74	4.662,09	4.190,48	
<b>Densidad Suelo Seco (g/cm<sup>3</sup>)</b>		2,06	2,01	1,81	
<b>Densidad Suelo Seco (lb/pie<sup>3</sup>)</b>		<b>128,37</b>	<b>125,63</b>	<b>112,92</b>	
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD</b>					
<b>No. Ensayo</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
<b>Recipiente No.</b>					
<b>Peso Suelo Húmedo (g)</b>					
<b>Peso Suelo Seco (g)</b>					
<b>Peso Agua (g)</b>					
<b>Contenido de Humedad (%)</b>		<b>9,20</b>	<b>9,20</b>	<b>9,20</b>	

**Fuente.** Laboratorio de Geotecnia Y Materiales de La Universidad de Cartagena, 2016.

*Modificado por autor.*



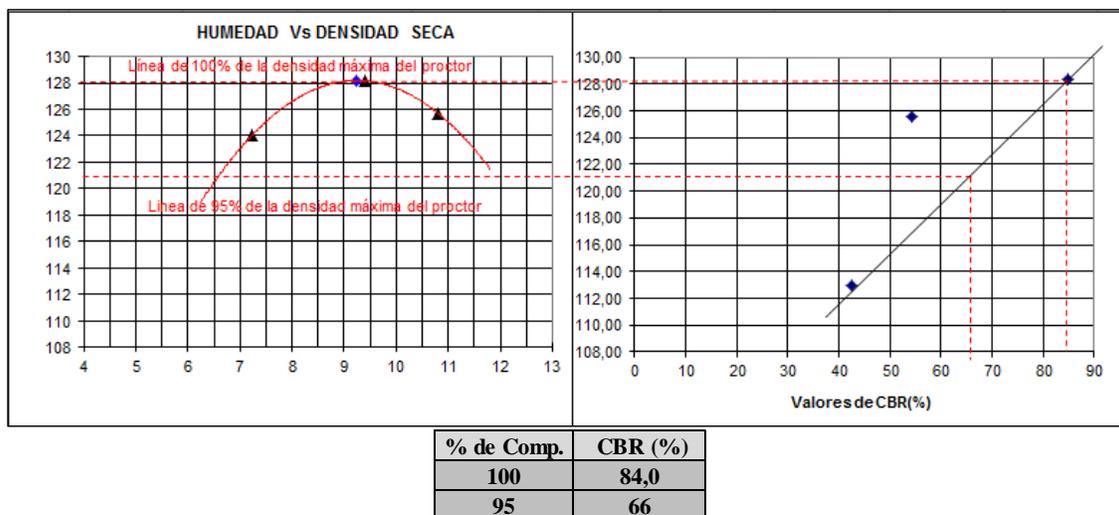
**Cuadro 16.** Resultado penetraciones ensayo CBR.

PENETRACIÓN										
		55			26			12		
Molde No.		7			17			1		
Tiempo	Penetración	Letura	Carga Lbs	C.B.R.	letura	Carga	C.B.R.	Lectura	Carga	C.B.R.
0	0	0		0	0		0		0	0
30 seg.	0.025 "	53	399,59		69	492,87		48	370,44	
1 min.	0.050"	151	970,93		109	726,07		118	778,54	
1 ½ min.	0.075"	224	1396,52		176	1116,68		154	988,42	
2 min.	0.100"	341	2078,63	67,27	247	1530,61	49,53	205	1285,75	41,61
3 min.	0.150"	546	3273,78		283	1740,49		254	1571,42	
4 min.	0.200"	659	3932,57	84,85	416	2515,88	54,28	323	1973,69	42,58
6 min.	0.300"	779	4632,17		688	4101,64		581	3477,83	
8 min.	0.400"	983	5821,49		912	5407,56		668	3985,04	
10 min.	0.500"	1185	6999,15		1163	6870,89		875	5191,85	

**Fuente.** Laboratorio de Geotecnia Y Materiales de La Universidad de Cartagena, 2016.  
Modificado por autor.

Relacionando la curva de *Humedad VS Densidad Seca* con los valores de C.B.R. obtenidos en el ensayo de penetración (*Cuadro 16*), se calculan los porcentajes de C.B.R. al 100% y al 95% de compactación. Como se muestra en la *Gráfica 2*.

**Gráfica 2.** Relación para obtener valores de C.B.R. al 100% y 95% de compactación.



**Fuente.** Laboratorio de Geotecnia Y Materiales de La Universidad de Cartagena, 2016.  
Modificado por autor.



Con los resultados de C.B.R. obtenidos se comprueba que el material seleccionado cumple el requisito de Capacidad de soporte estipulado en la Norma INVIAS para estabilizaciones con emulsión asfáltica, pues el material sin emulsión debe cumplir con un C.B.R. mínimo del 20%, y los resultados obtenidos fueron muy superiores a este requerimiento, mostrando así la gran calidad de la 'zahorra' utilizada.

#### 4.3. COMPARACIÓN RESULTADOS OBTENIDOS CONTRA REQUISITOS INVIAS.

##### 4.3.1. GRADACIÓN DE LOS AGREGADOS PARA BASES ESTABILIZADAS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA.

*Cuadro 17. Resumen cumplimiento de la gradación estipulada en la Norma INVIAS, del material seleccionado calcáreo utilizado.*

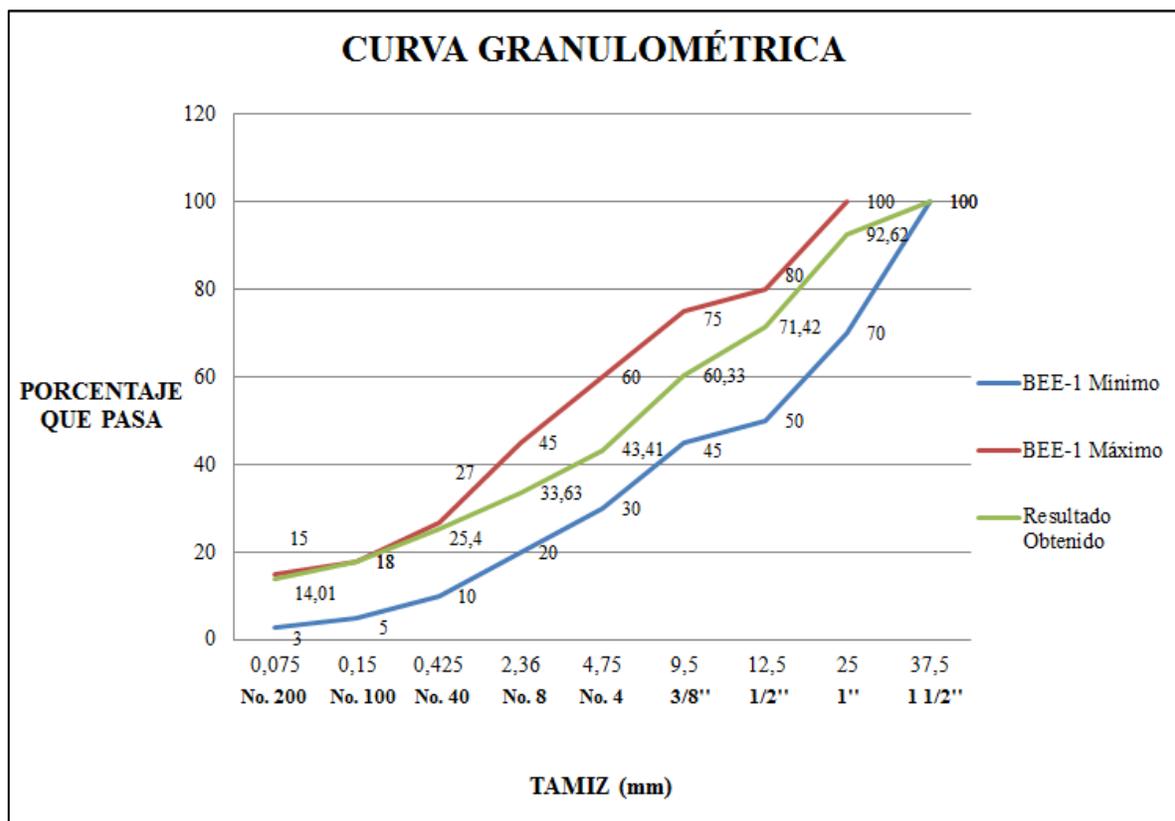
GRANULOMETRÍA				
REQUISITO NORMA INVIAS (ART. 340-13)		RESULTADO OBTENIDO	CUMPLE	
TAMIZ	% QUE PASA	% QUE PASA	SI	NO
ALTERNO	BEE-1		SI	NO
1 1/2"	100	100	X	
1"	70 - 100	92,62	X	
1/2"	50 - 80	71,42	X	
3/8"	45 - 75	60,33	X	
No.4	30 - 60	43,41	X	
No.8	20 - 45	33,63	X	
No.40	10 - 27	25,40	X	
No.100	5 - 18	18	X	
No.200	3 - 15	14,01	X	

*Fuente. Laboratorio de Geotecnia Y Materiales de La Universidad de Cartagena, 2016.  
Modificado por autor.*



Los resultados obtenidos en la gradación se representan gráficamente en la siguiente curva granulométrica, que nos permite demostrar que los porcentajes que pasan en cada tamiz establecido en la norma, cumplen con el rango de la gradación BEE-1 de la tabla 340.1 del Artículo 340-13 de la Norma INVIAS (Cuadro 6).

**Gráfica 3.** Curva Granulométrica para comprobar que los resultados obtenidos cumplen el rango de la gradación BEE-1.



*Fuente. Autor, 2016.*



#### 4.3.2. REQUISITOS DE LOS AGREGADOS PÉTREOS PARA BASES ESTABILIZADAS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA.

*Cuadro 18. Resumen cumplimiento los requisitos de Dureza, Durabilidad, Limpieza y Capacidad de soporte estipulados en la Norma INVIAS, del material seleccionado calcáreo utilizado.*

REQUISITOS DE LOS AGREGADOS						
ENSAYO			REQUISITO	RESULTADO OBTENIDO	CUMPLE	
					SI	NO
DUREZA	Desgaste de Los Ángeles (% máximo)	En seco 500 revoluciones	50	48,97	X	
		Sulfato de Magnesio	18	9,683	X	
LIMPIEZA	Límite líquido (% máximo)		35	23,24	X	
	Índice de plasticidad (% máximo)		7	6,56	X	
	Equivalente de arena (% mínimo)		20	31,70	X	
CAPACIDAD DE SOPORTE	CBR del material sin emulsión asfáltica (% mínimo)		20	66,00	X	

*Fuente. Laboratorio de Geotecnia Y Materiales de La Universidad de Cartagena, 2016. Modificado por autor.*

Como se puede ver resumido en los cuadros anteriores, el material seleccionado cumple completamente los requisitos expuestos en el Artículo 340-13 para poder ser utilizado como agregado para estabilizar con emulsión asfáltica.



#### **4.4. ENSAYO DE INMERSIÓN-COMPRESIÓN.**

Se fabricaron 6 briquetas de Material Seleccionado y Emulsión para cada porcentaje de emulsión a utilizar. Los porcentajes de emulsión utilizados fueron 3%, 4%, 5% y 6%. Lo que significa, que se moldearon 24 briquetas.

La humedad utilizada fue la óptima obtenida en el ensayo de CBR del material sin emulsión, el valor obtenido fue de 9,20% de humedad.

Cada briqueta tiene un diámetro y una altura de 4", y la granulometría utilizada para cada una es la señalada en la Norma INVIAS, la cual es cumplida por el material seleccionado que se utilizó en las briquetas.

Cada grupo de 6 briquetas se divide en dos grupos de 3. Un grupo fue curado en seco y el otro curado en agua durante 24 horas.

Luego se procedió a ensayar las briquetas mediante compresión simple, y así se determinaron las resistencias tanto seca (Rs) como húmeda (Rh) de cada una. Se promedian las resistencias para cada porcentaje de emulsión. Teniendo estas dos resistencias se utiliza la fórmula de la Resistencia Conservada estipulada por el INVIAS.

$$R_c = R_h/R_s * 100$$

En el siguiente cuadro se ven los resultados de resistencia obtenidos para cada briqueta, agrupados según porcentaje de emulsión y tipo de curado (seco o en agua).



**Cuadro 19. Resultados ensayo Inmersión-Compresión.**

FECHA: JUNIO 3 DE 2016							
BRIQUETA N°	GRUPO	% EMULSIÓN	HUMEDAD	Rs (Kg/cm <sup>2</sup> )	Rh (Kg/cm <sup>2</sup> )	PROMEDIO	Rc (Kg/cm <sup>2</sup> )
1	CURADAS EN SECO	3%	9,20%	18,23		17,84	86,10
2				17,85			
3				17,43			
4	CURADAS EN AGUA				15,64	15,36	
5					15,46		
6					14,97		
7	CURADAS EN SECO	4%	9,20%	22,73		22,77	93,31
8				23,12			
9				22,47			
10	CURADAS EN AGUA				21,32	21,25	
11					20,87		
12					21,56		
13	CURADAS EN SECO	5%	9,20%	23,18		24,35	91,22
14				24,12			
15				25,74			
16	CURADAS EN AGUA				22,75	22,21	
17					21,23		
18					22,65		
19	CURADAS EN SECO	6%	9,20%	17,81		17,58	88,72
20				17,57			
21				17,35			
22	CURADAS EN AGUA				15,64	15,59	
23					15,82		
24					15,32		

**Fuente.** Laboratorio del Ingeniero Modesto Barrios Fontalvo, Modificado por autor, 2016.

Del cuadro anterior se comprobó que todas las briquetas cumplieron los requisitos estipulados en la Norma INVIAS, esta dice que la Resistencia Seca debe ser mayor a 10Kg/cm<sup>2</sup>, la Resistencia Húmeda mayor a 7,5 Kg/cm<sup>2</sup> y la Resistencia Conservada mayor al 75%, y todos estos valores son superados en los resultados obtenidos.



#### 4.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE INMERSIÓN-COMPRESIÓN.

El primer análisis que se hizo sobre los resultados del ensayo de inmersión-compresión es el de comparar los resultados de resistencia para cada porcentaje de emulsión.

En el siguiente cuadro se ven los resultados de Resistencia Seca y Resistencia Húmeda para cada porcentaje de Emulsión.

*Cuadro 20. Resultados de Resistencia Seca y Resistencia Húmeda para cada porcentaje de Emulsión.*

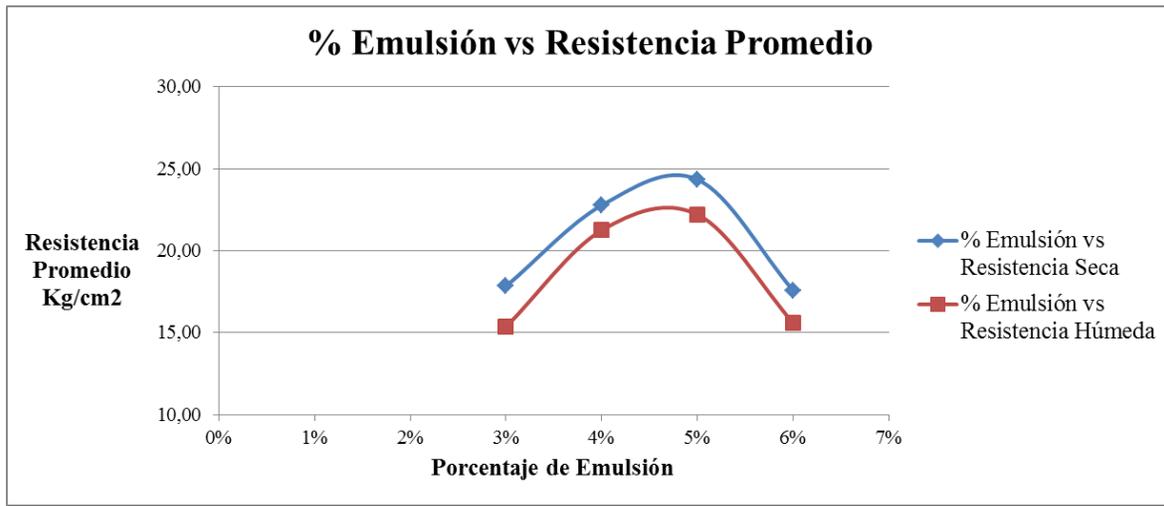
<b>% EMULSIÓN</b>	<b>Rs (Kg/cm<sup>2</sup>) Promedio</b>	<b>Rh (Kg/cm<sup>2</sup>) Promedio</b>
3%	17,84	15,36
4%	22,77	21,25
5%	24,35	22,21
6%	17,58	15,59

*Fuente. Autor, 2016.*

Teniendo estos valores, se realizó una gráfica para ver el comportamiento de las briquetas curadas en seco y las curadas en agua.



**Gráfica 4.** Curvas de Porcentaje de Emulsión vs Resistencias Promedio.



*Fuente.* Autor, 2016.

De esta gráfica se concluye que la resistencia húmeda para cada porcentaje de emulsión es ligeramente menor al valor de resistencia seca, lo cual demuestra que el agua tiene un efecto negativo en el comportamiento de la mezcla, pero este efecto no es lo suficientemente fuerte como para comprometer el funcionamiento del material para una capa de pavimento, puesto que el menor valor de resistencia fue de 15,36 Kg/cm<sup>2</sup> y la norma exige un valor mínimo de 7,5 Kg/cm<sup>2</sup> para resistencia húmeda y 10 Kg/cm<sup>2</sup> para resistencia seca, con lo cual se demuestra que el material en condición húmeda supera el mínimo establecido hasta para briquetas en estado seco, un resultado muy positivo en la investigación.

Además al comparar los resultados de resistencia obtenidos con los de investigaciones pasadas, se puede ver que la tendencia al aumentar el porcentaje de emulsión es parecido, obteniéndose una especie de parábola que demuestra que no necesariamente a mayor porcentaje de emulsión se consiguen mayores resistencias. En la siguiente curva perteneciente a una investigación se puede ver la tendencia referida.



Gráfica 5. Resistencia del Suelo Sebka incorporándole emulsión asfáltica.

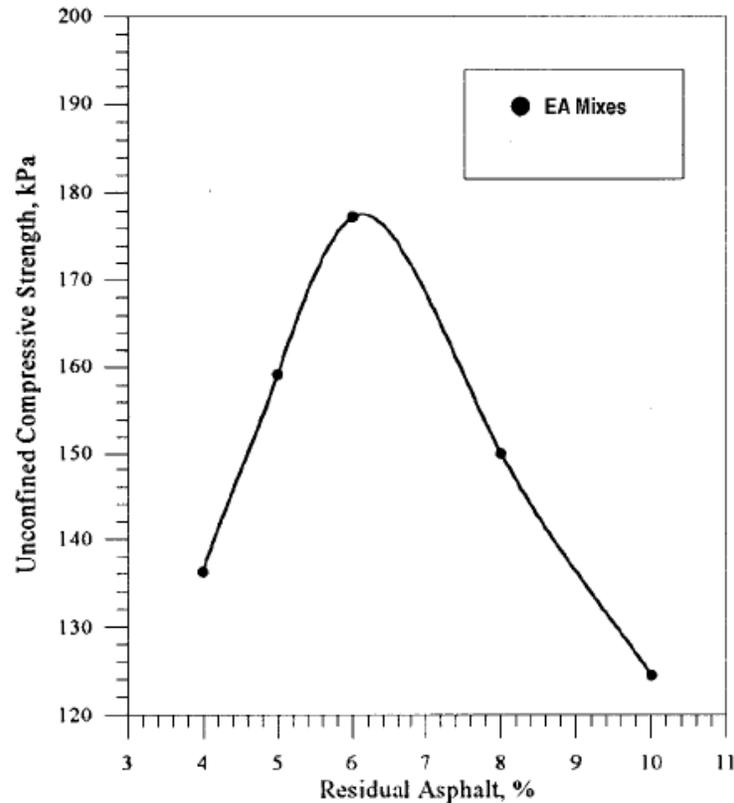


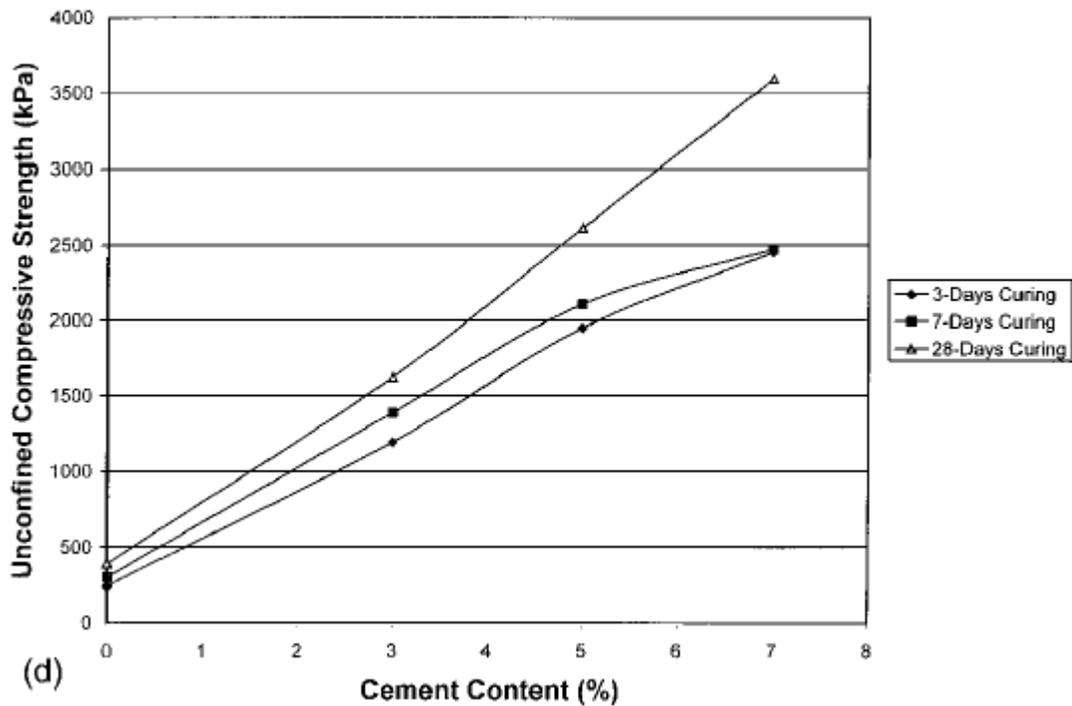
FIG. 10. UCS of Sebka Soil Incorporating EA

**Fuente.** Mohamed Asi, I. 'Stabilization of Sebka Soil Using Foamed Asphalt'. *Journal of Materials in Civil Engineering* (Septiembre-Octubre de 2001), FIG 10 página 330.

En otra investigación se muestra la diferencia que existe en el comportamiento de la resistencia a la compresión entre un suelo estabilizado con emulsión asfáltica y otro con cemento, ya que a diferencia de las tendencias mostradas en las anteriores gráficas, al utilizar cemento se obtienen mayores resistencias a medida que se aumenta el porcentaje de cemento aplicado. En la siguiente gráfica se puede ver el comportamiento de la resistencia de un suelo estabilizado con cemento.



Gráfica 6. Resistencia del Suelo incorporándole cemento.



**Fuente.** Taha, R., Al-Harthy, A., Al-Shamsi, K., & Al-Zubeidi, M. 'Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases'. *Journal of Materials in Civil Engineering* (Mayo-Junio de 2002). Fig. 3 página 243.

Claramente se nota una tendencia muy diferente a las dos anteriores, en esta gráfica se ve un claro aumento a medida que se le incorpora más porcentaje de cemento al suelo, mientras que con la emulsión asfáltica existe un punto en el cual la resistencia comienza a disminuir a medida que se aumenta el porcentaje de emulsión utilizado.



#### 4.5.1. DETERMINACIÓN PORCENTAJE ÓPTIMO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA.

La Norma INVIAS, en el Artículo 340 establece que el porcentaje óptimo de ligante residual será aquel que, cumpliendo las exigencias indicadas, permita alcanzar el valor máximo de resistencia tras curado húmedo (Resistencia Conservada).

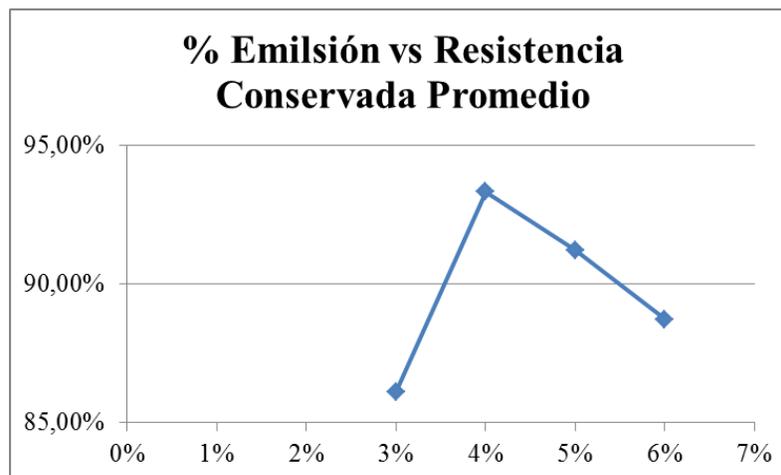
Para determinar este porcentaje se realizó una gráfica del comportamiento de la Resistencia Conservada para cada porcentaje de emulsión.

*Cuadro 21. Resistencias Conservadas Promedio para cada porcentaje de Emulsión.*

% EMULSIÓN	Rc Promedio
3%	86,10%
4%	93,31%
5%	91,22%
6%	88,72%

*Fuente. Autor, 2016.*

*Gráfica 7. Porcentaje de Emulsión vs Resistencia Conservada Promedio.*



*Fuente. Autor, 2016.*

De la gráfica anterior se concluye que el porcentaje de emulsión que permite alcanzar el máximo valor de resistencia conservada es el de 4%. Se establece que el porcentaje óptimo de emulsión a utilizarse en la estabilización es de 4%.



#### **4.6. COMPARACIÓN DE COSTOS ESTABILIZACIÓN CON EMULSIÓN ASFÁLTICA Y CON CEMENTO PORTLAND.**

A continuación se mostrarán todos los pasos que se realizaron para hacer una comparación de costos entre los dos métodos de estabilización estudiados.

##### **4.6.1. DETERMINACIÓN COEFICIENTES ESTRUCTURALES ( $a_i$ ) PARA CADA MÉTODO DE ESTABILIZACIÓN.**

Inicialmente se indican los valores de resistencia de cada método de estabilización para la obtención del coeficiente estructural, mediante la correlación AASHTO 93.

El valor típico de resistencia para una estabilización con Cemento Portland es de 450 PSI según la Norma INVIAS (Sánchez Sabogal, Materiales para Base y Subbase, 2005).

El resultado de resistencia a utilizar de nuestra estabilización con emulsión asfáltica es la promedio obtenida con el porcentaje óptimo de ligante (4%), promediando la resistencia seca y húmeda.

$$R_s = 22,77 \text{ Kg/cm}^2$$

$$R_h = 21,25 \text{ Kg/cm}^2$$

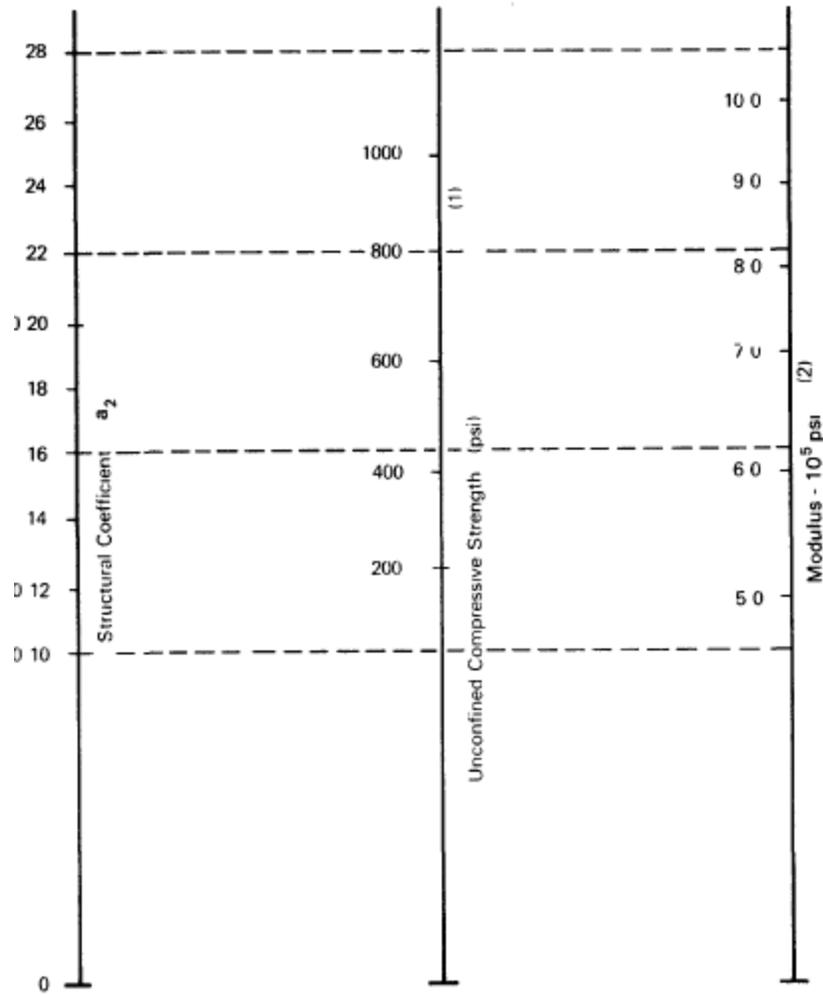
$$\text{Resistencia Promedio} = 22,01 \text{ Kg/cm}^2$$

Esta Resistencia se convierte a PSI, obteniendo una resistencia para la estabilización con emulsión de 313,06 PSI.

Utilizando la siguiente figura se hallan por correlación los coeficientes estructurales.



**Figura 10.** Correlaciones de Coeficiente Estructural Módulo y Resistencia para Bases tratadas.



**Fuente.** AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993.

El coeficiente estructural para la capa tratada con Cemento es de  $a_{2,2}=0,16$ . Y para la capa tratada con Emulsión Asfáltica es de  $a_{2,1}=0,14$ .



#### 4.6.2. DETERMINACIÓN NÚMEROS ESTRUCTURALES (SN<sub>i</sub>).

Las variables fueron tomadas de información secundaria, excepto el Mr que depende de los valores de resistencia para cada método.

##### 4.6.2.1. Generalidades.

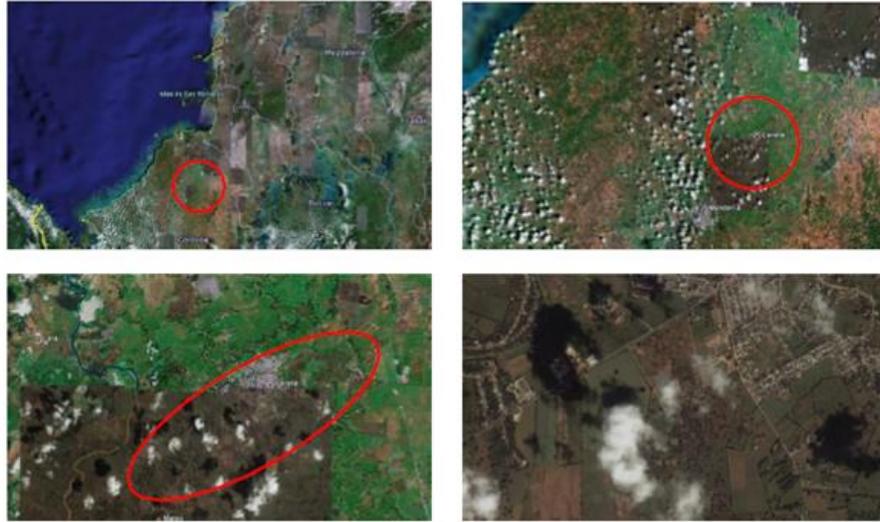
El diseño del pavimento será para la Variante Cereté con las siguientes especificaciones de diseño:

- **Velocidad de Diseño:** 80 km/h.
- **Radio Mínimo:** 235 m.
- **Peralte Máximo:** 8%
- **Fricción lateral máxima:** 0.141
- **%Inclinación Máxima Peraltes:** 0.50%
- Vía Principal de una Calzada.
- **Tipo de Terreno:** Plano
- **Acho de cada calzada:** 7.30 m.
- **Carriles por calzada:** dos (2).
- **Acho de cada carril:** 3.65 m.
- **Ancho de berma interna:** 0.30 m.
- **Ancho de berma externa:** 1.80 m.

Cereté es un municipio de Córdoba ubicado a 18 Km de Montería, con una población de 84.000 habitantes.



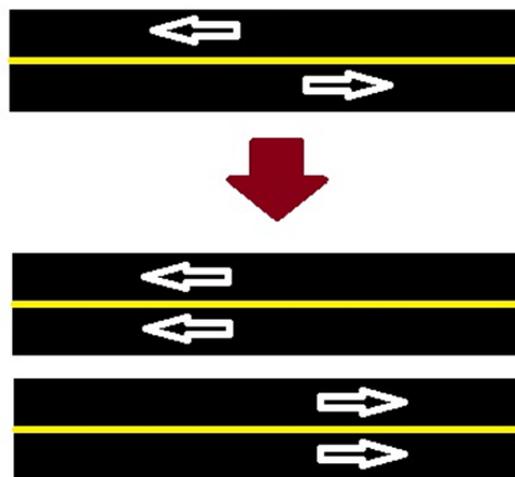
**Figura 11.** Ubicación Cereté.



**Fuente.** INGUETO CIA & LTDA, 2008.

El proyecto consiste en una variante paralela a la vía existente entre Cereté y Montería. Pasando de tener una vía bidireccional de dos carriles (vía existente), a tener dos vías de dos carriles, una con sentido oriente-occidente o Cereté-Montería (vía existente) y otra de sentido occidente-oriente o Montería-Cereté (Variante Cereté).

**Figura 12.** Modificación vía debido al proyecto.



**Fuente.** Autor, 2015.



#### **4.6.2.2. Variable Tránsito.**

Dentro del comportamiento de un pavimento incide inmensamente el tránsito que circula por este, por esto es de mucha importancia considerar el tránsito como una de las variables en el diseño de pavimentos. Es necesario conocer todo el tránsito que circulará durante la vida útil del pavimento, para esto se proyecta a futuro su comportamiento y composición tanto a 10 años como a 20 años. Existen diferentes tipos de vehículos en el mercado, pero los que generan un daño considerable para el pavimento son solo los buses y los camiones, entonces solo estos serán tenidos en cuenta dentro del diseño. Para facilitar el estudio del impacto de los vehículos sobre el pavimento se realiza una equivalencia entre todo el daño que le generan los vehículos comerciales a la vía con un eje patrón, este eje en el método de la AASHTO es el de 8.2 Toneladas.

##### **4.6.2.2.1. Proyección del Tránsito.**

Lo primero que se necesita es un registro histórico sobre los TPDS de la estación, en este caso se cuenta con datos desde 1997 hasta el 2011. Dentro del registro se encontraban datos que no representaban la tendencia que llevaba el registro, estos datos eran casos particulares que no fueron tomados en cuenta. Estos datos fueron promediados para mantener una tendencia más acorde.



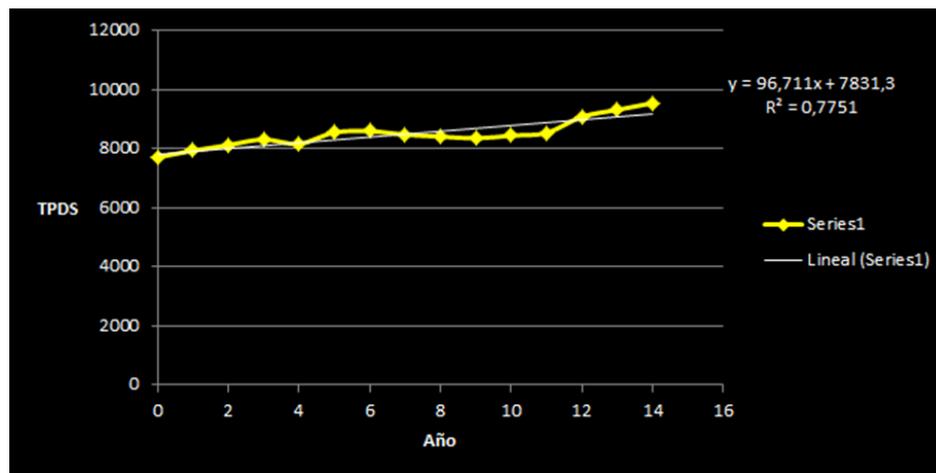
**Cuadro 22.** Serie Histórica 1997 a 2011.

No	Año	TPDS
0	1997	7714
1	1998	7941
2	1999	8129
3	2000	8317
4	2001	8169
5	2002	8556
6	2003	8599
7	2004	8478
8	2005	8417
9	2006	8357
10	2007	8448
11	2008	8540
12	2009	9087
13	2010	9320
14	2011	9552

**Fuente.** Autor, 2015.

Luego se graficó el comportamiento del tránsito en el desarrollo histórico. Y para poder hacer una proyección a futuro de dicho comportamiento se escoge una tendencia, en este caso se escogió la tendencia lineal, puesto que tuvo un coeficiente de correlación de 0,7751 el cual demuestra que esta tendencia se ajusta de buena manera a la serie histórica.

**Gráfica 8.** TDPS vs Año. Comportamiento Histórico.



**Fuente.** Autor, 2015.



La tendencia lineal seleccionada se representa de la siguiente manera:

$$y = 96,711x + 7831,3$$

Donde la y representa el TPDS y la X el año en cuestión (Considerando el 1997 como el año 0, 1998 el 1, y así sucesivamente).

Para proyectar el TPDS a 10 años y a 20 años, inicialmente se deberá proyectar al año en el cual el pavimento comenzará a ser utilizado. Para esto se reemplaza por 19 la x en la ecuación lineal.

$$y = 96,711(19) + 7831,3$$

$$y = 9669$$

Para calcular el número de ejes equivalentes de diseño, se necesita saber el total de ejes equivalentes que pasará durante los 10 años (2016 hasta 2026) y los 20 años (2016 hasta 2036). Por esto los TPDS a utilizar deben ser los acumulados desde el 2016 hasta 2026 y 2036.

Los TPDS acumulados son los mostrados a continuación.

*Cuadro 23. TPDS del 2016 y acumulados a 10 y 20 años.*

19	2016	9669	
29	2026	101040	10 Años
39	2036	211751	20 Años

*Fuente. Autor, 2015.*



#### 4.6.2.2.2. Número de Ejes Equivalentes.

Para poder calcular el número de ejes equivalentes se necesita conocer el TPDS acumulado hasta el año requerido, la distribución de los tipos de vehículos, el factor camión, el factor direccional y el factor carril.

*Figura 13. Fórmula Número de Ejes Equivalentes.*

$$N = 365 \cdot TPDS \cdot \%Vc \cdot FC \cdot Fc \cdot Fd$$

*Fuente. Autor, 2015.*

La distribución de los tipos de vehículo se conoce del registro histórico de la estación seleccionada, y se supone que la última distribución (la del año 2011) se mantendrá en el futuro. Esta distribución será de Buses (11%) y Camiones (15%), y dentro de los camiones se distribuirá entre los tipos de camiones que circulen en dicha vía.

Para lo anterior es necesario conocer los tipos de camiones que se encuentran en Colombia, y esto está estipulado en la Resolución 004100 del 2004, en la cual designan a cada camión con una nomenclatura dependiendo al número de ejes y a la forma en que se distribuyen estos ejes.



Figura 14. Designación vehículos de Transporte de Carga.

Designación	Configuración	Descripción
2		Camión de dos ejes Camión Simple
3		Camión de tres ejes Dobletroque
4		Camión de cuatro ejes
2S1		Tractocamión de dos ejes con semirremolque de un eje

Designación	Configuración	Descripción
2S3		Tractocamión de dos ejes con semirremolque de tres ejes
3S1		Tractocamión de tres ejes con semirremolque de un eje
3S2		Tractocamión de tres ejes con semirremolque de dos ejes
3S3		Tractocamión de tres ejes con semirremolque de tres ejes
R2		Remolque de dos ejes
2 R2		Camión de dos ejes con remolque de dos ejes
2R3		Camión de dos ejes con remolque de tres ejes
3 R2		Camión de tres ejes Dobletroque con remolque de dos ejes
3 R3		Camión de tres ejes Dobletroque con remolque de tres ejes
4 R2		Camión de cuatro ejes con remolque de dos ejes

Designación	Configuración	Descripción
4R4		Camión de cuatro ejes con remolque de cuatro ejes
2 B1		Camión de dos ejes con remolque balancín de un eje
2B2		Camión de dos ejes con remolque balancín de dos ejes
2B3		Camión de dos ejes con remolque balancín de tres ejes
3 B1		Camión de tres ejes Dobletroque con remolque balancín de un eje
3B2		Camión de tres ejes Dobletroque con remolque balancín de dos ejes
3B3		Camión de tres ejes Dobletroque con remolque balancín de tres ejes
4B1		Camión de cuatro ejes con remolque balancín de un eje
4B2		Camión de cuatro ejes con remolque balancín de dos ejes
4B3		Camión de cuatro ejes con remolque balancín de cuatro ejes

Fuente. Resolución 004100 del 2004.

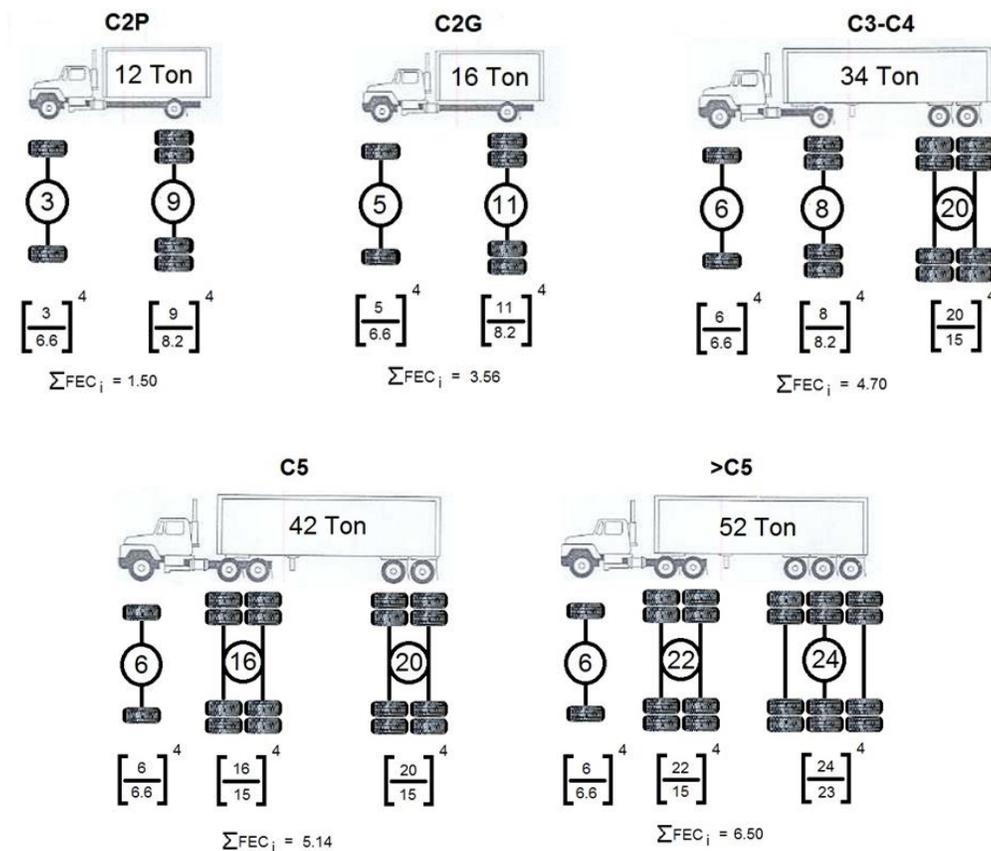


De la resolución además se extraerá la distribución de carga por eje para cada tipo de vehículo. Esto es necesario para el cálculo del Factor Camión, el cual depende de la distribución de vehículos y del Factor Daño de cada tipo de vehículo comercial.

Para calcular el factor daño (FDVC), se realizará la sumatoria de los Factores Equivalentes de Carga por Eje (FEC) de cada tipo de vehículo.

El FEC se calcula con el método AASHTO simplificado o método de la cuarta potencia, el cual determina para cada tipo de eje un factor de equivalencia. Se toma la carga de cada eje y se divide por la carga del eje patrón (6.6 para Simple de Rueda Simple, 8.2 para Simple de Rueda Doble, 15 para Tandem y 23 para Tridem) y el resultado se eleva a la cuarta potencia. Este proceso se hace para cada eje del vehículo y luego se hace la sumatoria de todos los ejes, teniendo como resultado el Factor Daño de dicho vehículo (FDVC).

**Figura 15.** Factores Daño para cada tipo de Vehículo.



**Fuente.** Autor, 2015.

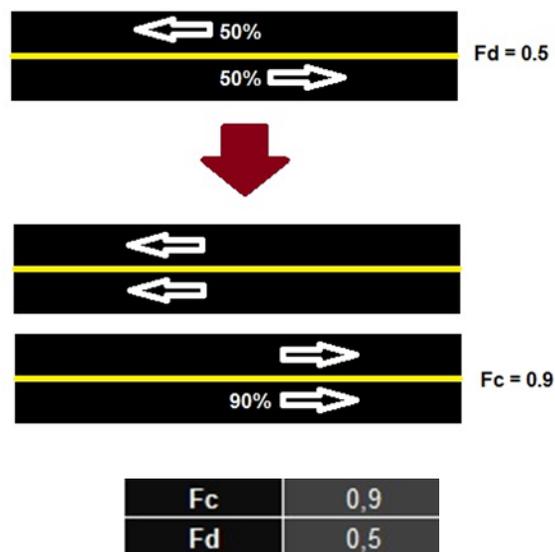


Ahora se determinan el Factor Direccional (Fd) y el Factor Carril (Fc).

Puesto a que los TPDS del registro histórico están dados para una vía direccional, se utiliza un factor direccional de 0.5, suponiendo una distribución de 50/50 en los carriles.

Y como de un carril de cada dirección se pasará a dos carriles se hace una distribución de 90/10 y se utiliza un factor carril de 0.9 utilizando el carril más cargado.

**Figura 16.** Factor Direccional y Factor Carril.



**Fuente.** Autor, 2015.

Ahora se calculan los Ejes Equivalentes tanto a 10 como a 20 años, utilizando la fórmula de la Imagen #. Utilizando los TPDS acumulados, la distribución de buses y camiones, el FC, el Fd y el Fc.

En el siguiente cuadro se ve el Número de Ejes Equivalentes a utilizar para diseño.



**Cuadro 24.** Número de Ejes Equivalentes a 10 y a 20 años.

Año	TPDS	Buses	Camiones	Distribución Porcentual de Camiones					FC	ΣN	
		%B	%C	C2P	C2G	C3-C4	C5	>C5			
2011	9552	11	15	40	42	8	2	8	3,17269231		
2026	101040	11	15	40	42	8	2	8	3,17269231	13689903	10 Años
2036	211751	11	15	40	42	8	2	8	3,17269231	28690143	20 Años
	FDVC=	3,28		1,5	3,56	4,7	5,14	6,5			

*Fuente.* Autor, 2015.

Como se puede ver para el diseño de un pavimento flexible se utiliza el valor a 10 años, 13'689.903.

#### 4.6.2.3. Variable Subrasante.

La Subrasante presenta un CBR de 5%, y se propone estabilizarlo con cal en un 4% en peso para alcanzar un CBR de 10%. Entonces se calcula el Módulo Resiliente de la Subrasante.

$$\text{Módulo Resiliente} = \text{CBR} * 1500 = 10 * 1500 = 15.000 \text{ PSI}$$

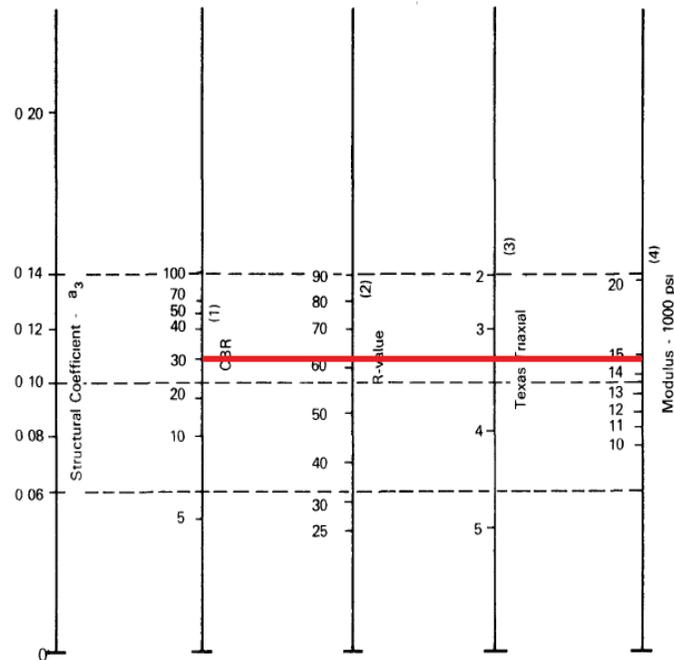
#### 4.6.2.4. Variable Materiales.

##### 4.6.2.4.1. Sub-Base.

La sub-base presenta un CBR del 30%, y por correlación AASHTO se obtiene el valor del Módulo Resiliente.



Figura 17. Correlación AASHTO para hallar el Mr teniendo el valor de CBR.



Fuente. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993. Modificado por Autor, 2016.

Utilizando esta correlación, la sub-base tiene un módulo Resiliente de 15.000 PSI y un Coeficiente estructural de  $a_3=0,11$ .

#### 4.6.2.4.2. Base Estabilizada.

Como se mencionó anteriormente la base estabilizada con emulsión asfáltica tiene un coeficiente estructural de  $a_{2,1}=0,14$  y un Mr de 550.000 PSI utilizando la misma gráfica de la AASHTO. La base estabilizada con cemento tiene un coeficiente de  $a_{2,2}=0,16$  y un Mr de 620.000 PSI.

#### 4.6.2.4.3. Carpeta Asfáltica.

El módulo de elasticidad del asfalto es de 300.000 PSI, y el coeficiente estructural del concreto asfáltico es  $a_1=0,35$ .



#### 4.6.2.5. Serviciabilidad Inicial Po y Serviciabilidad Final Pt.

El índice de serviciabilidad inicial está dado por los ensayos de pavimentos por la AASHTO. Mientras que la serviciabilidad final es el índice más bajo que pueda ser tolerado antes de que sea necesario efectuar una rehabilitación, un refuerzo o una reconstrucción.

Utilizando los parámetros recomendados tanto por la AASHTO como por la experiencia de la ingeniería mexicana se utilizaron los siguientes valores.

*Cuadro 25. Serviciabilidad Inicial y Final a utilizar.*

SERVICIABILIDAD INICIAL Po	
PAV. FLEXIBLE	4,2
PAV. RÍGIDO	4,5

VALOR A UTILIZAR	4,2
------------------	-----

SERVICIABILIDAD FINAL Pt		
Tipo de Via	AASHTO	MÉXICO
Autopistas	2,5 a 3	2,5
Carreteras	2 a 2,5	2
Zonas Ind.	2 a 3	1,8
Urbano Ppal	1,5 a 2	1,8
Urbano Sdria	1,5 a 2	1,5

VALOR A UTILIZAR	2
------------------	---

*Fuente. Autor, 2015.*



#### 4.6.2.6. Confiabilidad R.

Utilizando los parámetros recomendados tanto por la AASHTO como por la experiencia de la ingeniería mexicana se utilizaron los siguientes valores.

*Cuadro 26. Confiabilidad a utilizar.*

<b>CONFIABILIDAD</b>				
<b>AASHTO</b>			<b>MÉXICO</b>	
<b>CLAS. FUNCIONAL</b>	<b>URBANO</b>	<b>RURAL</b>	<b>TIPO DE PAV</b>	<b>CONFIABILIDAD</b>
<b>Autopistas</b>	<b>85%-99%</b>	<b>80%-99%</b>	<b>Autopistas</b>	<b>95%</b>
<b>Arterias Principales</b>	<b>80%-99%</b>	<b>75%-99%</b>	<b>Carreteras</b>	<b>80%</b>
<b>Colectoras</b>	<b>80%-95%</b>	<b>75%-95%</b>	<b>Rurales</b>	<b>70%</b>
<b>Locales</b>	<b>50%-80%</b>	<b>50%-80%</b>	<b>Zonas Ind.</b>	<b>65%</b>
			<b>Urbano Ppal</b>	<b>60%</b>
			<b>Urbano Sdria</b>	<b>50%</b>
<b>VALOR A UTILIZAR</b>			<b>90%</b>	

*Fuente. Autor, 2015.*

#### 4.6.2.7. Desviación normal estándar $Z_r$ y Error estándar combinado $S_o$ .

Utilizando los parámetros recomendados tanto por la AASHTO como por la experiencia de la ingeniería mexicana se utilizaron los siguientes valores.



**Cuadro 27.** Desviación estándar y Error estándar a utilizar.

DESVIACIÓN ESTÁNDAR $Z_R$	
Para una Confiabilidad de 90%	1,282
Para una Confiabilidad de 95%	1,645
Para una Confiabilidad de 98%	2,054

VALOR A UTILIZAR	1,282
------------------	-------

ERROR ESTÁNDAR $S_o$	
Sin Error en el Tránsito	0,34
Con Error en el Tránsito	0,39

VALOR A UTILIZAR	0,39
------------------	------

*Fuente.* Autor, 2015.

#### 4.6.2.8. Coeficiente de Drenaje $C_d$ ( $m_i$ ).

La calidad del drenaje, que depende del tiempo que tarda el agua infiltrada en ser evacuada del pavimento y del porcentaje de tiempo en el año en el cual el pavimento está expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación.

Utilizando valores recomendados por la AASHTO.

**Cuadro 28.** Valor a utilizar de Coeficiente de Drenaje.

Calidad del drenaje	COEFICIENTE DE DRENAJE $C_d$			
	Porcentaje de tiempo en el que la estructura del pavimento está expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación			
	Menos del 1%	1% - 5%	5% - 25%	Más del 25%
Excelente	1,25 - 1,20	1,20 - 1,15	1,15 - 1,10	1,10
Bueno	1,20 - 1,15	1,15 - 1,10	1,10 - 1,00	1,00
Mediano	1,15 - 1,10	1,10 - 1,00	1,00 - 0,90	0,90
Malo	1,10 - 1,00	1,00 - 0,90	0,90 - 0,80	0,80
Muy Malo	1,00 - 0,90	0,90 - 0,80	0,80 - 0,70	0,70

VALOR A UTILIZAR	1,05
------------------	------

*Fuente.* Autor, 2015.



#### **4.6.2.9. Solución Fórmula Método AASHTO 93 para determinar el Número Estructural (SN) de cada capa (Sub-Base, Base y Carpeta Asfáltica).**

Se resolvió la fórmula del Método AASHTO 1993 para obtener los números estructurales dependiendo de la capa analizada utilizando el programa Ecuación AASHTO 93.

Utilizando como datos de entrada los siguientes.

$$W_{18} = 13'689.903$$

$$Z_r = 1,282$$

$$S_o = 0,39$$

*SN= Número Estructural, indicador de la Capacidad Estructural requerida (materiales y espesores).*

$$\Delta PSI = 4,2 - 2,0 = 2,2$$

*Mr= Módulo Resiliente de la Subrasante (15.000 PSI), Base (620.000 PSI para base con cemento ó 550.00 PSI para base con emulsión) o Sub-Base (15.000 PSI).*

Resolviendo la fórmula para cada valor de Mr, se obtuvieron los siguientes Números Estructurales.



Figura 18. Número Estructural sobre la Subrasante.

Ecuación AASHTO 93

Tipo de Pavimento  
 Pavimento flexible  Pavimento rígido

Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So)  
90 % Zr=-1.282 So 0.39

Serviciabilidad inicial y final  
PSI inicial 4.2 PSI final 2

Módulo resiliente de la subrasante  
Mr 15000 psi

Información adicional para pavimentos rígidos  
Módulo de elasticidad del concreto - Ec (psi) Coeficiente de transmisión de carga - (J)  
Módulo de rotura del concreto - Sc (psi) Coeficiente de drenaje - (Cd)

Tipo de Análisis  
 Calcular SN **W18 = 13689903**  
 Calcular W18

Número Estructural  
**SN = 3.76**

Calcular Salir

Fuente. Programa Ecuación AASHTO 93, 2016.

Número Estructural sobre Subrasante ( $SN_3$ ) = 3,76.



Figura 19. Número Estructural sobre la Sub-Base.

Ecuación AASHTO 93

Tipo de Pavimento  
 Pavimento flexible  Pavimento rígido

Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So)  
90 % Zr=-1.282 So 0.39

Serviciabilidad inicial y final  
PSI inicial 4.2 PSI final 2

Módulo resiliente de la subrasante  
Mr 15000 psi

Información adicional para pavimentos rígidos  
Módulo de elasticidad del concreto - Ec (psi) Coeficiente de transmisión de carga - (J)  
Módulo de rotura del concreto - Sc (psi) Coeficiente de drenaje - (Cd)

Tipo de Análisis  
 Calcular SN **W18 = 13689903**  
 Calcular W18

Número Estructural  
**SN = 3.76**

Calcular Salir

Fuente. Programa Ecuación AASHTO 93, 2016.

Número Estructural sobre Sub-Base ( $SN_2$ ) = 3,76



**Figura 20.** Número Estructural sobre la Base Estabilizada con Emulsión Asfáltica.

**Ecuación AASHTO 93**

Tipo de Pavimento  
 Pavimento flexible  Pavimento rígido

Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So)  
90 % Zr=-1.282 So = 0.39

Serviciabilidad inicial y final  
PSI inicial 4.2 PSI final 2

Módulo resiliente de la subrasante  
Mr 550000 psi

Información adicional para pavimentos rígidos  
Módulo de elasticidad del concreto - Ec (psi) Coeficiente de transmisión de carga - (J)  
Módulo de rotura del concreto - Sc (psi) Coeficiente de drenaje - (Cd)

Tipo de Análisis  
 Calcular SN **W18 = 13689903**  
 Calcular W18

Número Estructural  
**SN = 0.90**

Calcular Salir

**Fuente.** Programa Ecuación AASHTO 93, 2016.

Número Estructural sobre Base Estabilizada con Emulsión ( $SN_{1.1}$ ) = 0,90.



**Figura 21.** Número Estructural sobre la Base Estabilizada con Cemento Portland.

**Ecuación AASHTO 93**

Tipo de Pavimento  
 Pavimento flexible  Pavimento rígido

Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So)  
90 % Zr=-1.282 So = 0.39

Serviciabilidad inicial y final  
PSI inicial 4.2 PSI final 2

Módulo resiliente de la subrasante  
Mr 620000 psi

Información adicional para pavimentos rígidos  
Módulo de elasticidad del concreto - Ec (psi) Coeficiente de transmisión de carga - (J)  
Módulo de rotura del concreto - Sc (psi) Coeficiente de drenaje - (Cd)

Tipo de Análisis  
 Calcular SN **W18 = 13689903**  
 Calcular W18

Número Estructural  
**SN = 0.84**

Calcular Salir

**Fuente.** Programa Ecuación AASHTO 93, 2016.

Número Estructural sobre Base Estabilizada con Cemento ( $SN_{1,2}$ ) = 0,84.



Ahora se presentan dos cuadros que resumen las variables a utilizar para la determinación de los espesores de las capas de la estructura de pavimento para ambos casos de estabilización.

**Cuadro 29.** Variables para diseño con base estabilizada utilizando emulsión.

Variable	Valor
SN1.1	0,90
SN2	3,76
SN3	3,76
a1	0,35
a2.1	0,14
a3	0,11
m1	1,05
m2	1,05
m3	1,05

*Fuente.* Autor, 2016.

**Cuadro 30.** Variables para diseño con base estabilizada utilizando cemento.

Variable	Valor
SN1.2	0,84
SN2	3,76
SN3	3,76
a1	0,35
a2.2	0,14
a3	0,11
m1	1,05
m2	1,05
m3	1,05

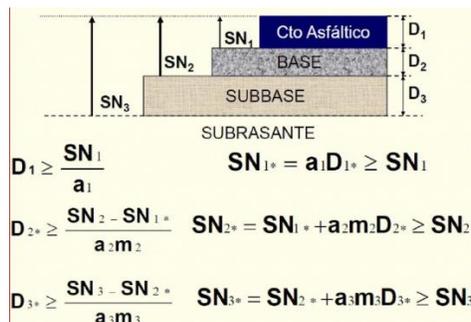
*Fuente.* Autor, 2016.



#### 4.6.3. DETERMINACIÓN DE ESPESORES.

Teniendo el Coeficiente Estructural y el Número Estructural para cada capa de la estructura del pavimento, se utilizan las siguientes fórmulas para determinar el espesor de la Carpeta Asfáltica, La Base Estabilizada con Emulsión, la Base Estabilizada con Cemento y la Sub-Base.

Figura 22. Fórmulas para determinación de Espesores.



Fuente. Ingeniero Ramón Torres Ortega. Diseño de Pavimentos Flexibles, 2015.

##### 4.6.3.1. Estructura con Base estabilizada con Emulsión Asfáltica.

- **Opción 1**

$$D_1 = SN_{1.1} / a_1 = 0,90 / 0,35 = 2,57 \text{ pulg} \approx 4 \text{ pulg} = 10 \text{ cm.}$$

$$SN_{1.1} \text{ Recalculado} = 1,40$$

$$D_2 = (SN_2 - SN_{1.1}) / a_{2.1} m_2 = (3,76 - 1,40) / (0,14 * 1,05) = 16,05 \text{ pulg} \approx 10 \text{ pulg} = 25 \text{ cm}$$

$$SN_2 \text{ Recalculado} = 2,87$$

$$D_3 = (SN_3 - SN_2) / a_{3.1} m_3 = (3,76 - 2,87) / (0,11 * 1,05) = 7,71 \text{ pulg} \approx 10 \text{ pulg} = 25 \text{ cm}$$

$$SN_3 \text{ Recalculado} = 4,025$$



**Cuadro 31. Opción 1 Valores de las variables para el diseño de la estructura de pavimento con base Estabilizada con Emulsión Asfáltica.**

Número Estructural (SN)	SN1.1	SN2	SN3
Tipo de Capa	Carpeta sobre Base Estabilizada con Emulsión Asfáltica	Base Estabilizada con Emulsión Asfáltica	Sub-Base Granular (Subrasante debajo) (Base Est. con Emulsión arriba)
Módulo de Resiliencia (Mr)	550.000 PSI	15.000 PSI	15.000 PSI
SN Calculado	0,90	3,76	3,76
Coefficiente Estructural (a <sub>i</sub> )	0,35	0,14	0,11
Coefficiente de Drenaje (m <sub>i</sub> )	1,05	1,05	1,05
Cálculo Espesores Capas (D <sub>i</sub> )	Calculado (pulg)	2,57	7,71
	Propuesto (pulg)	4	10
	Espesor (cm)	10	25
SN Recalculado	1,40	2,87	4,025
<b>EMULSIÓN ASFÁLTICA OPCIÓN 1</b>			

*Fuente. Autor, 2016.*

- **Opción 2**

$$D_1 = SN_{1.1}/a_1 = 0,90/0,35 = 2,57 \text{ pulg} \approx 4 \text{ pulg} = 10 \text{ cm.}$$

$$SN_{1.1} \text{ Recalculado} = 1,40$$

$$D_2 = (SN_2 - SN_{1.1})/a_{2.1}m_2 = (3,76 - 1,40)/(0,14 * 1,05) = 16,05 \text{ pulg} \approx 8 \text{ pulg} = 20 \text{ cm}$$

$$SN_2 \text{ Recalculado} = 2,576$$

$$D_3 = (SN_3 - SN_2)/a_3m_3 = (3,76 - 2,576)/(0,11 * 1,05) = 10,25 \text{ pulg} \approx 10 \text{ pulg} = 25 \text{ cm}$$

$$SN_3 \text{ Recalculado} = 3,731$$



**Cuadro 32.** Opción 2 Valores de las variables para el diseño de la estructura de pavimento con base Estabilizada con Emulsión Asfáltica.

Número Estructural (SN)	SN1.1	SN2	SN3
Tipo de Capa	Carpeta sobre Base Estabilizada con Emulsión Asfáltica	Base Estabilizada con Emulsión Asfáltica	Sub-Base Granular (Subrasante debajo) (Base Est. con Emulsión arriba)
Módulo de Resiliencia (Mr)	550.000 PSI	15.000 PSI	15.000 PSI
SN Calculado	0,90	3,76	3,76
Coefficiente Estructural (ai)	0,35	0,14	0,11
Coefficiente de Drenaje (mi)	1,05	1,05	1,05
Cálculo Espesores Capas (Di)	Calculado (pulg)	2,57	16,05
	Propuesto (pulg)	4	8
	Espesor (cm)	10	20
SN Recalculado	1,40	2,576	3,731
<b>EMULSIÓN ASFÁLTICA OPCIÓN 2</b>			

*Fuente. Autor, 2016.*

- **Opción 3**

$$D_1 = SN_{1.1}/a_1 = 0,90/0,35 = 2,57 \text{ pulg} \approx 4 \text{ pulg} = 10 \text{ cm.}$$

$$SN_{1.1} \text{ Recalculado} = 1,40$$

$$D_2 = (SN_2 - SN_{1.1})/a_{2.1}m_2 = (3,76 - 1,40)/(0,14 * 1,05) = 16,05 \text{ pulg} \approx 6 \text{ pulg} = 15 \text{ cm}$$

$$SN_2 \text{ Recalculado} = 2,282$$

$$D_3 = (SN_3 - SN_2)/a_3m_3 = (3,76 - 2,282)/(0,11 * 1,05) = 12,80 \text{ pulg} \approx 12 \text{ pulg} = 30 \text{ cm}$$

$$SN_3 \text{ Recalculado} = 3,668$$



**Cuadro 33. Opción 3 Valores de las variables para el diseño de la estructura de pavimento con base Estabilizada con Emulsión Asfáltica.**

Número Estructural (SN)	SN1.1	SN2	SN3
Tipo de Capa	Carpeta sobre Base Estabilizada con Emulsión Asfáltica	Base Estabilizada con Emulsión Asfáltica	Sub-Base Granular (Subrasante debajo) (Base Est. con Emulsión arriba)
Módulo de Resiliencia (Mr)	550.000 PSI	15.000 PSI	15.000 PSI
SN Calculado	0,90	3,76	3,76
Coefficiente Estructural (ai)	0,35	0,14	0,11
Coefficiente de Drenaje (mi)	1,05	1,05	1,05
Cálculo Espesores Capas (Di)	Calculado (pulg)	2,57	16,05
	Propuesto (pulg)	4	6
	Espesor (cm)	10	15
SN Recalculado	1,40	2,282	3,668
<b>EMULSIÓN ASFÁLTICA OPCIÓN 3</b>			

*Fuente. Autor, 2016.*

#### 4.6.3.2. Estructura con Base estabilizada con Cemento Portland.

- **Opción 1**

$$D_1 = SN_{1.2}/a_1 = 0,84/0,35 = 2,40 \text{ pulg} \approx 4 \text{ pulg} = 10 \text{ cm.}$$

$$SN_{1.2} \text{ Recalculado} = 1,40$$

$$D_2 = (SN_2 - SN_{1.2})/a_{2.2}m_2 = (3,76 - 1,40)/(0,16 * 1,05) = 14,05 \text{ pulg} \approx 10 \text{ pulg} = 25 \text{ cm}$$

$$SN_2 \text{ Recalculado} = 3,08$$

$$D_3 = (SN_3 - SN_2)/a_3m_3 = (3,76 - 3,08)/(0,11 * 1,05) = 5,89 \text{ pulg} \approx 10 \text{ pulg} = 25 \text{ cm}$$



**SN<sub>3</sub> Recalculado = 4,235**

*Cuadro 34. Opción 1 Valores de las variables para el diseño de la estructura de pavimento con base Estabilizada con Cemento Portland.*

Número Estructural (SN)		SN1.2	SN2	SN3
Tipo de Capa		Carpeta sobre Base Estabilizada con Cemento Portland	Base Estabilizada con Cemento Portland	Sub-Base Granular (Subrasante debajo) (Base Est. con Cemento arriba)
Módulo de Resiliencia (Mr)		620.000 PSI	15.000 PSI	15.000 PSI
SN Calculado		0,84	3,76	3,76
Coeficiente Estructural (a <sub>i</sub> )		0,35	0,16	0,11
Coeficiente de Drenaje (m <sub>i</sub> )		1,05	1,05	1,05
Cálculo Espesores Capas (D <sub>i</sub> )	Calculado (pulg)	2,40	14,05	5,89
	Propuesto (pulg)	4	10	10
	Espesor (cm)	10	25	25
SN Recalculado		1,40	3,08	4,235
<b>CEMENTO PORTLAND OPCIÓN 1</b>				

*Fuente. Autor, 2016.*

- **Opción 2**

$$D_1 = SN_{1.2}/a_1 = 0,84/0,35 = 2,40 \text{ pulg} \approx 4 \text{ pulg} = 10 \text{ cm.}$$

$$SN_{1.2} \text{ Recalculado} = 1,40$$

$$D_2 = (SN_2 - SN_{1.2})/a_{2.2}m_2 = (3,76 - 1,40)/(0,16 * 1,05) = 14,05 \text{ pulg} \approx 8 \text{ pulg} = 20 \text{ cm}$$

$$SN_2 \text{ Recalculado} = 2,744$$

$$D_3 = (SN_3 - SN_2)/a_{3.3}m_3 = (3,76 - 2,744)/(0,11 * 1,05) = 8,80 \text{ pulg} \approx 10 \text{ pulg} = 25 \text{ cm}$$



**SN<sub>3</sub> Recalculado = 3,899**

*Cuadro 35. Opción 2 Valores de las variables para el diseño de la estructura de pavimento con base Estabilizada con Cemento Portland.*

Número Estructural (SN)		SN1.2	SN2	SN3
Tipo de Capa		Carpeta sobre Base Estabilizada con Cemento Portland	Base Estabilizada con Cemento Portland	Sub-Base Granular (Subrasante debajo) (Base Est. con Cemento arriba)
Módulo de Resiliencia (Mr)		620.000 PSI	15.000 PSI	15.000 PSI
SN Calculado		0,84	3,76	3,76
Coeficiente Estructural (a <sub>i</sub> )		0,35	0,16	0,11
Coeficiente de Drenaje (m <sub>i</sub> )		1,05	1,05	1,05
Cálculo Espesores Capas (D <sub>i</sub> )	Calculado (pulg)	2,40	14,05	8,80
	Propuesto (pulg)	4	8	10
Espesor (cm)		10	20	25
SN Recalculado		1,40	2,744	3,899
<b>CEMENTO PORTLAND OPCIÓN 2</b>				

*Fuente. Autor, 2016.*

- **Opción 3**

$$D_1 = SN_{1.2}/a_1 = 0,84/0,35 = 2,40 \text{ pulg} \approx 4 \text{ pulg} = 10 \text{ cm.}$$

$$SN_{1.2} \text{ Recalculado} = 1,40$$

$$D_2 = (SN_2 - SN_{1.2})/a_{2.2}m_2 = (3,76 - 1,40)/(0,16 * 1,05) = 14,05 \text{ pulg} \approx 6 \text{ pulg} = 15 \text{ cm}$$

$$SN_2 \text{ Recalculado} = 2,408$$

$$D_3 = (SN_3 - SN_2)/a_{3.3}m_3 = (3,76 - 2,408)/(0,11 * 1,05) = 11,71 \text{ pulg} \approx 12 \text{ pulg} = 30 \text{ cm}$$



**SN<sub>3</sub> Recalculado = 3,794**

**Cuadro 36.** Opción 3 Valores de las variables para el diseño de la estructura de pavimento con base Estabilizada con Cemento Portland.

Número Estructural (SN)		SN1.2	SN2	SN3
Tipo de Capa		Carpeta sobre Base Estabilizada con Cemento Portland	Base Estabilizada con Cemento Portland	Sub-Base Granular (Subrasante debajo) (Base Est. con Cemento arriba)
Módulo de Resiliencia (Mr)		620.000 PSI	15.000 PSI	15.000 PSI
SN Calculado		0,84	3,76	3,76
Coeficiente Estructural (ai)		0,35	0,16	0,11
Coeficiente de Drenaje (mi)		1,05	1,05	1,05
Cálculo Espesores Capas (Di)	Calculado (pulg)	2,40	14,05	11,71
	Propuesto (pulg)	4	6	12
	Espesor (cm)	10	15	30
SN Recalculado		1,40	2,408	3,794
<b>CEMENTO PORTLAND OPCIÓN 3</b>				

*Fuente. Autor, 2016.*

Ahora se representan gráficamente las 3 opciones posibles, donde cada una tiene una base estabilizada con Emulsión Asfáltica y otra con Cemento Portland.



- **Opción 1**

*Figura 23. Opción 1 Estructura Pavimento con Base tratada con Emulsión.*



*Fuente. Autor, 2016.*

*Figura 24. Opción 1 Estructura Pavimento con Base tratada con Cemento.*



*Fuente. Autor, 2016.*



- **Opción 2**

*Figura 25. Opción 2 Estructura Pavimento con Base tratada con Emulsión.*



*Fuente. Autor, 2016.*

*Figura 26. Opción 2 Estructura Pavimento con Base tratada con Cemento.*



*Fuente. Autor, 2016.*



- **Opción 3**

*Figura 27. Opción 3 Estructura Pavimento con Base tratada con Emulsión.*



*Fuente. Autor, 2016.*

*Figura 28. Opción 3 Estructura Pavimento con Base tratada con Cemento.*



*Fuente. Autor, 2016.*



Con los resultados se puede ver que para el diseño de una estructura de pavimento para bases de 25 cm, 20 cm y 15 cm tanto estabilizadas con emulsión como con cemento, se obtuvieron los mismos resultados para cada caso, lo que permite considerar la estabilización con emulsión asfáltica como un método viable estructuralmente hablando en una estructura de pavimento.

Como los espesores de las estructuras de pavimento para ambos métodos de estabilización fueron muy parecidos, se utilizará como único ítem diferenciador la capa de base, pues una es de material seleccionado calcáreo estabilizado con emulsión y la otra con material granular tratado con cemento.

Para hacer la comparación de costos se hará un análisis de precios unitarios para ambas bases, utilizando las indicaciones reglamentadas en INVIAS.

#### **4.6.4. ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS (APU) PARA BASE ESTABILIZADA CON EMULSIÓN ASFÁLTICA Y BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO PORTLAND.**

Utilizando los formatos de APU dados por el INVIAS para bases estabilizadas y con los precios actualizados en todos los ítems se realizaron ambos análisis.

Primero se muestra el APU para base estabilizada con emulsión.



**Cuadro 37. APU para Base Estabilizada con Emulsión Asfáltica.**

REPUBLICA DE COLOMBIA INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS		ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS			
CARRETERA CIUDAD DEL BICENTENARIO ITEM: BASE ESTABILIZADA CON EMULSIÓN ASFÁLTICA			ESPECIFICACIÓN: UNIDAD : M3		
<b>I. EQUIPO</b>					
Descripción	Tipo	Tarifa/Hora	Rendimiento	Valor-Unit.	
Retroexcavadora		160.338	0,100000	16.034	
Vibocompactor		128.271	0,100000	12.827	
Motoniveladora		128.271	0,100000	12.827	
Carro Irrigador de Emulsión		138.960	0,100000	1.800	
				<b>Sub-Total</b>	<b>43.488,05</b>
<b>II. MATERIALES EN OBRA</b>					
Descripción	Unidad	Precio-Unit.	Cantidad	Valor-Unit.	
Material Seleccionado Calcareo ("Zahorra")	M3	40.000	1,300	52.000,00	
Emulsión Asfáltica tipo CRL-1	Kg	1.200	68,000	81.600,00	
				<b>Sub-Total</b>	<b>133.600,00</b>
<b>III. TRANSPORTES</b>					
Material	Vol. Peso ó Cant.	Distancia	Rendimiento	Tarifa	Valor-Unit.
					0,00
				<b>Sub-Total</b>	<b>0,00</b>
<b>IV. MANO DE OBRA</b>					
Trabajador	Jornal	Prestaciones	Jornal Total	Rendimiento	Valor-Unit.
OBREROS (4)			10.679,34	9,00	96.114,06
				<b>Sub-Total</b>	<b>96.114,06</b>
				<b>Total Costo Directo</b>	<b>273.202,11</b>
<b>V. COSTOS INDIRECTOS</b>					
Descripción	Porcentaje	Valor Total			
ADMINISTRACION	7%	19.124,15			
IMPREVISTOS	1%	2.732,02			
UTILIDAD	5%	14.206,51			
		<b>Sub-Total</b>	<b>36.062,68</b>		
				<b>Precio unitario total aproximado al peso</b>	<b>309.265,00</b>

*Fuente. INVIAS 2013, modificado por autor, 2016.*



Antes de mostrar el APU para base estabilizada con cemento se comparó el resultado del análisis anterior con valores de otros proyectos, para saber si el valor obtenido es cercano a la realidad.

**Figura 29.** Lista de precios para base estabilizada en municipios de Cundinamarca.

Departamento de CUNDINAMARCA Instituto de Infraestructura y Concesiones de Cundinamarca ICCU		GOBERNACIÓN DE CUNDINAMARCA LISTA DE PRECIOS CONSTRUCCIÓN, URBANISMO Y VÍAS (2016) PROVINCIA: ALMEIDAS ESTOS PRECIOS CONTEMPLAN SUMINISTRO, INSTALACIÓN Y TRANSPORTE									CUNDINAMARCA unidos podemos más	
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	Chocontá	Machetá	Manta	Sesquilé	Suesca	Tiribita	V.Pinzón			
<b>CONSTRUCCIÓN</b>												
B,13	340.1	BASE ESTABILIZADA CON EMULSIÓN ASFÁLTICA TIPO BEE-1	M3	293.929	300.444	336.280	306.960	302.073	334.651	297.187		

**Fuente.** Instituto de Infraestructura y Concesiones de Cundinamarca ICCU, 2016.

Como se puede ver el valor obtenido en nuestro análisis es muy cercano a los utilizados en proyectos de Colombia en el año 2016. Si hacemos un promedio de los precios de la última figura nos da \$ 310.217,00 y el resultado obtenido para nuestra base fue de \$ 309.265,00 ambos valores para cada metro cúbico (m<sup>3</sup>), que es la unidad de medida que establece el INVIAS para los APU de bases.

Ahora se muestra en el siguiente cuadro el APU para la base estabilizada con cemento.



**Cuadro 38. APU para Base Estabilizada con Cemento Portland.**

REPUBLICA DE COLOMBIA INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS		ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				
CARRETERA CIUDAD DEL BICENTENARIO ITEM: BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO PORTLAND				ESPECIFICACIÓN: UNIDAD : M3		
<b>I. EQUIPO</b>						
Descripción	Tipo	Tarifa/Hora	Rendimiento	Valor-Unit.		
Retroexcavadora		160.338	0,100000	16.034		
Vibocompactor		128.271	0,100000	12.827		
Motoniveladora		128.271	0,100000	12.827		
Carro tanque con agua		138.960	0,100000	13.896		
				<b>Sub-Total</b>	<b>55.584,07</b>	
<b>II. MATERIALES EN OBRA</b>						
Descripción	Unidad	Precio-Unit.	Cantidad	Valor-Unit.		
Material granular triturado (Tipo palmarito)	M3	80.000	1,300	104.000,00		
Cemento estructural (Argos)	Kg	550	50,000	27.500,00		
				<b>Sub-Total</b>	<b>131.500,00</b>	
<b>III. TRANSPORTES</b>						
Material	Vol. Peso ó Cant.	Distancia	Rendimiento	Tarifa	Valor-Unit.	
					0,00	
				<b>Sub-Total</b>	<b>0,00</b>	
<b>IV. MANO DE OBRA</b>						
Trabajador	Jornal	Prestaciones	Jornal Total	Rendimiento	Valor-Unit.	
OBREROS (4)			10.679,34	9,00	96.114,06	
				<b>Sub-Total</b>	<b>96.114,06</b>	
<b>Total Costo Directo</b>					<b>283.198,13</b>	
<b>V. COSTOS INDIRECTOS</b>						
Descripción			Porcentaje	Valor Total		
ADMINISTRACION			7%	19.823,87		
IMPREVISTOS			1%	2.831,98		
UTILIDAD			5%	14.726,30		
				<b>Sub-Total</b>	<b>37.382,15</b>	
<b>Precio unitario total aproximado al peso</b>					<b>320.580,00</b>	

*Fuente. INVIAS 2013, modificado por autor, 2016.*



Por último comparando los precios obtenidos en ambos APU se puede ver que resulta más económica una base estabilizada con emulsión asfáltica, más precisamente \$ 11.315,00 pesos por metro cúbico.



## **5. CONCLUSIONES**

Al realizar la investigación y obtener los resultados ya mostrados se analizaron las ventajas y desventajas que presenta el aplicar emulsiones asfálticas como material estabilizante de bases para una estructura de pavimento. De lo anterior se tuvieron las siguientes conclusiones.

Con los resultados obtenidos al probar los requisitos de granulometría y demás ensayos establecidos por la Norma INVIAS se concluye que un material seleccionado calcáreo cumple perfectamente todo lo que pide la norma para ser utilizado como un material para una base estabilizada con emulsión asfáltica según las normas colombianas.

Para todos los porcentajes de emulsión asfáltica ensayados (3%, 4%, 5% y 6%) se obtuvieron resistencias superiores a las establecidas en la Norma INVIAS, que son  $R_s > 10 \text{ Kg/cm}^2$ ,  $R_h > 7,5 \text{ kg/cm}^2$  y  $R_c > 75\%$ . Haciendo que cualquiera de los porcentajes pueda ser utilizado a la hora de diseñar.

El porcentaje óptimo de ligante obtenido fue del 4%, pues con este porcentaje se obtuvo mayor resistencia conservada (93,31%), y este es el ítem que la norma establece para escoger el porcentaje con el cual debe realizarse la estabilización. Y es con este porcentaje de emulsión con el que se conserva mayor resistencia luego de que la base se vea expuesta al contacto con agua. Los valores obtenidos fueron muy parecidos a los de investigaciones anteriores, aunque el porcentaje óptimo fue menor a los normalmente calculados, lo cual permite concluir que el material seleccionado calcáreo utilizado fue de mucha calidad.

De las estructuras de bases estudiadas con espesores de 25 cm, 20 cm y 15 cm se concluye que es indiferente para el resultado de los espesores de la estructura de un pavimento que la base sea una estabilizada con emulsión asfáltica o con cemento portland, puesto que en los resultados de diseño se obtuvieron las mismas estructuras (mismos espesores) para ambas bases tratadas. Esto permite concluir que desde el punto de vista del diseño, puede considerarse el utilizar emulsiones asfálticas para estabilizar bases, pues se obtienen estructuras de pavimento iguales a las que se tienen al utilizar un material que está comprobado como estabilizante.



La estructura de pavimento escogida de las tres opciones analizadas es la de la base estabilizada de 15 cm, pues con esta se sigue teniendo un espesor aceptable de sub-base (30 cm) y de esta forma se tendrían menores costos que con las otras dos opciones, pues lógicamente los precios de los materiales de una base estabilizada con mayores que los de una sub-base granular.

Con la comparación de costos realizada mediante análisis de precios unitarios (APU) se puede concluir que los costos de una base estabilizada con emulsión asfáltica son menores a los de una estabilizada con cemento, pues se obtuvo un precio de aproximadamente \$ 11.000,00 pesos de diferencia por metro cúbico, lo que haría una diferencia considerable en un proyecto de pavimento. Este resultado le da aún más importancia a la investigación y hace que las bases estabilizadas con emulsión asfáltica sean consideradas seriamente a nivel nacional como una opción para utilizarse en proyectos de pavimentación, sumándole a esto el buen comportamiento en altas temperaturas, la buena respuesta en presencia de agua, como se demostró en los resultados de resistencia conservada, además los porcentajes de emulsión necesarios son considerablemente bajos, siendo esta otra de las razones que hacen el método más económico y que hacen importante a la investigación realizada, pues se puede afirmar que la estabilización con emulsión asfáltica es un método confiable y que le brinda muchas ventajas a quien lo quiera utilizar.



## **6. RECOMENDACIONES**

A continuación se mostrarán las limitaciones encontradas en la investigación.

- Debido al poco tiempo en el que se desarrolló la investigación no fue posible analizar los métodos de investigación en campo, sino que se estudiaron utilizando un proyecto existente (información secundaria), modificando la parte de la base utilizada.
- Por ser la estabilización con emulsión asfáltica un método tan poco estudiado y utilizado a nivel nacional, fue muy poca la recopilación de literatura sobre el método en Colombia y muchos menos en la ciudad de Cartagena.
- El método estudiado no puede utilizarse en lugares con una temperatura ambiente inferior a cinco grados Celsius (5°C) como lo establece la Norma INVIAS en el Artículo 340 del 2013.
- Por último, el material que se utilizará para ser estabilizado deberá cumplir con todos los requisitos establecidos en la Norma Invias en el Artículo 340-13, pues de lo contrario no se obtendrán resultados positivos o peor aún, no podrá realizarse el proceso de estabilización.

Ahora se darán una serie de recomendaciones para futuras investigaciones sobre el tema tratado o sobre temas relacionados con este.

- Recopilar la mayor cantidad de información de literatura de calidad acerca del tema, tanto nacional como internacionalmente.



- Conocer con anterioridad las condiciones climáticas del lugar donde se realizará la investigación, pues como se mostró anteriormente este es un limitante para la aplicación del método.
- Escoger correctamente el material que será utilizado para estabilizarse, ya que este deberá cumplir una serie de requisitos para poder ser utilizado y que el material sea de fácil adquisición en el lugar donde se realice la investigación.
- Determinar con anterioridad los porcentajes de emulsión que serán analizados para así poder obtener correctamente el porcentaje óptimo de ligante.
- Asesorarse de una empresa que utilice el método o que le interese probarlo, para así tener mayor colaboración y poder realizar el ensayo en el campo, obteniendo así resultados más cercanos a la realidad que utilizando información secundaria.
- Buscar APU actualizados para las bases estabilizadas, y así no tener que actualizar los costos a los del momento de la investigación, de esta forma se obtendrán resultados más precisos.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO *Guide for Design of Pavement Structures 1993*. (1993). Washington, D. C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2005). *Guía para el diseño y la construcción de capas estructurales de pavimentos estabilizadas mediante procesos químicos*. Bogotá.
- Almeida Navarrete, F. J., & Sánchez Quintero, E. A. (2011). *Estabilización de Suelos con el uso de Emulsiones Asfálticas Catiónicas de Rotura Lenta. Caso de Estudio Vía Las Mercedes-Puerto Nuevo, Provincia de Santo Domingo de los Tsachilas*. Trabajo de Graduación, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Escuela de Civil, Quito.
- Arulrajah, A., Piratheepan, J., & Disfani, M. M. (1 de Febrero de 2014). Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Concrete Aggregate Blends in Pavement Subbases: Laboratory and Field Evaluation. *Journal of Material in Civil Engineering*, 26(2).
- Australian Stabilisation Industry Association Ltd (ASIA). (2000). *Selection of Stabilisation Methods for Roadworks, Supplementary Notes to the Austroads Guide to Stabilisation in Roadworks*.
- Barnhardt, B. (Marzo/Abril de 2005). One Way to a Better Road. *Public Roads*, 25-29.
- Blázquez Martínez, J. M. (1978). *Historia Económica de la Hispania Romana*. Madrid, España: Ediciones Cristiandad.
- CIOH, C. d. (2015). *CIOH Oceanografía Operacional*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2015, de <http://www.cioh.org.co/meteorologia/Climatologia/ResumenCartagena4.php>



de Solminihac T., H., Echeverría G., G., & Thenoux Z., G. (1989). *Estabilización Química de Suelos: Aplicaciones en la construcción de estructuras de pavimentos*. Recopilación Bibliográfica, Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento Ingeniería de Construcción, Santiago, Chile.

INVIAS. (2013). Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras. Colombia.

Mofreh F., S. (2007). Cost Evaluation of Foam Bitumen and other Stabilisation Alternatives. *International Journal of Pavement Engineering*.

Mohamed Asi, I. (Septiembre-Octubre de 2001). Stabilization Of Sebkha Soil Using Foamed Asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 13(5).

Root, R. E. (1979). *A basic asphalt emulsion manual*. College Park, Maryland, Estados Unidos: The Asphalt Institute.

Rosero Alvarado, F. D. (2013). *Bases Estabilizadas con Emulsión Asfáltica para Pavimentos (Aplicación Calle Nogales Parroquia Nayón L= 1.0 Km)*. Trabajo de Graduación, Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática, Quito.

Sánchez Sabogal, F. (2005). *Diseño de Pavimentos Asfálticos para Calles y Carreteras*. Conferencia Magistral, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Facultad de Ingeniería Civil, Bogotá.

Sánchez Sabogal, F. (2005). *Materiales para Base y Subbase*. Conferencia Magistral, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Facultad de Ingeniería Civil, Bogotá.

Secret. de Estado de Infraestruc, Transporte y Viv, Secret. General de Infraestructuras, & Dirección General de Carreteras. (2015). *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes*. Informe Gubernamental, Gobierno de España, Ministerio de Fomento.

Suárez Díaz, J. (2012). *Estabilización de Suelos*. Seminario, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.



- Taha, R., Al-Harthy, A., Al-Shamsi, K., & Al-Zubeidi, M. (Mayo/Junio de 2002). Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(3).
- Torres Gracia, A. I. (2014). *Propuesta Metodológica para la Evaluación y Mejoramiento, con Emulsión Asfáltica y/o Cemento, de los Materiales Granulares Existentes en las Vías Terciarias*. Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Ingeniería, Bogotá.
- Torres Ortega, R. (2015). *Asfalto*. Conferencia Magistral, Universidad de Cartagena, Programa de Ingeniería Civil, Cartagena.
- Torres Ortega, R. (2015). *Diseño Pavimentos Flexibles*. Conferencia Magistral, Universidad de Cartagena, Programa de Ingeniería Civil, Cartagena.
- Torres Ortega, R. (2015). *Materiales de Construcción*. Conferencia Magistral, Universidad de Cartagena, Programa de Ingeniería Civil, Cartagena.
- U.S. Department of the Army, United States Department of the Air Force, & Navy U. S. Navy. (2004). *Soil Stabilization for Pavements*. Estados Unidos: University Press of the Pacific.



## **ANEXOS**

### **Anexo 1. Material Seleccionado Calcáreo (Zahorra).**



### **Anexo 2. Emulsión Asfáltica.**





**Anexo 3.** Pesado del Material Seleccionado.



**Anexo 4.** Lavado del Material Seleccionado.





**Anexo 5.** Ensayo de Granulometría.



**Anexo 6.** Ensayo de Desgaste de Los Ángeles.





**Anexo 7.** Ensayo de Equivalente de Arena.



**Anexo 8.** Ensayo de Límites de Atterberg.





**Anexo 9.** Ensayo de Próctor y CBR.



**Anexo 10.** Preparación Briqueta para Ensayo de Inmersión-Compresión.





**Anexo11.** Máquina de Compresión Simple Inconfinada.



**Anexo 12.** Briqueta Preparada para Ensayo de Inmersión Compresión.

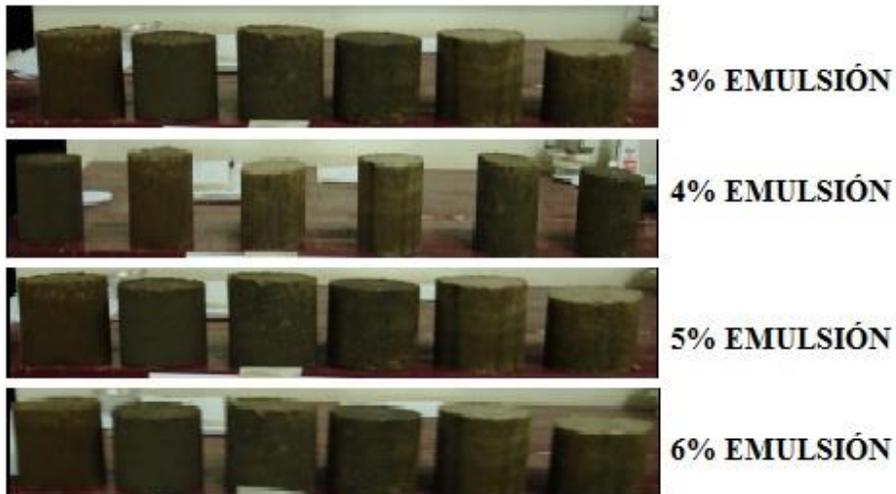




**Anexo 13.** Tamices Utilizados para Ensayo de Inmersión-Compresión.



**Anexo 14.** Briquetas con 3%, 4%, 5% y 6% de emulsión.





**Anexo 15.** Ensayo de Compresión a briquetas preparadas.

