



UNIVERSIDAD DE CUENCA

**Facultad de Ingeniería
Carrera de Ingeniería Civil**

**Análisis de reciclado en frío de pavimentos para vías de bajo volumen
de tráfico en la provincia del Azuay**

**Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero Civil**

Autores:

Danny Xavier Campoverde Espinoza

C.I.: 0107046575

danx121@hotmail.com

Johanna Alexandra Uyaguari Perea

C.I.: 0105701346

alexa17uyaguari@hotmail.com

Director:

Ing. Jaime Asdrúbal Bojorque Iñiguez, Phd

C.I.: 0102857885

**Cuenca – Ecuador
23 de febrero de 2021**



RESUMEN

El presente trabajo de titulación propone la rehabilitación de pavimentos deteriorados utilizando material reciclado obtenido del fresado de la carpeta asfáltica de la vía a rehabilitar. La vía seleccionada es la Guangarcucho – Jadán, la cual cuenta con un diseño de rehabilitación realizado por la empresa ASFALTAR EP, por lo que a través de este estudio se plantea una comparativa entre los dos diseños considerando los aspectos constructivos y económicos.

Como parte del desarrollo del estudio se evalúa las características del material fresado, mediante el ensayo de granulometría para determinar si éste se puede utilizar como material tipo base. Se realiza el ensayo Proctor Modificado para conocer la densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad; además, se realiza el ensayo de extracción de asfalto residual para determinar la cantidad de asfalto contenido en la muestra. Otros ensayos realizados son ensayo de abrasión, gravedad específica de fino y gruesos y CBR.

El material fresado es estabilizado con dos agentes estabilizadores; el cemento Holcim Base Vial, y la emulsión asfáltica CSS-REC. La mezcla estabilizada con el primer agente es sometida al ensayo de compresión simple para conocer su resistencia a los 7 y 28 días; mientras que la mezcla estabilizada con emulsión es sometida al ensayo Marshall para conocer su estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos. Estas mezclas son validadas con las especificaciones de la norma MOP-001-F 2002. La mezcla que obtuvo mejores características es la mezcla con 5% de cemento Base Vial con respecto al peso del agregado; ya que ésta alcanzó una resistencia de 27.14 kg/cm² siendo considerada dentro del diseño de rehabilitación.

El diseño se basa en el método AASHTO 1993, obteniéndose el número estructura que alcanzará el diseño de rehabilitación planteado con material reciclado, el cual debe cumplir con el número estructural requerido determinado por la empresa ASFALTAR EP. Finalmente, se detalla el presupuesto de ambas rehabilitaciones y la diferencia que existe entre ellas; mostrándose claramente los beneficios económicos que brinda el reciclado de pavimentos donde se puede ver un ahorro de \$56,776.94 con respecto a la rehabilitación actual. De esta manera se evidencia que el reciclado de este material brinda un beneficio económico para el proyecto.

PALABRAS CLAVE: Material fresado. Rehabilitación. Estabilización. Cemento. Emulsión asfáltica. Número estructural. Económico.



ABSTRACT

The following degree work proposes the rehabilitation of deteriorated pavements using recycled material obtained from milling the asphalt layer of the road to be rehabilitated. The road of interest is the Guangarcucho - Jadán, which has a rehabilitation design carried out by the ASFALTAR EP company. It will be compared with the rehabilitation proposed in this study in terms of constructive and economic aspects.

As part of the development of this work, the characteristics of the milled material are evaluated, by means of the granulometry test to determine if it fits as a base-type material. The Modified Proctor test is also performed to know the maximum dry density and optimum moisture content. Moreover, the residual asphalt extraction test is performed to determine the amount of asphalt contained in the sample. Other tests carried out were abrasion resistance, specific gravity of fine and coarse aggregates, and CBR.

The milled material was stabilized with two stabilizing agents: Holcim Base Vial cement and CSS-REC asphalt emulsion. The mixture stabilized with the first agent was subjected to the Simple Compression test to acquire its resistance at 7 and 28 days; while the mixture stabilized with asphalt emulsion was subjected to the Marshall test to acquire its stability, flow and percentage of voids. These mixtures were validated with the specifications of MOP-001-F 2002 standard. The mixture that obtained the best characteristics was the mixture with 5% of Base Vial cement with respect to the weight of the aggregate; since it reached a resistance of 27.14 kg/cm² under consideration within the rehabilitation design.

The design is based on the AASHTO 1993 method, obtaining the Structure Number that the rehabilitation design proposed with recycled material will achieve, which must be in accordance with the required Structural Number determined by the ASFALTAR EP company. Finally, the budget for both rehabilitations and the difference between them is detailed, demonstrating the economic benefits provided by recycling pavements where one can note a budget saving of \$56,776.94 with respect to the current rehabilitation. In this way, it is evident that the recycling of this material provides an economic benefit for the project.

KEYWORDS: Milled material. Rehabilitation. Stabilization. Cement. Asphalt emulsion. Structural number. Economic.



ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN INICIAL DEL TEMA DE ESTUDIO	14
1. INTRODUCCIÓN	14
1.1. ANTECEDENTES	14
1.2. ANÁLISIS DEL PROBLEMA.....	16
1.3. JUSTIFICACIÓN	16
1.4. OBJETIVOS	17
1.4.1. Objetivo General	17
1.4.2. Objetivos Específicos	17
1.5. ALCANCE.....	18
1.6. ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	18
CAPÍTULO II: CONCEPTOS BÁSICOS DE RECICLADO DE PAVIMENTOS	20
2. MARCO TEÓRICO	20
2.1. Reciclado de pavimentos.....	20
2.2. Reciclado en frío	21
2.3. Beneficios del reciclado en frío de pavimentos	24
2.4. Agentes Estabilizadores.....	25
2.4.1. Estabilización con cemento	25
2.4.2. Estabilización con emulsión asfáltica	26
2.5. METODOLOGÍA.....	28
CAPÍTULO III: CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL FRESADO.	30
3. DESCRIPCIÓN GENERAL	30
3.1. GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL FRESADO – NORMA INEN 696.....	32
3.2. LÍMITES DE ATTERBERG, NORMA ASTM D4318	37
3.2.1. LÍMITE LÍQUIDO.....	37
3.2.2. LÍMITE PLÁSTICO (LP).....	40
3.3. CLASIFICACIÓN DE SUELOS, MÉTODO AASHTO M145	43
3.4. GRAVEDAD ESPECÍFICA DE GRUESOS, NORMA ASTM 127C	44
3.5. GRAVEDAD ESPECÍFICA DE FINOS, NORMA ASTM 128C	47
3.6. ENSAYO DE ABRASIÓN, NORMA NTE INEN 0860 (2011).....	50
3.7. ENSAYO DE COMPACTACIÓN (PROCTOR MODIFICADO) – NORMA ASTM D1557.....	53



3.8. PORCENTAJE DE EXTRACCION DEL ASFALTO – NORMA ASTM D 2172 (1995).....	58
3.9. GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL DE LA EXTRACCIÓN.....	63
3.10. CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) – NORMA ASTM D1883.....	65
3.11. EXTRACCIÓN DE NÚCLEOS	71
CAPÍTULO IV: ELABORACIÓN DE MEZCLAS CON CEMENTO Y EMULSIÓN ASFÁLTICA	76
4. GENERALIDADES	76
4.1. DISEÑO DE MEZCLAS	78
4.1.1. DISEÑO CON CEMENTO HOLCIM BASE VIAL.....	78
4.1.2. DISEÑO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA	88
CAPÍTULO V: DISEÑO DE LA ALTERNATIVA DE REHABILITACIÓN	94
5.1. ESTUDIO DEL TRÁFICO	94
5.1.1. TRÁFICO PROMEDIO DIARIO ANUAL (TPDA) Y PROYECCIONES DEL TRÁFICO.....	94
5.1.2. FACTOR DE CARGA.....	95
5.1.3. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES	96
5.2. DISEÑO DE LA REHABILITACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE LA AASHTO – 1993.....	98
5.2.1. FÓRMULA AASHTO 1993.....	98
5.2.2. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS	100
5.2.3. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO ESTRUCTURAL REQUERIDO	102
5.3. DETERMINACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO	104
5.3.1. NÚMERO ESTRUCTURAL REAL – PRIMERA Y SEGUNDA ETAPA.....	105
5.3.2. NÚMERO ESTRUCTURAL REAL – SEGUNDA ETAPA (ALTERNATIVA DE REHABILITACIÓN)	109
5.4. PRESUPUESTO DE CADA ALTERNATIVA DE REHABILITACIÓN	111
5.4.1. PRESUPUESTO REHABILITACIÓN ACTUAL	111
5.4.2. PRESUPUESTO ALTERNATIVA DE REHABILITACIÓN (RECICLADO)...	112
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	114
REFERENCIAS	117
ANEXOS.....	119
ANEXO I-a: Curvas Granulométricas.....	119
ANEXO II-a: Nomogramas.	121
ANEXO III-a: Presupuesto Rehabilitación Actual.	124
ANEXO III-b: Presupuesto Alternativa de Rehabilitación (Reciclado).....	130



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Proceso de reciclado en frío. Fuente: (Wirtgen Group, 2004).	22
Ilustración 2: Categorías de reciclado en frío. Fuente: (Wirtgen Group, 2004).	23
Ilustración 3: Ubicación vía Guangarcucho - Jadán.	30
Ilustración 4: Ubicación de extracción de muestras.	31
Ilustración 5: Colocación del material en la tamizadora mecánica.	33
Ilustración 6: Serie de tamices para árido fino.	34
Ilustración 7: Colocación del material en la Cuchara de Casagrande.	38
Ilustración 8: Elaboración de la ranura en la muestra.	39
Ilustración 9: Formación de cilindros para límite plástico.	41
Ilustración 10: Colocación del material en el picnómetro.	45
Ilustración 11: Picnómetro en baño maría.	45
Ilustración 12: Armado del cono con el material.	48
Ilustración 13: Verificación del estado SSS.	48
Ilustración 14: Máquina de los Ángeles.	51
Ilustración 15: Preparación del material para ensayo de Proctor modificado.	55
Ilustración 16: Determinación del peso del material compactado.	55
Ilustración 17: Colocación de la gasolina en el equipo de extracción.	59
Ilustración 18: Balde para recoger la gasolina residual de extracción.	60
Ilustración 19: Aspectos finales del ensayo.	60
Ilustración 20: Separación de la muestra adherida a las paredes del equipo.	61
Ilustración 21: Productos del ensayo de extracción.	61
Ilustración 22: Prensa Marshall.	72
Ilustración 23: Remoción de aire mediante el equipo RICE.	73
Ilustración 24: Especímenes para ensayo de Compresión Simple.	83
Ilustración 25: Equipo Marshall.	89
Ilustración 26: Probetas Marshall - mezclas con emulsión asfáltica.	93
Ilustración 27: Esquema de parámetros considerados para la ecuación del número estructural (SN).	100
Ilustración 28: Número estructural según programa AASHTO 93 – Primera etapa.	103
Ilustración 29: Número estructural según programa AASHTO 93 – Segunda etapa.	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Determinación de la Humedad Natural del material fresado.	32
Tabla 2: Tamaño de la muestra. Fuente: (INEN: Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011).	32
Tabla 3: Análisis granulométrico - Muestra 1.	35
Tabla 4: Análisis granulométrico - Muestra 2.	36
Tabla 5: Resultados de Límite Líquido.	40
Tabla 6: Determinación de límite plástico.	42
Tabla 7: Clasificación de suelos según AASHTO. Fuente: Norma ASTM D-3282	43
Tabla 8: Datos obtenidos durante el ensayo gravedad específica de gruesos.	47
Tabla 9: Resultados del ensayo de gravedad específica de gruesos.	47
Tabla 10: Datos obtenidos durante el ensayo gravedad específica de finos.	50
Tabla 11: Resultados del ensayo gravedad específica de finos.	50
Tabla 12: Graduación para ensayo de abrasión. Fuente: (NTE INEN 860, 2011).	52



Tabla 13: Número de esferas para cada gradación. Fuente: (NTE INEN 860, 2011).	52
Tabla 14: Determinación del desgaste del material.	53
Tabla 15: Especificaciones de la prueba Proctor modificada. Fuente: (Das, 2015)	54
Tabla 16: Determinación de la humedad inicial de la muestra.	56
Tabla 17: Resultados del ensayo de Proctor modificado.	57
Tabla 18: Porcentaje de Asfalto residual - Muestra 1: fino.	62
Tabla 19: Porcentaje de Asfalto residual - Muestra 2: fino.	62
Tabla 20: Porcentaje de Asfalto residual - Muestra 1: grueso.	63
Tabla 21: Porcentaje de Asfalto residual - Muestra 2: grueso.	63
Tabla 22: Porcentaje de Asfalto residual - Muestra 1: completa.	63
Tabla 23: Análisis granulométrico - Material de extracción.	64
Tabla 24: Pesos iniciales de materiales para mezcla.	67
Tabla 25: Humedad del material antes de la inmersión de moldes.	68
Tabla 26: Cálculo de Esponjamiento del material sumergido.	68
Tabla 27: Resultados del Ensayo de Penetración.	69
Tabla 28: Humedad del material después de la inmersión de moldes.	69
Tabla 29: Determinación de CBR.	70
Tabla 30: Determinación de densidades.	71
Tabla 31: Resultados finales del ensayo CBR.	71
Tabla 32: Características de los núcleos extraídos.	72
Tabla 33: Resultados ensayo Marshall.	73
Tabla 34: Cálculo de la gravedad teórica máxima (Gmm).	74
Tabla 35: Resultados finales del ensayo Marshall.	75
Tabla 36: Intervalos normales de cemento. Fuente: (Garber & Hoel, 2002)	78
Tabla 37: Resultados del ensayo Proctor Modificado con 3% de cemento.	79
Tabla 38: Resultados del ensayo Proctor Modificado con 5% de cemento.	80
Tabla 39: Cantidad de material que componen cada mezcla.	82
Tabla 40: Resistencias mínimas por tipo de suelo estabilizado con Base Vial. Fuente: (Holcim Ecuador S.A., 2018).	83
Tabla 41: Resultados de ensayo a Compresión Simple - 7 días.	84
Tabla 42: Resultados de ensayo a Compresión Simple - 28 días.	84
Tabla 43: Porcentaje óptimo de cemento.	84
Tabla 44: Humedad del material antes de la inmersión de moldes.	85
Tabla 45: Cálculo de Esponjamiento.	85
Tabla 46: Resultados del Ensayo de Penetración.	85
Tabla 47: Humedad del material después de la inmersión de moldes.	86
Tabla 48: Determinación de CBR.	87
Tabla 49: Determinación de densidades.	88
Tabla 50: Resultados finales de ensayo CBR.	88
Tabla 51: Resultados de densidades y ensayo Marshall.	89
Tabla 52: Cálculo de la gravedad teórica máxima (Gmm).	90
Tabla 53: Resultados finales - 2% emulsión asfáltica.	90
Tabla 54: Resultados finales - 3% emulsión: agua.	91
Tabla 55: Resultados finales - 4% emulsión: agua.	91
Tabla 56: Proyecciones del volumen de tráfico para el periodo de diseño, vía Guangarcucho-Jadán. Fuente: ASFALTAR EP.	95
Tabla 57: Tasas para proyección de vehículos. Fuente: ASFALTAR EP.	95
Tabla 58: Determinación del factor de carga equivalente. Fuente: ASFALTAR EP.	96
Tabla 59: Número de ejes simples equivalentes para el periodo de diseño. Fuente: ASFALTAR EP.	



.....98

Tabla 60: Niveles de confiabilidad sugeridos para varias clasificaciones funcionales. Fuente: (AASHTO, 1993). 100

Tabla 61: Valores de la desviación estándar normal Z_R correspondientes a niveles seleccionados de confiabilidad R. Fuente: (AASHTO, 1993). 101

Tabla 62: Valores recomendados por la AASHTO para el índice de servicio. 102

Tabla 63: Determinación del Número estructural - Primera etapa. Fuente: Asfaltar EP. 103

Tabla 64: Determinación del Número estructural - Segunda etapa. Fuente: Asfaltar EP. 104

Tabla 65: Valores de coeficiente estructural (a_i) recomendados por la AASHTO 93. Fuente: (AASHTO, 1993). 106

Tabla 66: Valores de m_i recomendados para los coeficientes de capa en pavimentos flexibles. Fuente: (AASHTO, 1993). 107

Tabla 67: Datos para determinar el SN - Primera etapa. Fuente: ASFALTAR EP. 107

Tabla 68: Datos para determinar el SN - Segunda etapa. Fuente: ASFALTAR EP. 108

Tabla 69: Datos para determinar el SN - Alternativa de rehabilitación (reciclado). 110

Tabla 70: Resumen de Números Estructurales. 110

Tabla 71: Presupuesto Rehabilitación Actual. 112

Tabla 72: Presupuesto Alternativa de Rehabilitación (Reciclado). 113

Tabla 73: Comparación de presupuestos entre rehabilitaciones. 113

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Curva granulométrica, muestra 1 36

Gráfica 2: Curva granulométrica, muestra 2 37

Gráfica 3: Curva - Límite Líquido 40

Gráfica 4: Carta de plasticidad. Fuente: (Das, 2015). 43

Gráfica 5: Curva de compactación. 57

Gráfica 6: Curva granulométrica - material de extracción. 65

Gráfica 7: Curva de compactación con 3% de cemento. 80

Gráfica 8: Curva de compactación con 5% de cemento. 81

Gráfica 9: Estabilidad vs % Emulsión Asfáltica. 92

Gráfica 10: Flujo vs % Emulsión Asfáltica. 92

Gráfica 11: % Vacíos vs % Emulsión Asfáltica. 92

Gráfica 12: Esquema de la estructura inicial del pavimento - Primera etapa. 108

Gráfica 13: Esquema de la estructura rehabilitada propuesta en el diseño del pavimento (Segunda etapa). 109

Gráfica 14: Esquema de la estructura rehabilitada reciclando la capa de rodadura. 110



CLÁUSULA DE DERECHOS DE AUTOR



Universidad de Cuenca
Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Danny Xavier Campoverde Espinoza, en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Análisis de reciclado en frío de pavimentos para vías de bajo volumen de tráfico en la provincia del Azuay", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 23 de febrero de 2021

Danny Xavier Campoverde Espinoza

C.I: 0107046575



CLÁUSULA DE DERECHOS DE AUTOR

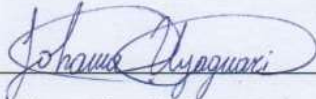


Universidad de Cuenca
Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Johanna Alexandra Uyaguari Perea, en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Análisis de reciclado en frío de pavimentos para vías de bajo volumen de tráfico en la provincia del Azuay", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 23 de febrero de 2021



Johanna Alexandra Uyaguari Perea

C.I: 0105701346



CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL



Universidad de Cuenca Cláusula de Propiedad Intelectual

Danny Xavier Campoverde Espinoza, autor/a del trabajo de titulación "Análisis de reciclado en frío de pavimentos para vías de bajo volumen de tráfico en la provincia del Azuay", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 23 de febrero de 2021

Danny Xavier Campoverde Espinoza

C.I: 0107046575



CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL



Universidad de Cuenca
Cláusula de Propiedad Intelectual

Johanna Alexandra Uyaguari Perea, autor/a del trabajo de titulación "Análisis de reciclado en frío de pavimentos para vías de bajo volumen de tráfico en la provincia del Azuay", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 23 de febrero de 2021

Johanna Alexandra Uyaguari Perea

C.I: 0105701346



AGRADECIMIENTO

Agradecemos a todas las personas e instituciones que ayudaron en la elaboración de este trabajo de titulación, a la empresa Asfaltar EP por abrirnos las puertas de su laboratorio y brindarnos la información necesaria durante el proceso de esta investigación; de manera muy especial al ingeniero Xavier Tepán, gerente técnico y al laboratorista Edison Maxi.

De igual manera, agradecemos a nuestro director, ingeniero Jaime Bojorque por la ayuda, consejos y recomendaciones brindadas en el desarrollo de este trabajo de titulación.



DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación en primer lugar a Dios, a mis padres por ser los guías y soporte de mi vida, lo más importante, lo que más amo, mi inspiración y porque todo se los debo a ellos, a mis hermanos por sus consejos, ayuda y ánimos en cada paso que he dado, a mi familia por apoyarme en los momentos difíciles, a mi compañera de tesis por todos momentos compartidos y con especial dedicatoria al cielo a esa persona que estará feliz de hacer nuestro sueño realidad.

Danny Campoverde E.

A Dios y a mis padres que han sido mi guía y mi sustento en cada etapa de mi vida, especialmente a mi madre que se ha sacrificado día tras día y mediante su ejemplo me ha ayudado a ser la persona que soy ahora. A mi hermana por cada uno de sus consejos y apoyo ante los problemas que se han presentado, a mi familia por brindarme su ayuda cuando lo he necesitado. A mi compañero de tesis por cada una de las experiencias compartidas, a Marco por su apoyo incondicional y, a Paiwa, Johanna, Jennifer, Carolina y Alejandra por ser un pilar fundamental en mi paso por la universidad ya que han sido verdaderas amigas.

Johanna Uyaguari P.



CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN INICIAL DEL TEMA DE ESTUDIO

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de titulación trata sobre la posibilidad de reciclar el material de pavimentos deteriorados, que en la actualidad es poco aprovechado y casi siempre desechado en el campo de la construcción vial, produciendo un gran impacto tanto económico, social y ambiental. Mediante esta investigación, se quiere dar un mejor uso a este material y con ello reducir los costos en proyectos viales que, lastimosamente, en el país tienen un alto precio, provocando limitaciones al momento de la ejecución de obras que influyen en el desarrollo y calidad de vida de la población. El resultado al que se quiere llegar con este trabajo es a la obtención del diseño de una mezcla sostenible y viable en la provincia del Azuay, y que pueda ser ejecutada o desarrollada por la empresa ASFALTAR EP.

El estudio en el que se basa este trabajo de titulación está desarrollado en la vía Guangarcucho – Jadán, ubicada en las afueras de la ciudad de Cuenca cercana a la carretera Panamericana. Esta vía fue escogida ya que al inicio de este trabajo de titulación se estaba llevando a cabo su rehabilitación por lo que era mucho más fácil la extracción de muestras y las comparaciones subsecuentes entre ambas rehabilitaciones.

1.1. ANTECEDENTES

Las carreteras en el Ecuador son uno de los activos públicos más importantes en el país, debido a que garantizan el desarrollo local y la calidad de vida de sus habitantes por medio de la construcción, rehabilitación y mantenimiento de sus redes viales. Actualmente, la red vial del Ecuador tiene una extensión de 42.000 km, sin tomar en consideración las vías urbanas (Banco de Desarrollo de América Latina, 2020).

La provincia del Azuay cuenta con 15 cantones y 61 parroquias rurales, estas últimas son administradas por Gobiernos Autónomos Descentralizados Parroquiales para la promoción del desarrollo y la garantía del buen vivir, a través



del ejercicio de sus competencias (Constitución de la República del Ecuador, 2008). Dentro de las competencias exclusivas de los gobiernos parroquiales rurales, está la de “planificar y mantener, en coordinación con los gobiernos provinciales, la vialidad parroquial rural”; así como la de “planificar junto con otras instituciones del sector público y actores de la sociedad el desarrollo parroquial y su correspondiente ordenamiento territorial” (Constitución de la República del Ecuador, 2010).

En la provincia del Azuay existen elevados costos en la pavimentación y rehabilitación de vías, por lo que no se pueden ejecutar varios proyectos que son necesarios para el desarrollo y mejora de la calidad de vida de la población. Por ello, ha surgido la necesidad de encontrar un método más económico, pero con igual o mejor eficiencia y calidad que los métodos utilizados tradicionalmente en base a proyectos e investigaciones realizadas anteriormente tanto en el país como fuera de éste.

Algunas de estas investigaciones son: la comparación de aditivos comerciales para optimizar la estabilización de un material de afirmado, realizada por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, el Programa de Caminos Básicos que se experimenta en Chile (Campagnoli, 2017), el reciclado de asfalto en Estados Unidos que se ha convertido en el método más utilizado, generando grandes ahorros económicos (Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), 2014), entre otros.

Las técnicas de reciclado se impulsaron desde Estados Unidos y se han extendido hasta Alemania, Holanda, Dinamarca y Suiza, que son, actualmente, los países europeos con mayor utilización de materiales reciclados (Chicaiza Sambonino, 2013). A nivel nacional y local, muy pocos son los proyectos en los que se realiza un proceso de reciclado de la carpeta asfáltica con la base granular existentes estabilizando con agentes ligantes; estas mezclas son usadas solo para el bacheo de las vías.

Los procesos más utilizados en la actualidad que ayudan a rehabilitar el estado de una vía en deterioro son bacheos, repavimentaciones y reposiciones de carpeta



asfáltica; que en la mayoría de casos solo dan soluciones momentáneas a altos costos. Por ello, con el reciclado de la capa de rodadura se pretende mejorar las propiedades de los pavimentos con bajo precio, mayor durabilidad y mínimo impacto ambiental (Jugo B., 2005).

1.2. ANÁLISIS DEL PROBLEMA

Tanto en la provincia del Azuay como en el país, el alto costo de los pavimentos es el principal obstáculo para tener vías de primer orden, al igual que el bajo presupuesto con el que cuentan las entidades públicas o privadas que trabajan en este campo. Además, la constante alza en los precios de las materias primas, en especial de los agregados y del crudo de petróleo, la escasez de los mismos, el alto gasto energético que se requiere para la construcción de estas estructuras y el gran impacto ambiental que conllevan estos procesos son los problemas más importantes que se desean mitigar a la hora de la construcción de pavimentos (Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), 2014).

La falta de tecnología en el medio, la maquinaria adecuada y especializada y el personal capacitado dificultan la fabricación de pavimentos con gran periodo de vida útil y de calidad a precios accesibles lo que limita el desarrollo del país (Dávila, 2017). A diario, se realizan investigaciones con el objetivo de mejorar la calidad de los pavimentos, pero a un costo menor y con ello, analizar la posibilidad de ejecutar un mayor número de obras en diferentes carreteras del país, mejorando la calidad de vida de los habitantes a sus alrededores (Jaramillo, 2015).

1.3. JUSTIFICACIÓN

Las soluciones que se pretenden dar con la aplicación del reciclaje de pavimentos son: Pavimentos más duraderos, resistentes y con mayor vida útil; menor acarreo de material; menor explotación e impacto ambiental; mejorar el nivel de servicio vial, entre otros (Jaramillo, 2015).

Además, con el análisis de las mezclas que se pretenden obtener por medio de diferentes tratamientos y mejoramientos, se busca desarrollar un proyecto



sostenible e innovador que sea aplicable a nivel local y por qué no, en un futuro a nivel nacional. Siguiendo el ejemplo de Estados Unidos, donde esta técnica es una de las más utilizadas en la construcción y rehabilitación de pavimentos (Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), 2014).

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. *Objetivo General*

El objetivo principal planteado del presente trabajo de titulación es: analizar el reciclado más viable de pavimentos antiguos con la finalidad de ser empleados en pavimentos en vías de bajo volumen de tráfico de la provincia del Azuay, que pueden ser implementadas por la empresa pública ASFALTAR EP.

1.4.2. *Objetivos Específicos*

Para lograr el objetivo general se han planteado los siguientes objetivos específicos a ser cumplidos, dentro de los cuales están:

- Investigar las diferentes alternativas existentes para el reciclado de pavimentos.
- Caracterizar el material residual que es obtenido del fresado de los pavimentos de bajo volumen de tráfico.
- Evaluar y diseñar mezclas obtenidas al agregar al material reciclado emulsión asfáltica y cemento vial, las cuales deben cumplir con las especificaciones técnicas requeridas.
- Realizar el diseño de la rehabilitación con material reciclado.
- Comparar el diseño de la rehabilitación utilizando material reciclado con la rehabilitación actual que realiza la empresa ASFALTAR EP desde el punto físico-mecánico y económico.

La investigación, está encaminada a la reducción de costos e impacto ambiental por medio del reciclaje de pavimentos dentro de la provincia del Azuay, y con ello mejorar la calidad y vida útil de las vías.



1.5. ALCANCE

En el siguiente trabajo de titulación se estudia el reciclado de pavimentos con la finalidad de emplear el material en la construcción de una nueva estructura de pavimento.

Primeramente, se realizará la extracción de 3 núcleos de la vía para conocer el espesor de la carpeta asfáltica y la cantidad de asfalto residual contenida en ella, así como los ensayos necesarios para caracterizar el material fresado. Además, se diseñará mezclas con agentes estabilizadores con 3 diferentes porcentajes de cemento, y 3 diferentes porcentajes de emulsión asfáltica.

Finalmente, se analizarán los presupuestos y procesos constructivos, de cada una de las rehabilitaciones, con la finalidad de conocer las diferencias entre los procesos convencionales y la rehabilitación propuesta, tanto en el aspecto constructivo como económico.

1.6. ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

El presente estudio se divide en cinco capítulos de trabajo. Un breve resumen de los objetivos de cada capítulo y las actividades de trabajo se dan a continuación:

Capítulo I: Introducción, antecedentes del uso de material reciclado y aspectos teóricos hasta el momento en este tema y objetivos planteados para el desarrollo del trabajo de titulación.

Capítulo II: Marco teórico donde se detalla la ubicación de la vía a estudiarse, y conceptos necesarios para entender el tema a ser desarrollado. Además, se presenta la metodología a seguir para el cumplimiento de los objetivos planteados.

Capítulo III: Se da la caracterización del material residual obtenido del fresado del pavimento en vías de bajo volumen de tráfico de diferentes puntos de la provincia del Azuay. Con las muestras obtenidas, se realizan los estudios y ensayos para determinar sus propiedades y características, para luego compararlas con las especificaciones y exigencias que establece el MTOP.



Capítulo IV: Se detallan las características de los materiales y agentes estabilizadores a utilizar, tanto de la emulsión asfáltica como del cemento vial (Holcim Base vial); asimismo se procede a la dosificación de emulsiones asfálticas y cemento; por último, se diseñan las mezclas con el material reciclado.

Finalmente, se realizan ensayos de laboratorio con los cuales se busca cumplir los parámetros, normativas y especificaciones de bases estabilizadas con emulsión y cemento.

Capítulo V: Se presenta el diseño de la alternativa de rehabilitación planteada, recopilación de resultados y comparación con la rehabilitación actual; además, se analiza la viabilidad de su realización, considerando los factores constructivo y económico.

Finalmente, se presenta el capítulo de conclusiones y recomendaciones.



CAPÍTULO II: CONCEPTOS BÁSICOS DE RECICLADO DE PAVIMENTOS

Este capítulo está encaminado a la descripción de conceptos básicos acerca del reciclado de pavimentos, sus funciones, aplicaciones y beneficios en la rehabilitación de vías en deterioro. Se trata sobre los agentes estabilizadores que se usan en la estabilización de este tipo de materiales. Además, se establece la metodología a seguir en este trabajo de titulación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Reciclado de pavimentos

El pavimento asfáltico reciclado, también conocido como RAP (Recycled Asphalt Pavement), es un material que se obtiene del fresado de las vías que ya han cumplido su vida útil y necesitan ser rehabilitadas. El reciclado es un procedimiento en el cual se emplea parte o la totalidad de la estructura del pavimento para la fabricación de una nueva mezcla que tenga igual o mejor calidad que la existente. Esta mezcla se convierte en una base estabilizada ya sea con cemento, asfalto o algún otro material (Tafur Garro, 2005).

Existen varios tipos de reciclados de pavimentos (Tafur Garro, 2005):

a. Fresado en frío (Cold Milling)

Consiste en triturar de forma controlada el pavimento hasta una profundidad específica para no sacar la capa de base, este material es transportado para ser reciclado en caliente o frío.

b. Reciclado en caliente (Hot Recycling)

Consiste en trasladar el material fresado a una planta que mediante el calor agrega materiales para mejorar la calidad del material reciclado.

c. Reciclado en caliente in-situ (Hot in Place Recycling)

Consiste en ablandar el pavimento por medio del calentamiento, fresarlo y mezclarlo con el nuevo material en caliente sobre una maquinaria.



d. Reciclado en frío (Cold Recycling)

Al igual que las anteriores, consiste en fresar la carpeta asfáltica que será usada como una nueva capa bituminosa mezclada con nuevos materiales que mejorarán sus propiedades. El material fresado se transforma en un agregado bituminoso que se mezcla con emulsión o cemento, se extiende y se compacta formando una nueva capa de la estructura de pavimento. Ésta necesita sobre ella una capa superficial asfáltica.

e. Recuperación capa completa (full-depth reclamation)

Consiste en que la sección completa del pavimento flexible y una porción de los materiales subyacentes son triturados, pulverizados y combinados uniformemente, lo que da como resultado una base estabilizada.

2.2. Reciclado en frío

a. Proceso

Como se indicó anteriormente el reciclado en frío consiste en fresar la carpeta asfáltica a una determinada profundidad, la cual se mezcla ya sea con emulsión asfáltica o con cemento para mejorar sus propiedades mecánicas. Este nuevo material se extiende sobre la vía y se compacta hasta una densidad apropiada (Wirtgen Group, 2004).

Este proceso puede realizarse tanto in situ como planta, para cada una de ellas se requiere distinta maquinaria, ya que el proceso en campo requiere de una máquina recicladora móvil y en planta un mezclador continuo (Wirtgen Group, 2004).

Esta investigación está enfocada al reciclaje en frío de pavimentos In-situ, en la cual se realiza el proceso de fresado de la vía con la recicladora móvil a medida que avanza y a la vez, se incorpora agua que ayuda a que el material reciclado alcance el contenido necesario de humedad. Se pueden incorporar agentes estabilizadores líquidos como lechada cemento/agua o emulsión asfáltica siguiendo el mismo proceso con el cual se incorpora el agua, tal como se representa en la Ilustración 1.

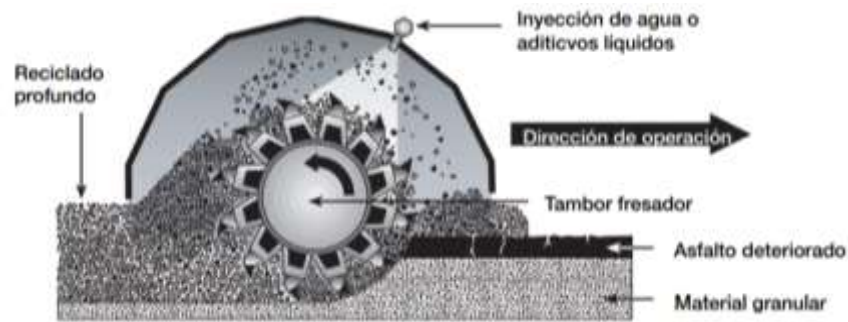


Ilustración 1: Proceso de reciclado en frío. Fuente: (Wirtgen Group, 2004).

Según el “Manual de Reciclado en Frío” de Wirtgen Group el material que sale de la recicladora debe ser compactado mediante un rodillo pesado vibratorio con lo que se alcanzara una densidad uniforme; posteriormente, se perfila el material usando una motoniveladora y finalmente se realiza un compactado final mediante un compactador neumático o un rodillo vibratorio.

b. Aplicación

El proceso de reciclado en frío es muy utilizado en varios países tanto en mantenimiento como en rehabilitación de la infraestructura vial. Del reciclado en frío se tienen dos categorías de las cuales dependen si el material fresado es tratado o no con un agente ligante; y dos categorías más que dependen del tipo de tratamiento que va a recibir el material como se puede ver en la Ilustración 2:

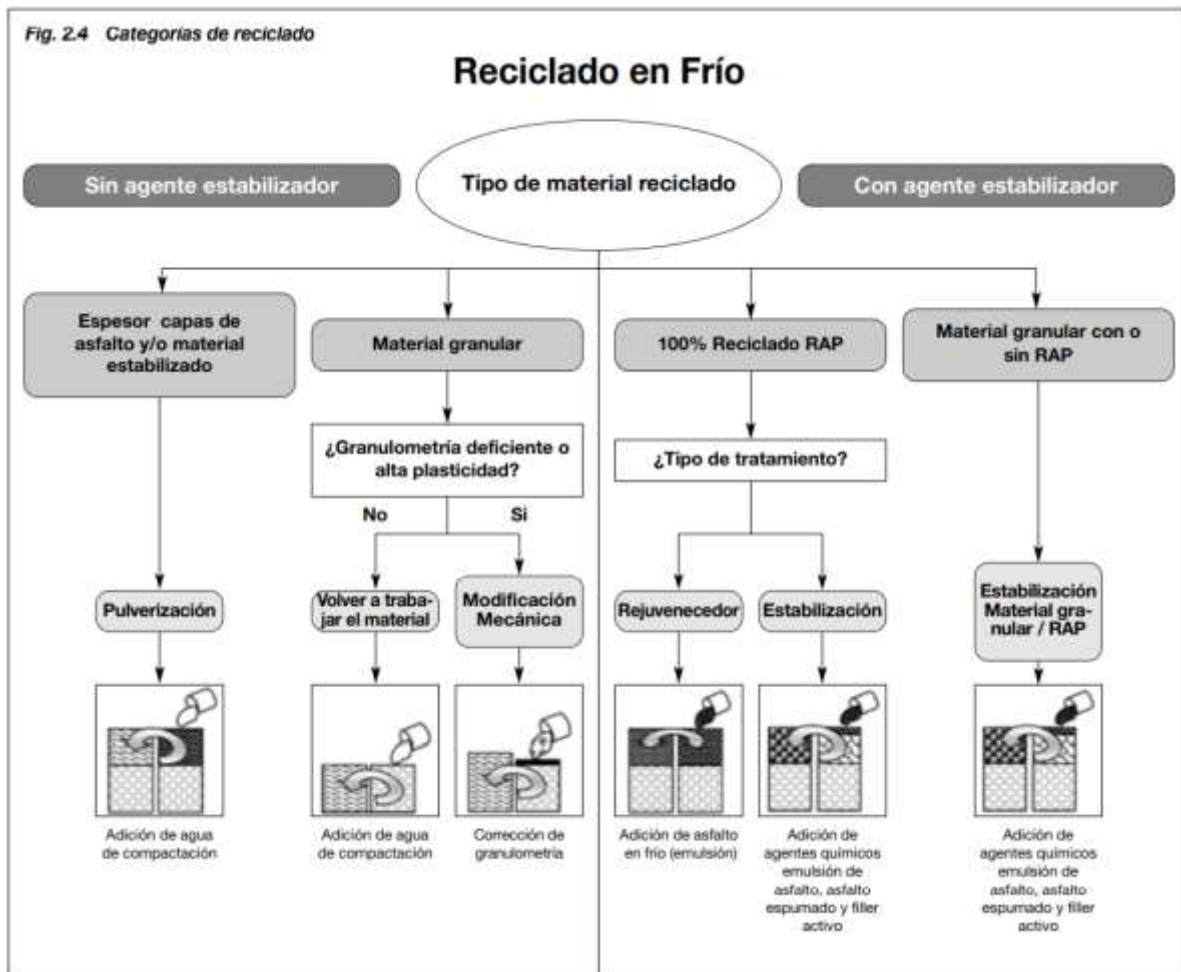


Ilustración 2: Categorías de reciclado en frío. Fuente: (Wirtgen Group, 2004).

En base a la Ilustración 2, se observa que el tipo de material que se va a tratar en este estudio es 100% reciclado RAP, al cual se le aplica un tratamiento basado en la estabilización con ciertos agentes que se detallaran más adelante.

c. Estabilización del RAP

Cuando se recicla un pavimento se debe conocer sus propiedades como por ejemplo su naturaleza y composición del pavimento, granulometría y contenido de asfalto, y las causas y severidad del deterioro. Con este material se pueden aplicar dos tecnologías para su rehabilitación y modificación (Wirtgen Group, 2004):

1. Construcción de una capa de mezcla asfáltica en frío.
2. Estabilización del RAP con cemento, emulsión o asfalto espumado en una capa



más profunda.

Estabilizar un suelo o un material es incorporar a éste un ligante como cal, cemento, asfalto, productos químicos, entre otros; para mejorar sus características mecánicas y conseguir que el material o suelo soporte los esfuerzos impuestos por las cargas de tránsito, además de resistir las condiciones atmosféricas (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2002).

Al estabilizar el material fresado se busca disminuir el espesor de la capa de rodadura que es el rubro más costoso dentro de una obra vial.

2.3. Beneficios del reciclado en frío de pavimentos

Como se detalla en el Manual de Reciclado en Frío del Wirtgen Group (2004, p. 40), existen varios beneficios que genera el reciclaje en frío de pavimentos para su rehabilitación, entre ellos están:

- Factores medio ambientales: al usarse el 100% del material fresado se minimiza el transporte de agregados a la obra y la explotación en minas, así como también, se minimiza el uso de sitios de préstamo y botaderos. Además, el consumo de energía total es reducido de forma drástica al igual que el efecto destructivo que tienen los vehículos de transporte sobre la red vial del lugar.
- Calidad del material reciclado: al mezclarse los agentes estabilizadores con el material fresado se consigue mejorar su calidad y propiedades.
- Poca alteración de la estructura del pavimento: ya que en el reciclado en frío se usa una recicladora móvil, ésta pasa sobre el material expuesto una sola vez, es decir, la capa de base no es afectada por la maquinaria y no es sometida a cargas repetitivas que son las que provocan el levantamiento de este material.
- Menores tiempos de construcción: al realizarse el trabajo de fresado, mezclado y tendido del RAP de manera simultánea se reducen los tiempos de construcción de la obra, así como también las interrupciones de tráfico.



- Costo-efectividad: recopilando todos los beneficios anteriores se concluye que este procedimiento es una alternativa muy viable en la rehabilitación de pavimentos ya que genera una reducción del costo de la obra vial.

2.4. Agentes Estabilizadores

Muchos de los diferentes agentes estabilizadores se utilizan para mejorar las propiedades de los suelos naturales, además de aumentar las propiedades de resistencia, mejorar la durabilidad y el comportamiento frente a efectos del agua y del medioambiente de un material (Wirtgen Group, 2004).

También, en el manual de Wirtgen Group se detalla que, al adicionarse un agente estabilizador a un material recuperado de un pavimento existente, este puede ser mejorado y de esta manera se elimina la necesidad de importar nuevos materiales que cumplan con las resistencias requeridas en la estructura del pavimento rehabilitado.

El objetivo principal de estos agentes es el de ligar las partículas individuales de un agregado para aumentar su resistencia. Hay dos tipos de agentes estabilizadores: cementados y asfálticos. Los agentes estabilizadores cementados aportan rigidez mientras que los asfálticos tienden a producir un material relativamente flexible.

La información sobre la estabilización con cemento y emulsión asfáltica se obtuvo del Manual de Reciclado en Frío de Wirtgen Group (2004, p. 64 – 77).

2.4.1. Estabilización con cemento

El cemento es el agente estabilizador más común y utilizado del mundo debido a su disponibilidad, además que existe una gran cantidad de ensayos y especificaciones con las cuales caracterizarlo.

La función primordial es aumentar la capacidad de soporte, la resistencia que se adquiere al estabilizar con cemento está determinada por la cantidad y el tipo de material que se está estabilizando.

Contrariamente a la percepción de cualquier persona, el agregar más cemento para



aumentar la resistencia puede ser perjudicial para su desempeño. Aumentar la resistencia hace que el material se vuelva frágil con la consecuente reducción de la flexibilidad de la capa estabilizada, dando como resultado la proliferación de grietas ante cargas repetitivas de tráfico.

La resistencia a la compresión y a la tracción alcanzada depende de la cantidad de cemento, el tipo de material y la densidad de compactación. Cuando el cemento entra en contacto con el agua se forman enlaces cristalinos y algunos de estos son destruidos debido a su perturbación durante la compactación lo que reduce la resistencia final de la capa estabilizada.

Por otra parte, estos enlaces tienden a reducir la máxima densidad posible de alcanzar, por ellos es muy importante que el proceso de colocación y compactación sea realizado adecuadamente de forma que se pueda alcanzar la densidad máxima y obtener las resistencias anticipadas.

Además, el material al ser tratado con cemento es propenso a la formación de grietas. Estas grietas pueden darse debido a la retracción y/o al efecto del tráfico.

Cuando se habla de grietas por retracción se tiene que la intensidad y la magnitud del agrietamiento está principalmente influido por el contenido de cemento cuyo aumento incrementa el grado de agrietamiento.

Por otro lado, las capas tratadas con cemento son muy sensibles a las sobrecargas de tránsito ya que es relativamente frágil y presenta una resistencia flexo-tracción baja.

Asimismo, las capas estabilizadas son vulnerables a fallas por aplastamiento si se someten a tránsito pesado antes de que se haya alcanzado suficiente resistencia.

2.4.2. Estabilización con emulsión asfáltica

Una emulsión asfáltica consiste en dos líquidos inmiscibles, uno en la fase dispersa, es decir, pequeños glóbulos de asfalto de 0.001 a 0.01 mm y otro en la fase continua.



La mayoría de emulsiones que se utilizan como estabilizadores tienen un componente de asfalto residual de 60%, que significa que el 60% de su volumen está compuesto de asfalto disperso y un 40% del volumen es agua. No se recomienda que los porcentajes de asfalto sean mayores a 60% cuando se usan en material reciclado ya que la emulsión se vuelve muy viscosa, es más difícil de bombear y por ende se vuelve más difícil que cubra el agregado (Wirtgen Group, 2004).

La principal razón por la que se usa emulsión asfáltica como agente estabilizador es permitir que el asfalto se pueda mezclar con material frío y húmedo de manera efectiva.

Existen tres tipos de emulsión según su carga eléctrica y tres tipos por su velocidad de rotura (Chicaiza Sambonino, 2013):

Según carga eléctrica:

- Emulsión aniónica: producida con emulsificadores cargados negativamente como los ácidos grasos.
- Emulsión catiónica: producida con emulsificadores cargados positivamente como las aminas.
- Emulsión no-iónica: producida con emulsificadores no cargados. Éstas no son utilizadas para el reciclado en frío.

Según velocidad de rotura:

- Emulsión de rotura rápida: se rompen en muy corto tiempo, por lo general en tan solo minutos, por lo cual se usan con mayor frecuencia en tratamientos superficiales.
- Emulsión de rotura media: se mezclan bien con los agregados gruesos y se emplean para carpetas de mezcla en frío.
- Emulsión de rotura lenta: se mezclan bien con agregados finos y se emplea también para mezclas en frío y estabilizaciones asfálticas.



2.5. METODOLOGÍA

En la presente investigación se utilizó el material resultante del fresado del pavimento de la carretera Guangarcucho - Jadán la misma que se encontraba en rehabilitación debido a su avanzado deterioro, además de esto se realizó la extracción de núcleos de la estructura del pavimento.

Con las muestras obtenidas se procedió a la caracterización del material mediante ensayos y pruebas en los laboratorios de la Empresa Pública de Áridos y Asfaltos de la Provincia del Azuay (Asfaltar EP) y en el laboratorio de Geotecnia de la Universidad de Cuenca, para obtener las propiedades físicas y mecánicas que tiene el material estudiado.

Los ensayos realizados en el material granular fueron: Determinación de granulometría para el material granular recuperado (granulometría por tamizado - norma INEN 696), ensayo de determinación de la gravedad específica para material fino (norma ASTM 128C), ensayo de determinación de la gravedad específica para material grueso (norma ASTM 127C), ensayo de determinación de límites de Atterberg (norma ASTM D4318), ensayo de abrasión para conocer el desgaste del material (norma INEN 0860), ensayo Proctor modificado (norma ASTM D1557), ensayo California Bearing Ratio - CBR (norma ASTM D1883) y ensayo de extracción cuantitativa de asfalto residual (norma ASTM D2172). En los núcleos se realizaron ensayos para determinar la densidad Bulk (norma ASTM D1188), el ensayo Marshall (norma ASTM D1559), el ensayo RICE (norma ASTM D2041) y el ensayo de extracción cuantitativa de asfalto residual (norma ASTM D2172).

Con los resultados obtenidos se determinó si el material granular reciclado tiene las características requeridas para ser utilizado como una base estabilizada tanto con asfalto como con cemento, según las normativas y especificaciones técnicas presentadas en el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO).

Posteriormente, se realizó el diseño de las mezclas, en el primer caso con diferentes porcentajes de asfalto para luego analizarlas mediante el ensayo Marshall, el ensayo RICE y determinar la densidad Bulk. De igual forma se realizaron mezclas



con diferentes porcentajes de cemento y el ensayo practicado fue el de compresión simple. Con los resultados y el análisis respectivo se estableció cuál de los dos agentes estabilizadores utilizados brindan mejores características al material reciclado.

Una vez determinado el agente estabilizador, se diseña el paquete estructural de la propuesta de rehabilitación, la cual debe cumplir con el número estructural obtenido por la empresa ASFALTAR EP requerido para la rehabilitación actual. Con esto se concluye que a pesar de que el paquete estructural planteado es diferente sigue siendo capaz de soportar las cargas de tráfico previstas. Estas dos opciones de rehabilitación serán comparadas con el fin de determinar cuál de ellas ayuda a abaratar costos en su ejecución.

CAPÍTULO III: CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL FRESADO.

En el presente capítulo se detalla cada uno de los ensayos realizados para la caracterización del material fresado y los resultados de cada uno de ellos, los cuales serán necesarios para la realización de las mezclas con agentes estabilizadores que se detallan en el capítulo siguiente.

3. DESCRIPCIÓN GENERAL

El material con el cual se realizaron los ensayos fue obtenido de la vía Guangarcucho – Jadán que está localizada al nor-oriente de la provincia del Azuay; es la vía principal que conecta la parroquia Jadán y la vía alterna que une al cantón Cuenca y al cantón Gualaceo, además, da servicio a varias áreas pobladas y mineras, el mapa de su ubicación se puede ver en la Ilustración 3:



Ilustración 3: Ubicación vía Guangarcucho - Jadán.

En esta vía se están realizando trabajos de rehabilitación desde el mes de septiembre del año 2020 por medio del fresado de los baches, reposición de base, compactación, sellado, desalojo de material y tendido de mezcla asfáltica. Cuenta con una longitud de 11.1 km, de la cual se extrajo el material a ser analizado en las abscisas 2+000, 6+500 y 10+500. En la Ilustración 4 se puede observar los puntos de las extracciones en las abscisas 2+000 y 6+500.



Ilustración 4: Ubicación de extracción de muestras.

Del material obtenido de este lugar se determinó su humedad por medio de la norma ASTM D2216, donde se aplica la Ecuación 1:

$$\% \text{ humedad} = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}}$$

Ecuación 1: Contenido de Humedad.

Dando así como resultado una humedad promedio de 1.68%, los datos y resultados del contenido de humedad se detallan en la Tabla 1:

HUMEDAD NATURAL					
Tara	W suelo húmedo (g)	W suelo seco (g)	W tara (g)	Humedad (%)	Humedad promedio (%)
44	115.43	114.40	44.76	1.48	1.68
54	109.40	108.28	42.94	1.71	
46	135.17	133.58	43.90	1.77	
53	107.19	106.08	42.32	1.74	

Tabla 1: Determinación de la Humedad Natural del material fresado.

3.1. GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL FRESADO – NORMA INEN 696

Este ensayo se emplea para determinar la gradación de materiales y el cumplimiento de la distribución granulométrica de las partículas, es decir, determinar las proporciones relativas de los diferentes tamaños de grano presentes en el material analizado (Bowles, 1981).

El ensayo consiste en separar las partículas de una muestra que está en condiciones secas y de masa conocida, a través de una serie de tamices cuyas aberturas están ordenadas de manera descendente. Las masas obtenidas de las partículas mayores a las aberturas de la serie de tamices, expresados en porcentaje de la masa total, permite determinar la distribución de tamaños.

Los equipos que fueron utilizados en el proceso son: Balanza de precisión de 0.1 g, serie de tamices para material grueso y fino, agitador de tamices automático, horno a temperatura uniforme de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

El material antes del ensayo fue secado al aire por algunos días, y se determinó el tamaño de la muestra de acuerdo a la Tabla 2:

Tamaño nominal máximo, Aberturas cuadradas, en mm (pulgadas).	Tamaño de la muestra del ensayo Mínimo (kg)
9,5	1
12,5	2
19,0	5
25,0	10
37,5	15
50	20
63	35
75	60
90	100
100	150
125	300

Tabla 2: Tamaño de la muestra. Fuente: (INEN: Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011).

Al tener un material de tamaño máximo nominal de 1 pulgada se escogió un tamaño de 10 kg. Este ensayo fue realizado dos veces para realizar una comparativa entre ellos.

Se seleccionan los tamices necesarios y adecuados para que cubra con todos tamaños de las partículas que conforman el material. Mientras más tamices se utilicen, mayor información y mejor distribución se tendrá. Se colocaron los tamices 1 ½", 1", ¾", ½", 3/8", No.4 y fondo.

Se instalan los tamices en el agitador mecánico y se coloca la muestra en estos, como se puede ver en la Ilustración 5; y se procede a tamizar por un periodo de tiempo adecuado.



Ilustración 5: Colocación del material en la tamizadora mecánica.

Pasado este tiempo, se determinan las masas retenidas en cada tamiz, la masa total del material después del tamizado debe ser similar a la masa total colocada, la diferencia entre ambas debe ser menor o igual a 0.3%.

Para realizar el análisis granulométrico del agregado fino se toma una muestra representativa del material que pasó el tamiz No.4, la cual debe ser mínimo de 300 g luego de ser secada.

De esta manera se tomó 1000 g de muestra, la cual fue lavada y secada para

proceder con el ensayo de granulometría. Igualmente se seleccionan los tamices necesarios y adecuados, en este caso: No.8, No.10, No.16, No.20, No.30, No.40, No.50, No.100, No.200 y fondo, tal como se muestra en la Ilustración 6; y se tamiza por un periodo de tiempo adecuado, pasado este tiempo se determinan las masas retenidas en cada tamiz.



Ilustración 6: Serie de tamices para árido fino.

Una vez realizado el proceso de tamizado se procede a calcular los pesos retenidos o parciales en cada tamiz. Luego se calculan los pesos acumulados.

Se calcula el porcentaje retenido sobre cada tamiz:

$$\% \text{ Retenido} = \frac{\text{Peso acumulado retenido en cada tamiz}}{\text{Peso total}} * 100$$

Ecuación 2

Se calcula el porcentaje que pasa:

$$\% \text{ Pasa} = 100 - \% \text{ Retenido acumulado}$$

Ecuación 3

Se debe también calcular el error para hacer la corrección a los pesos parciales:



$$Error = \frac{|Peso\ inicial\ de\ ensayo - \sum\ pesos\ despues\ de\ ensayo|}{Peso\ inicial\ de\ ensayo} * 100$$

Ecuación 4

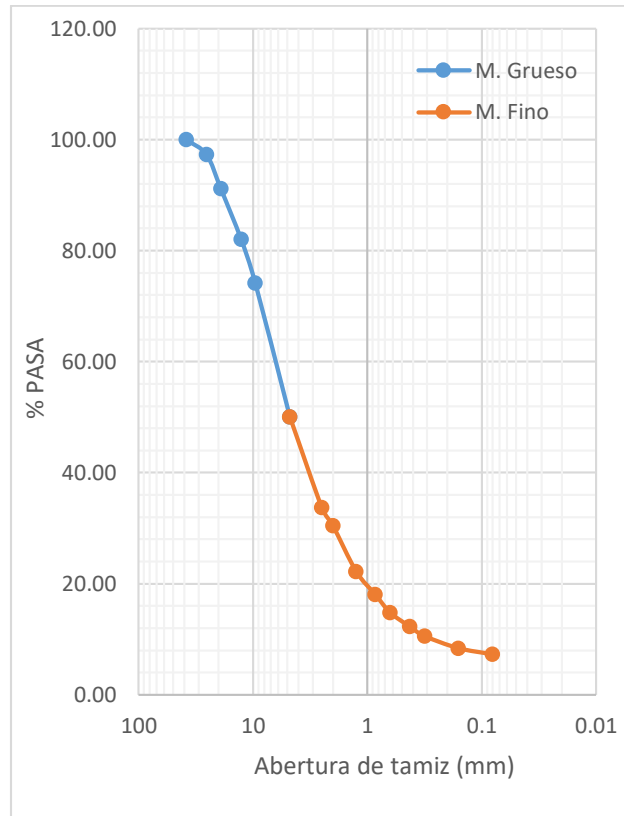
El ensayo se realizó en dos muestras para compararlas y comprobar que el material es similar. En la Tabla 3 y Tabla 4 se muestran los pesos retenidos en cada tamiz para cada ensayo y los resultados de porcentajes de material que pasan los mismos usando las ecuaciones anteriores.

Mientras que en la Gráfica 1 y Gráfica 2 se detallan las curvas granulométricas de cada muestra ensayada.

- *Muestra 1*

PESO ANTES ENSAYO =		10007.0 g			
PESO DESPUÉS ENSAYO =		9975.2 g			
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO: ÁRIDO GRUESO					
TAMÍZ #	ABERTURA	PESO RETENIDO	%	% RETENIDO	%
	(mm)	(g)	RETENIDO	ACUMULADO	PASA
1 1/2	38.1	0.00	0.00	0.00	100.00
1	25.4	272.42	2.72	2.72	97.28
3/4	19.05	615.98	6.16	8.88	91.12
1/2	12.7	906.08	9.05	17.93	82.07
3/8	9.525	796.51	7.96	25.89	74.11
4	4.75	2413.01	24.11	50.00	50.00
8	2.5	325.39	32.54	32.54	33.73
10	2	65.34	6.53	39.07	30.46
16	1.25	165.17	16.52	55.59	22.20
20	0.85	83.41	8.34	63.93	18.03
30	0.63	64.72	6.47	62.06	18.97
40	0.425	50.46	5.05	67.11	16.44
50	0.315	34.24	3.42	70.53	14.73
100	0.16	43.56	4.36	74.89	12.55
200	0.08	22.4	2.24	77.13	11.43
Fondo		2.0	0.20	77.33	11.33

Tabla 3: Análisis granulométrico - Muestra 1.

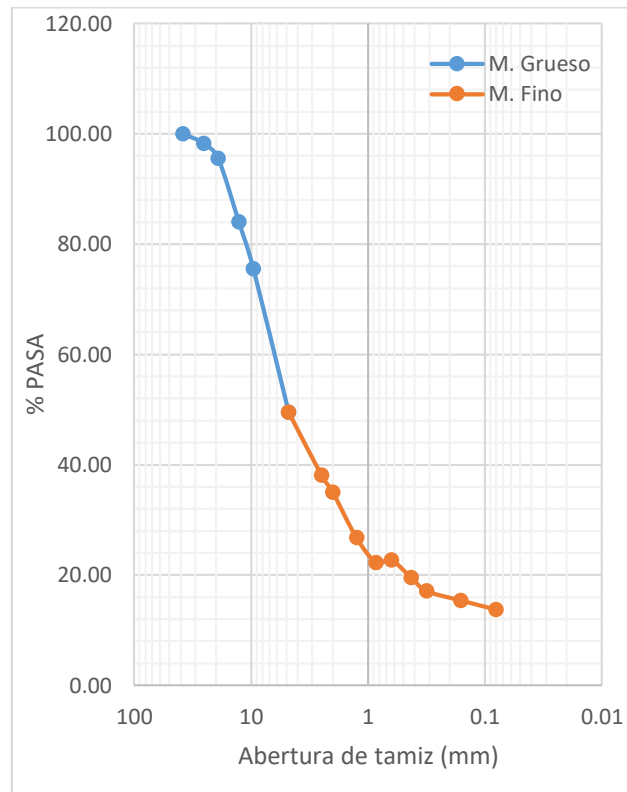


Gráfica 1: Curva granulométrica, muestra 1.

- **Muestra 2**

PESO ANTES ENSAYO =	10005.0 g				
PESO DESPUÉS ENSAYO =	9964.7 g				
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO: ÁRIDO GRUESO					
TAMÍZ #	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
1 1/2	38.1	0.00	0.00	0.00	100.00
1	25.4	172.09	1.72	1.72	98.28
3/4	19.05	276.90	2.77	4.49	95.51
1/2	12.7	1146.85	11.46	15.95	84.05
3/8	9.525	851.57	8.51	24.46	75.54
4	4.75	2606.59	26.05	50.51	49.49
8	2.5	229.16	22.92	22.92	38.15
10	2	62.67	6.27	29.18	35.04
16	1.25	167.39	16.74	45.92	26.76
20	0.85	90.08	9.01	54.93	22.30
30	0.63	81.75	8.18	54.10	22.72
40	0.425	64.07	6.41	60.50	19.54
50	0.315	48.63	4.86	65.37	17.14
100	0.16	34.95	3.50	68.86	15.41
200	0.08	32.9	3.29	72.15	13.78
Fondo		2.4	0.24	72.39	13.66

Tabla 4: Análisis granulométrico - Muestra 2.



Gráfica 2: Curva granulométrica, muestra 2.

Como se puede observar, los porcentajes calculados y las curvas granulométricas se asemejan por lo que se concluye que el material tiene la misma distribución de partículas. Asimismo, estas granulometrías cumplen con las gradaciones dadas por la norma MOP-001-F 2002 tanto para las clases de bases expuestas como para base estabilizada con cemento; las gráficas comparativas se evidencian en el Anexo 1.

3.2. LÍMITES DE ATTERBERG, NORMA ASTM D4318

3.2.1. LÍMITE LÍQUIDO

El objetivo de estos ensayos es determinar caracterizar el comportamiento y consistencia de un suelo fino: sólido, semisólido, plástico, semilíquido y líquido.

El límite líquido se define como el contenido de humedad con el cual una masa de suelo colocada en un recipiente en forma de cuchara (Cuchara de Casagrande), se separa con un ranurador, se deja caer desde una altura de 1 cm con lo que se busca

el cierre de la ranura en 1 cm después de 25 golpes de la cuchara contra la base de caucho del aparato de Casagrande.

Para este ensayo se usaron los siguientes materiales: cuchara de Casagrande, ranurador, espátula, pozuelo de goma, balanza de precisión de 0.01 g, horno a temperatura uniforme de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, tamiz No.40, agua, material pasante el tamiz No.40.

Para comenzar con el ensayo se toman una cantidad igual o mayor a 100 g y coloca en el pozuelo de goma; se coloca agua y se mezcla hasta que se forma una pasta homogénea.

Se coloca este material en la Cuchara de Casagrande aproximadamente 50 a 70 g y alisar la superficie con la espátula, la altura debe ser de 10 mm, tal como se puede observar en la Ilustración 7:



Ilustración 7: Colocación del material en la Cuchara de Casagrande.

Una vez enrasado se pasa el ranurador y se divide la pasta en dos, si se presenta desprendimiento en la parte inferior se debe repetir el ensayo. La Ilustración 8 muestra como debe ser la ranura antes de comenzar el ensayo:



Ilustración 8: Elaboración de la ranura en la muestra.

Ya con la ranura se aplican 2 golpes por segundo tratando de que ésta se cierre y se cuentan el número de golpes. Cuando se cumpla el ensayo se toma aproximadamente 10 g del material del fondo para determinar la humedad.

El ensayo se repite hasta tener 5 datos alrededor de los 25 golpes: 2 mayores, 2 menores y 1 muy cercano a éste.

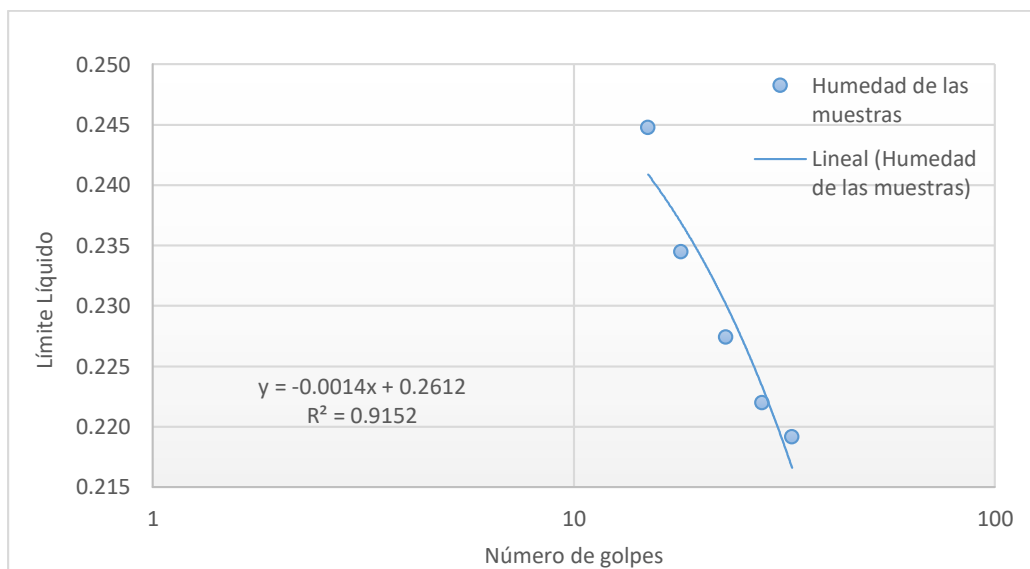
En cuanto a los cálculos a realizarse, se debe calcular la humedad de cada prueba para poder realizar el gráfico. Este es un gráfico semi-logarítmico, donde la humedad será la ordenada (en escala natural) y el número de golpes será la abscisa. En él se dibujan los puntos correspondientes a cada una de las pruebas y se construye una recta conocida como “curva de flujo”.

El límite líquido (LL) se expresa como la humedad correspondiente a la intersección de la curva de flujo con la abscisa en 25 golpes. Para que el resultado tenga mayor exactitud se puede reemplazar el valor de 25 en la ecuación de la recta.

En la Tabla 5 se detallan los datos obtenidos en el ensayo y los resultados de contenido de humedad alcanzados. Y en la Gráfica 3 se tiene la curva con la cual se determinó el límite líquido de la muestra a los 25 golpes.

N° Muestra	1	2	3	4	5
N° golpes	33	28	23	18	15
Peso recipiente + suelo húmedo (g)	42.66	41.57	42	44.54	41.8
Peso recipiente + suelo seco (g)	40.67	39.67	40.01	42.01	39.82
Peso recipiente (g)	31.59	31.11	31.26	31.22	31.73
Peso suelo seco (g)	9.08	8.56	8.75	10.79	8.09
Contenido de humedad	0.219	0.222	0.227	0.234	0.245
Límite líquido (LL)	0.2262				
	22.62 %				

Tabla 5: Resultados de Límite Líquido.



Gráfica 3: Curva - Límite Líquido.

Como se puede ver, el límite líquido obtenido es de 22.62%, el cual es menor al máximo que es de 25%.

3.2.2. LÍMITE PLÁSTICO (LP)

El objetivo de este ensayo es determinar el punto en el que se produce el cambio de una consistencia plástica a una consistencia semisólida.

El límite plástico se define como el contenido de humedad del suelo al cual un cilindro de éste se rompe o resquebraja al amasado. Este cilindro debe tener un diámetro de 3 mm.

Los equipos y materiales que se necesitan para el desarrollo de este ensayo son: pozuelo de goma, espátula, placa de vidrio, balanza de precisión de 0.01 g, horno

a temperatura uniforme de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, tamiz No.40, agua, material pasante el tamiz No.40.

Para comenzar con el ensayo se toma una cantidad de material aproximadamente de 20 g que pasa el tamiz No.40. Este se prepara de la misma forma como se lo hizo para el límite líquido o se puede usar la que se preparó en el ensayo anterior.

Se toma un poco del material y se hace rodar un poco en la palma de la mano y se traslada a la placa de vidrio formando un cilindro de 8 a 10 cm de largo y 3 mm de diámetro, como se puede ver en la Ilustración 9. Se debe amasar los cilindros hasta que aparezcan grietas.



Ilustración 9: Formación de cilindros para límite plástico.

Este ensayo se realiza entre 3 y 4 veces y se obtiene la humedad de cada uno de ellos. Para obtener el cálculo del límite plástico se determina el promedio de todos los cilindros realizados.

Nota: Si no es posible determinar uno de los límites o si la diferencia entre ellos, conocida como índice de Plasticidad (IP) es negativa, el material se calificará como no plástico (NP).

El cálculo del límite plástico es el promedio de las tres o cuatro determinaciones realizadas.

También se debe calcular el índice de plasticidad (IP) mediante la Ecuación 5:



$$IP = LL - LP (\%)$$

Ecuación 5

Donde:

IP: Índice Plástico

LL: Límite Líquido

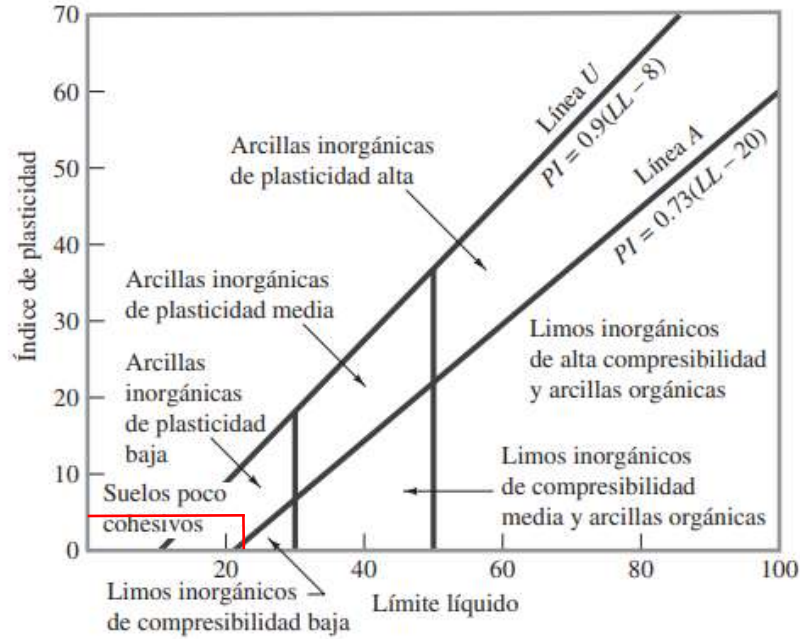
LP: Límite Plástico

En la Tabla 6 se detallan los datos obtenidos en el ensayo y los resultados de contenido de humedad alcanzados.

N° Muestra	1	2	3	4
Peso recipiente + suelo húmedo (g)	36.09	36.38	36.05	36.64
Peso recipiente + suelo seco (g)	35.29	35.62	35.31	35.77
Peso recipiente (g)	31.16	31.5	31.67	30.95
Peso suelo seco (g)	4.13	4.12	3.64	4.82
Contenido de humedad	0.194	0.184	0.203	0.180
	0.190			
Límite plástico (LP)	19.05	%		
Índice de plasticidad (IP)	3.57	%		

Tabla 6: Determinación de límite plástico.

Realizando un promedio entre todos los contenidos de humedad obtenidos se tiene un límite plástico igual a 19.05% y un índice de plasticidad de 3.57%. En la carta de plasticidad obtenida del libro de Braja M. Das “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica” se determina que con un límite líquido de 22.62% y el índice de plasticidad anterior el material es poco cohesivo, tal como se observa en la Gráfica 4.



Gráfica 4: Carta de plasticidad. Fuente: (Das, 2015).

3.3. CLASIFICACIÓN DE SUELOS, MÉTODO AASHTO M145

Con los resultados obtenidos de estas pruebas y del análisis granulométrico se puede clasificar el suelo según AASHTO como se indica en la Tabla 7:

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

Tabla 7: Clasificación de suelos según AASHTO. Fuente: Norma ASTM D-3282

Mediante la Ecuación 6 se halla el Índice de grupo para la evaluación de la calidad del material.



$$IG = (F - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F - 15)(IP - 10)$$

Ecuación 6

Donde:

F: % pasa el tamiz No.200

LL: Límite líquido

IP: Índice de plasticidad

$$IG = (11.43 - 35)[0.2 + 0.005(22.62 - 40)] + 0.01(11.43 - 15)(3.57 - 10)$$

$$IG = -2.44 \therefore 0$$

Por lo que se concluye que el suelo es de tipo **A-1-a** (Cantos, grava y arena), y al tener un índice de grupo (IG) igual a 0, el material es bueno para vías.

3.4. GRAVEDAD ESPECÍFICA DE GRUESOS, NORMA ASTM 127C

El objetivo de este ensayo es determinar la gravedad específica Bulk, gravedad específica aparente. Así como la absorción de una muestra de árido grueso, después de 24 horas sumergidos en agua, la gravedad específica Bulk en base al peso de la superficie saturada superficialmente seca de la muestra de ensayo y la absorción; según indica la norma ASTM 127C: Método de ensayo normalizado para determinar la densidad, la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción de agregados gruesos.

El ensayo se utiliza para determinar la densidad o la porción esencialmente sólida de un gran número de partículas de agregado y proporcionan un valor promedio representativo de la muestra sólida.

Los equipos que fueron utilizados en el proceso son: balanza de precisión de 0.1 g, tamiz de 4.75 mm (No.4) para la separación del árido fino y grueso, picnómetro, cono para el llenado de picnómetro, termómetro, equipo de baño María, horno a temperatura uniforme de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Se hizo un muestreo del agregado, mezclando completamente la muestra y reduciendo para obtener un espécimen de ensayo de aproximadamente 2500 g. Se lavó la muestra hasta asegurar que han sido eliminados el polvo y otros

recubrimientos superficiales de las partículas, secando a continuación en el horno hasta obtener una masa constante.

Se dejó enfriar y se sumergió el material en agua, dejando reposar por 24 horas.

Después del periodo de inmersión, se sacó la muestra del agua y se secó las partículas sobre un paño absorbente de gran tamaño, hasta que se elimine el agua superficial visible, secando individualmente los fragmentos mayores, evitar la evaporación del agua contenida en los poros de las partículas del árido durante la operación de secado superficial. A continuación, se determina el peso de la muestra en el estado saturado superficialmente seco (SSS).

Colocando inmediatamente el árido grueso dentro del picnómetro previamente calibrado, se llenó parcialmente con agua y se lo colocó en baño maría hasta que el agua alcance una temperatura de 25 °C, como se puede observar en la Ilustración 10 e Ilustración 11.



Ilustración 10: Colocación del material en el picnómetro.



Ilustración 11: Picnómetro en baño maría.

Después de eliminar todas las burbujas de aire se llevó el nivel del agua en el picnómetro a su capacidad de calibración y se determinó la masa total del picnómetro, el agregado y el agua.

Se removió el agregado grueso del matraz, se secó hasta obtener una masa



constante a una temperatura de 110 ± 5 °C, y se determinó la masa.

Finalmente se determinó la masa del picnómetro lleno con agua a su capacidad de calibración, a una temperatura de 25 °C.

Con este ensayo se busca calcular la Gravedad Específica Bulk con la Ecuación 7, Gravedad Específica Bulk en estado SSS según la Ecuación 8, Gravedad Específica Aparente según la Ecuación 9 y finalmente, el Porcentaje de Absorción con la Ecuación 10.

- Gravedad Específica Bulk

$$\text{Gravedad Específica Bulk} = \frac{A}{B + S - C}$$

Ecuación 7

- Gravedad Específica Bulk (Estado saturado superficialmente seco)

$$\text{Gravedad Específica Bulk (SSD)} = \frac{B}{B + S - C}$$

Ecuación 8

- Gravedad Específica Aparente

$$\text{Gravedad Específica Aparente} = \frac{A}{B + A - C}$$

Ecuación 9

- Absorción

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{S - A}{A} * 100$$

Ecuación 10

Donde:

A: Peso en aire de muestra

B: Peso matraz con agua a su capacidad de calibración

S: Peso muestra en estado saturado superficialmente seco

C: Peso matraz calibrado con muestra y agua

En la Tabla 8, se detallan los pesos obtenidos durante el ensayo con los cuales se determinarán las diferentes gravedades específicas y el porcentaje de absorción.



Peso en aire de muestra (g)	A	1956.69
Peso matraz con agua a su capacidad de calibración (g)	B	5288.50
Peso muestra en estado saturado superficialmente seco (g)	S	2000.45
Peso matraz calibrado con muestra y agua (g)	C	6501.50

Tabla 8: Datos obtenidos durante el ensayo gravedad específica de gruesos.

Obteniéndose así, una gravedad específica Bulk de 2.48, gravedad específica Bulk en estado SSS de 6.72, gravedad específica aparente de 2.63 y finalmente un porcentaje de absorción de 2.24%; según se detalla en la Tabla 9:

Gravedad Específica Bulk	2.48
Gravedad Específica Bulk en SSS	6.72
Gravedad Específica Aparente	2.63
Porcentaje de Absorción	2.24%

Tabla 9: Resultados del ensayo de gravedad específica de gruesos.

3.5. GRAVEDAD ESPECÍFICA DE FINOS, NORMA ASTM 128C

El objetivo de este ensayo es determinar la gravedad específica Bulk, gravedad específica aparente. Así como la absorción de una muestra de árido fino, después de 24 horas de sumergidos en agua, la gravedad específica Bulk en base al peso de la superficie saturada superficialmente seca de la muestra de ensayo y la absorción; según indica la norma ASTM 128C: Método de ensayo normalizado para determinar la densidad, la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción de agregados finos.

La densidad relativa (gravedad específica) es la característica generalmente usada para el cálculo del volumen ocupado por el agregado en mezclas de concreto de cemento Portland, concreto bituminoso y otras mezclas que son proporcionadas o analizadas en base a un volumen absoluto.

Los equipos que fueron utilizados en el proceso son: Balanza de precisión de 0.1 g, tamiz No.4 para la separación del árido fino del grueso, pala para el llenado del molde, molde cónico y pisón para realizar la prueba de condición SSS, matraz, termómetro, horno a temperatura uniforme de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Para iniciar con este ensayo se hizo un muestreo del agregado, mezclando

completamente la muestra y reduciendo para obtener un espécimen de ensayo de aproximadamente 1 kg. Se sumergió el material en agua y se dejó reposar por 24 horas.

Posteriormente se decantó el exceso de agua con cuidado para evitar la pérdida de finos, se esparció la muestra en una superficie plana, no absorbente, expuesta a una ligera corriente de aire y se removió frecuentemente para asegurar un secado homogéneo hasta llegar a una condición saturada superficialmente seca (SSS).

Colocando el árido fino dentro del cono metálico, se dan 25 golpes con el pisón y sin ejercer ninguna fuerza se levanta verticalmente el cono y se verifica si la muestra se encuentra en el estado SSS, si está en el mismo, el árido se desmoronará parcialmente al levantar el cono. De lo contrario se deja secar más y se repite el proceso anterior. Este procedimiento se puede observar en la Ilustración 12 e Ilustración 13.



Ilustración 12: Armado del cono con el material.



Ilustración 13: Verificación del estado SSS.

Se llenó parcialmente el matraz con agua a una temperatura de 25 °C, se introdujo en el picnómetro 500 ± 10g de agregado fino saturado superficialmente seco, y se llenó con agua adicional hasta aproximadamente el 90% de la capacidad. Se agitó el matraz manualmente o mecánicamente hasta eliminar todas las burbujas de aire.

Después de eliminar todas las burbujas de aire se llevó el nivel del agua en el matraz



a su capacidad de calibración y se determinó la masa total del matraz, el agregado y el agua.

Se removió el agregado fino del matraz, se secó hasta obtener una masa constante a una temperatura de 110 5 °C, y se determinó la masa.

Finalmente se determinó la masa del picnómetro lleno con agua a su capacidad de calibración, a una temperatura de 25 °C.

Con este ensayo se busca calcular la Gravedad Específica Bulk con la Ecuación 11, Gravedad Específica Bulk en estado SSS según la Ecuación 12, Gravedad Específica Aparente según la Ecuación 13 y finalmente, el Porcentaje de Absorción con la Ecuación 14.

- Gravedad Específica Bulk

$$\text{Gravedad Específica Bulk} = \frac{A}{B + S - C}$$

Ecuación 11

- Gravedad Específica Bulk (Estado saturado superficialmente seco)

$$\text{Gravedad Específica Bulk (SSD)} = \frac{B}{B + S - C}$$

Ecuación 12

- Gravedad Específica Aparente

$$\text{Gravedad Específica Aparente} = \frac{A}{B + A - C}$$

Ecuación 13

- Absorción

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{S - A}{A} * 100$$

Ecuación 14

Donde:

A: Peso en aire de muestra

B: Peso matraz con agua a su capacidad de calibración

S: Peso muestra en estado saturado superficialmente seco



C: Peso matraz calibrado con muestra y agua

En la Tabla 10, se detallan los pesos obtenidos durante el ensayo con los cuales se determinarán las diferentes gravedades específicas y el porcentaje de absorción.

Peso en aire de muestra (g)	A	492.73
Peso matraz con agua a su capacidad de calibración (g)	B	660.78
Peso muestra en estado saturado superficialmente seco (g)	S	500.07
Peso matraz calibrado con muestra y agua (g)	C	954.83

Tabla 10: Datos obtenidos durante el ensayo gravedad específica de finos.

Obteniéndose así, una gravedad específica Bulk de 2.39, gravedad específica Bulk en estado SSS de 3.21, gravedad específica aparente de 2.5 y finalmente un porcentaje de absorción de 1.49%; según se detalla en la Tabla 11:

Gravedad Específica Bulk	2.392
Gravedad Específica Bulk en SSS	3.207
Gravedad Específica Aparente	2.480
Porcentaje de Absorción	1.49%

Tabla 11: Resultados del ensayo gravedad específica de finos.

3.6. ENSAYO DE ABRASIÓN, NORMA NTE INEN 0860 (2011)

El objetivo de este ensayo es determinar el porcentaje de desgaste del material que se utiliza para capa base en la estructura de los pavimentos y conocer la calidad del material con el que se está trabajando y si cumple con las especificaciones según la norma NTE INEN 0860 (2011): Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37,5 mm mediante el uso de la máquina de los ángeles.

En este ensayo se mide la resistencia que ofrecen los agregados gruesos a la abrasión o golpes, para lo cual se introducirá una determinada cantidad de este material junto con esferas de acero, dentro de un cilindro metálico que se pondrá a rotar hasta un determinado número de revoluciones. Las esferas constituyen la carga abrasiva que tiende a destruir el material.

Los equipos y materiales que se usan para la realización de este ensayo son:

Máquina de los Ángeles que es un tambor de acero de 710 ± 6 mm de diámetro interior y de 710 ± 6 mm de longitud interior montado horizontalmente por sus vástagos axiales con una tolerancia de inclinación de 1 en 100, uno de los cuales debe tener un dispositivo de polea o similar, para acoplar un motor. En su manto cilíndrico debe tener una abertura para introducir la muestra con una tapa provista de dispositivos para fijarla firmemente en su lugar.

Debe llevar en su superficie interior una aleta consistente en una plancha de acero desmontable, fijada y rígida firmemente a todo lo largo de una generatriz del cilindro. La rotación debe estar comprendida entre 30 y 33 revoluciones por minuto, ser contrapesada e impulsada de modo de mantener una velocidad periférica uniforme y tener incorporado un dispositivo contador de revoluciones.

En la Ilustración 14 se puede observar la estructura de la Máquina de los Ángeles:



Ilustración 14: Máquina de los Ángeles.

También se usó una balanza de precisión de 0.1 g, serie de tamices para material grueso, agitador de tamices automático, horno a temperatura uniforme de $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$.

Según la granulometría obtenida del material, y comparando los valores de porcentaje que pasa por cada tamiz según los tipos de graduación se seleccionó con ayuda de las curvas granulométricas que la muestra correspondía a una gradación de tipo B.



Para la graduación B se necesita un peso inicial de la muestra de 5000 ± 10 g, compuesto por 2500 g de material que pase el tamiz $\frac{3}{4}$ " (19 mm) y sea retenido por el tamiz $\frac{1}{2}$ " (12.5 mm) y 2500 g de material que pase el tamiz $\frac{1}{2}$ " y sea retenido por el tamiz $\frac{3}{8}$ " (9.5 mm), estos datos se pueden evidenciar en la Tabla 12:

TAMANO DE MALLA (aberturas cuadradas) pulgadas		PESOS DE LOS TAMAÑOS INDICADOS, gramos			
		GRADUACIÓN			
Pasa:	Se retiene en:	A	B	C	D
$1\frac{1}{2}$	1	1250 ± 25			
1	$\frac{3}{4}$	1250 ± 25			
$\frac{3}{4}$	$\frac{1}{2}$	1250 ± 10	2500 ± 10		
$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{8}$	1250 ± 10	2500 ± 10		
$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{4}$			2500 ± 10	
$\frac{1}{4}$	No. 4			2500 ± 10	
No. 4	No. 8				5000 ± 10
TOTAL		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

Tabla 12: Graduación para ensayo de abrasión. Fuente: (NTE INEN 860, 2011).

Las especificaciones para la carga establecen que para una graduación tipo B se utiliza un número de esferas igual a 11, siendo colocando junto con la muestra en el interior de la Máquina de los Ángeles, tal y como se observa en la Tabla 13:

Gradación	Número de esferas	Masa de la carga (g)
A	12	$5\ 000 \pm 25$
B	11	$4\ 584 \pm 25$
C	8	$3\ 330 \pm 20$
D	6	2500 ± 15

Tabla 13: Número de esferas para cada graduación. Fuente: (NTE INEN 860, 2011).

Una vez concluidas las 500 revoluciones de la máquina se descargó el material en una bandeja grande y con ayuda del tamiz N°12 para retiró los finos y sobre el mismo se lavó los gruesos para eliminar el polvo que estaba adherido a ellos. Finalmente, se dejó secar al horno a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta obtener masa constante, para posteriormente determinar su peso con aproximación de 1 g.

El valor de la degradación es la pérdida de masa (diferencia entre la masa inicial y la masa final de la muestra) expresada en porcentaje respecto a la masa inicial; el



cual se obtiene mediante la Ecuación 15:

$$\% \text{ desgaste} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} \times 100$$

Ecuación 15

En la Tabla 14 se detallan los pesos del material antes y después del ensayo, y el porcentaje de desgaste obtenido al aplicarse la ecuación anterior:

Peso inicial (g)	5001.95
Peso final (g)	3950.03
Peso final después del secado (g)	3938.95
Porcentaje de desgaste (%)	21.25

Tabla 14: Determinación del desgaste del material.

Como se puede ver en la tabla anterior, el porcentaje de desgaste obtenido es de 21.25%, concluyéndose que cumple con lo que detalla la norma MOP-001-F 2002 sección 811-2 donde los agregados no deben tener un desgaste mayor al 40% (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2002).

3.7. ENSAYO DE COMPACTACIÓN (PROCTOR MODIFICADO) – NORMA ASTM D1557

El objetivo de este ensayo es determinar el peso volumétrico seco máximo que puede alcanzar el material, también se determina su humedad óptima a la cual se debe realizar el proceso de compactación del material.

En un molde se coloca el suelo, el cual es compactado en cinco capas por un martillo que pesa 44.5 N y tiene una caída de 457.2 mm. Los resultados de esta prueba resultan en un aumento del peso unitario seco máximo del suelo lo que se acompaña de una disminución del contenido de humedad óptimo.

Las condiciones generales de esta prueba son adoptadas para los suelos de grano fino que pasan el tamiz No.4, por lo que hay una clasificación con tres diferentes métodos sugeridos que reflejan el tamaño del molde, el número de golpes por capa y el tamaño máximo de partículas en un agregado de suelo usado en la prueba (Das, 2015).

Los tres métodos se detallan en la Tabla 15:

Elemento	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	101.6 mm	101.6 mm	152.4 mm
Volumen del molde	943.3 cm ³	943.3 cm ³	2124 cm ³
Peso del martillo	44.5 N	44.5 N	44.5 N
Altura de la caída del martillo	457.2 mm	457.2 mm	457.2 mm
Número de golpes de martillo por capa de suelo	25	25	56
Número de capas de compactación	5	5	5
Energía de compactación	2696 kN-m/m ³	2696 kN-m/m ³	2696 kN-m/m ³
Suelo utilizado	Porción que pasa el tamiz núm. 4 (4.75 mm). Puede ser utilizada si 20% o menos del peso de material es retenido en el tamiz núm. 4	Porción que pasa el tamiz de 9.5 mm. Puede utilizarse si el suelo retenido en el tamiz núm. 4 es más de 20% y 20% o menos del peso es retenido en el tamiz de 9.5 mm.	Porción que pasa el tamiz de 19 mm. Puede utilizarse si más de 20% del material es retenido en el tamiz de 9.5 mm y menos de 30% del peso es retenido en el tamiz de 19 mm.

Tabla 15: Especificaciones de la prueba Proctor modificada. Fuente: (Das, 2015)

Como se puede ver en la tabla anterior en cada método se detalla cuando deben ser utilizados, por ejemplo, en el método C se detalla que puede utilizarse si más del 20% del material es retenido en el tamiz 3/8" y menos del 30% del peso es retenido en el tamiz 3/4". La granulometría del material cumple con estas condiciones por lo que el método usado es el C.

Los materiales y equipos utilizados para esta prueba son: molde Proctor Modificado, pistón Proctor Modificado, recipientes, balanza de precisión 0.01 g, probeta, horno a temperatura uniforme de 110 °C ± 5°C.

Una vez determinado el método a seguir, se obtiene una muestra por cuarteo representativa que debe ser previamente secada de aproximadamente 5.5 kg.

Se debe determinar la masa del molde y la base, fijar los tornillos laterales y pesar sin material.

Al material a ensayarse se debe revolver para homogeneizar y tomar unas muestras con las que se determinará su humedad inicial.

Para comenzar el ensayo se agrega agua y se homogeniza la muestra, en este caso se agrega 200 ml de agua. Este material se coloca en un quinto del molde y con el pistón se da 56 golpes, este procedimiento se repite con los otros cuatro quintos del molde, es decir, se debe dividir el material en 5 capas del mismo espesor las cuales serán compactadas con 56 golpes cada una. En la Ilustración 15 se puede observar la mezcla del material con el agua y el inicio de la prueba de compactación.



Ilustración 15: Preparación del material para ensayo de Proctor modificado.

Una vez terminadas las 5 capas se retira el collarín y se enrasa la muestra hasta el nivel superior del molde, se limpia los bordes exteriores de este y se pesa el material más el cilindro, tal y como se evidencia en la Ilustración 16.



Ilustración 16: Determinación del peso del material compactado.



Al retirar el material del molde se toman dos muestras: una inferior y una de la parte central de la muestra, con las cuales se determinará la humedad alcanzada en el ensayo.

Este ensayo se realizó dos veces más, con 300 ml y 400 ml respectivamente, con los cuales se formará la curva Proctor.

Primero se debe calcular la humedad con la cual se va a iniciar el ensayo.

De cada ensayo se calcula también la humedad, sacando muestras del centro y del fondo del molde y se realiza un promedio. Se calcula también el peso específico húmedo por medio de la Ecuación 16:

$$\gamma_{húmedo} = \frac{(\text{Peso suelo húmedo} + \text{molde}) - \text{Peso molde}}{\text{Volumen molde}}$$

Ecuación 16

Y se calcula el peso específico seco por medio de la Ecuación 17:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_{húmedo}}{1 + w}$$

Ecuación 17

Donde:

w: humedad correspondiente

Con los datos de humedad (%) y peso específico seco (γ_d) se realiza la curva Proctor.

En la Tabla 16 se detallan los resultados obtenidos para obtener la humedad inicial antes del ensayo de compactación, dando una humedad de 1.40%

# Tara	Peso Tara (g)	Tara + Material (g)	Peso Material (g)	Peso Seco + Tara (g)	Peso Seco (g)	Humedad (%)	Humedad promedio (%)
Tara 59	43.64	131.08	87.44	129.69	86.05	1.615	1.40
Tara 60	43.91	136.25	92.34	135.02	91.11	1.350	
Tara 45	44.19	131.24	87.05	130.19	86	1.221	

Tabla 16: Determinación de la humedad inicial de la muestra.

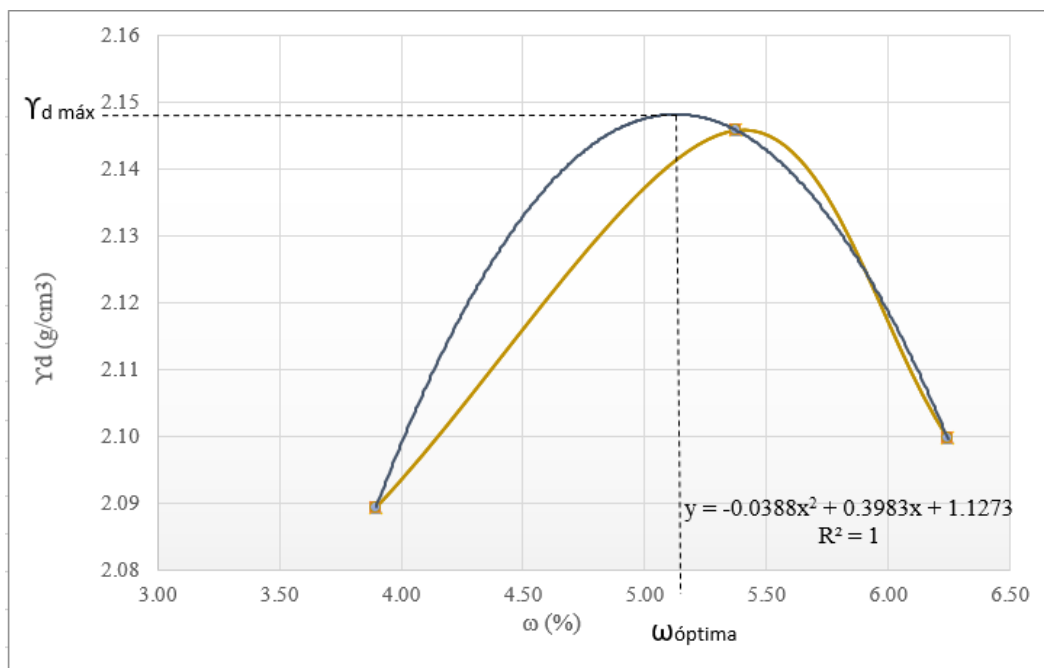
En la Tabla 17 se detallan los resultados de cada una de las pruebas realizadas;

para el ensayo 1 se obtuvo un contenido de humedad de 3.90% y un peso específico seco de 2.09 g/cm³, para la prueba 2 se obtuvo 5.37% y 2.15 g/cm³, y finalmente para el ensayo 3 se obtuvo 6.25% de humedad y 2.10 g/cm³. Con estos datos se hallará la curva de compactación de la Gráfica 5:

N° ensayo	1		2		3	
N° capas	5		5		5	
Golpes por capa	56		56		56	
Peso suelo compactado + molde (g)	11087.5		11279.5		11215	
Peso molde (g)	6476.69		6476.69		6476.69	
Volumen molde (cm ³)	2124		2124		2124	
Y húmedo (g/cm ³)	2.17		2.26		2.23	
N° Tara	94 - Medio	97 - Fondo	59 - Fondo	62 - Medio	31 - Fondo	
Peso Tara (g)	30.18	29.96	43.66	30.4	31.51	
Peso Tara + suelo húmedo (g)	138.9	130.38	120.71	146.01	145.91	
Peso Tara + suelo seco (g)	134.86	126.58	116.68	139.21	139.19	
Humedad (%)	3.8594	3.933	5.519	6.249	6.241	
Humedad promedio (%)	3.90		5.37		6.25	
Yd (g/cm³)	2.09		2.15		2.10	

Tabla 17: Resultados del ensayo de Proctor modificado.

- *Curva Proctor:*



Gráfica 5: Curva de compactación.

Como se puede ver en la Gráfica 5, la línea de color naranja se obtiene con los



resultados del ensayo y la línea de color azul es la línea de tendencia para que los datos sean más precisos ya que solo se realizaron 3 ensayos.

Para calcular la humedad óptima teórica se deriva la ecuación de la línea de tendencia que se detalla en la Ecuación 18:

$$y = -0.0388x^2 + 0.3983x + 1.1273$$

Ecuación 18

Obteniéndose: $dy = 0.3983 - 0.0776x$

Igualando la ecuación anterior a cero se obtiene $x = 5.13\%$, el cual corresponde al valor de la humedad óptima teórica.

Para calcular el peso específico seco máximo teórico se reemplaza el valor de x en la Ecuación 18:

$$y = -0.0388 * (5.13^2) + (0.3983 * 5.13) + 1.1273$$

Dando como resultado un peso específico seco máximo de 2.149 g/cm^3 (2149.48 kg/m^3).

3.8. PORCENTAJE DE EXTRACCION DEL ASFALTO – NORMA ASTM D 2172 (1995)

El objetivo de este ensayo es determinar de forma cuantitativa el asfalto contenido en mezclas asfálticas en caliente y en muestras de pavimentos.

El ligante del pavimento es extraído con Tricloroetileno, Tricloroetano 1.1.1 o Cloruro de metileno, solventes con diferentes usos industriales para extraer grasas, aceites, ceras o pinturas. El contenido de asfalto se calcula por la diferencia de pesos entre el agregado extraído, el contenido de humedad y el material mineral en el extracto.

El contenido de asfalto se expresa como porcentaje en peso de las mezclas libres de humedad (ASTM D 2172). Para los ensayos se utilizó gasolina, debido a que es un solvente más barato, fácil de encontrar y menos peligroso para la salud en el

proceso de extracción.

Los equipos y materiales que se usan en este ensayo son: Recipientes o bandejas, balanzas de precisión de 0.01 g, probeta de 1000 ml, embudo, espátula, llave de tuerca, equipo de extracción de asfalto, horno a temperatura uniforme de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, gasolina SUPER, balde grande, filtros.

El ensayo se realizó 5 veces con diferentes materiales: dos muestras de material fino (pasante el tamiz No.4), dos muestras de material grueso (retenido en el tamiz No.4) y una muestra del material completo. Para los 5 ensayos se toma una masa inicial de 800 g aproximadamente.

Este material se coloca en la taza del aparato de extracción y se cubre con el solvente dejándolo reposar unos minutos. Se debe revolver al material para que el asfalto se desprenda de sus partículas, este procedimiento se puede ver en la Ilustración 17:



Ilustración 17: Colocación de la gasolina en el equipo de extracción.

Los filtros se pesan antes del ensayo, estos deben tener el diámetro adecuado para que encaje en la taza. La taza se coloca en el aparato de extracción y se ajustan los filtros sobre ésta.

Se aprieta firmemente la tapa con la llave de tuercas y como se puede ver en la Ilustración 18, se coloca el balde al extremo de la manguera para recoger el extracto que sale del ensayo.



Ilustración 18: Balde para recoger la gasolina residual de extracción.

Se inicia la centrifugación a una velocidad máxima de 3600 rpm hasta que deje de fluir el solvente. En este caso, se dejó la centrifugación por un tiempo de 1 minuto y medio.

Una vez cumplido este tiempo, se detiene la máquina y se agrega 800 ml de gasolina, en este caso, y se repite el proceso. Esto se debe realizar las veces que sean necesarias hasta que el extracto no sea más oscuro que un color ligero de paja, tal y como se observa en la Ilustración 19.



Ilustración 19: Aspectos finales del ensayo.

En la Ilustración 20 se detalla que cada 2 corridas de este proceso se saca la tapa y los filtros para mover el material y permitir que la gasolina remueva de mejor manera el asfalto del material.



Ilustración 20: Separación de la muestra adherida a las paredes del equipo.

Cumplido esto, se retira el filtro con cuidado y se coloca en una bandeja, al igual que el material contenido en la taza del aparato de extracción como se puede ver en la Ilustración 21; se deja reposar al aire un tiempo y luego se seca en el horno.



Ilustración 21: Productos del ensayo de extracción.

Para el cálculo del porcentaje de asfalto residual se debe aplicar la Ecuación 19:

$$\% \text{ Asfalto Residual} = \frac{(A - B) - (F - E)}{A} * 100$$

Ecuación 19



Donde:

A: Peso muestra antes de la extracción

B: Peso muestra después de la extracción

E: Peso filtro antes de la extracción

F: Peso filtro después de la extracción.

Los resultados que se obtuvieron con este ensayo fueron: para la muestra de material fino se tiene un porcentaje de asfalto residual de 7.37 % y 5.68 %, tal y como se observa en las Tabla 18 y Tabla 19 para el material grueso 2.86% y 3.85%, como se detalla en las Tabla 20 y Tabla 21; y finalmente, para el material completo se obtuvo un porcentaje de asfalto residual de 4.57%, lo que se puede evidenciar en la Tabla 22.

- *Granulometría fina:*

MUESTRA 1 - FINO		
A	Peso muestra antes de la extracción (g)	845.72
B	Peso muestra después de la extracción (g)	765.46
E	Peso filtro antes de la extracción (g)	7.53
F	Peso filtro después de la extracción (g)	25.42
% Asfalto Residual = 7.37		

Tabla 18: Porcentaje de Asfalto residual - Muestra 1: fino.

MUESTRA 2 - FINO		
A	Peso muestra antes de la extracción (g)	854
B	Peso muestra después de la extracción (g)	793.58
E	Peso filtro antes de la extracción (g)	7.43
F	Peso filtro después de la extracción (g)	19.32
% Asfalto Residual = 5.68		

Tabla 19: Porcentaje de Asfalto residual - Muestra 2: fino.



- *Granulometría gruesa:*

MUESTRA 1 - GRUESO		
A	Peso muestra antes de la extracción (g)	800
B	Peso muestra después de la extracción (g)	772.03
E	Peso filtro antes de la extracción (g)	7.12
F	Peso filtro después de la extracción (g)	12.19
% Asfalto Residual = 2.86		

Tabla 20: Porcentaje de Asfalto residual - Muestra 1: grueso.

MUESTRA 2 - GRUESO		
A	Peso muestra antes de la extracción (g)	800.06
B	Peso muestra después de la extracción (g)	764.7
E	Peso filtro antes de la extracción (g)	6.63
F	Peso filtro después de la extracción (g)	11.16
% Asfalto Residual = 3.85		

Tabla 21: Porcentaje de Asfalto residual - Muestra 2: grueso.

- *Granulometría completa:*

MUESTRA 1 - COMPLETA		
A	Peso muestra antes de la extracción (g)	800.02
B	Peso muestra después de la extracción (g)	752.17
E	Peso filtro antes de la extracción (g)	7.33
F	Peso filtro después de la extracción (g)	18.63
% Asfalto Residual = 4.57		

Tabla 22: Porcentaje de Asfalto residual - Muestra 1: completa.

3.9. GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL DE LA EXTRACCIÓN

Para la realización de este ensayo se utiliza el material del ensayo anterior, el cual debe ser lavado con detergente para que las partículas de gasolina que pudieron haberse impregnado en la muestra se disipen.

El proceso para el ensayo de granulometría es el mismo que se detalla en el primer ensayo de este capítulo.

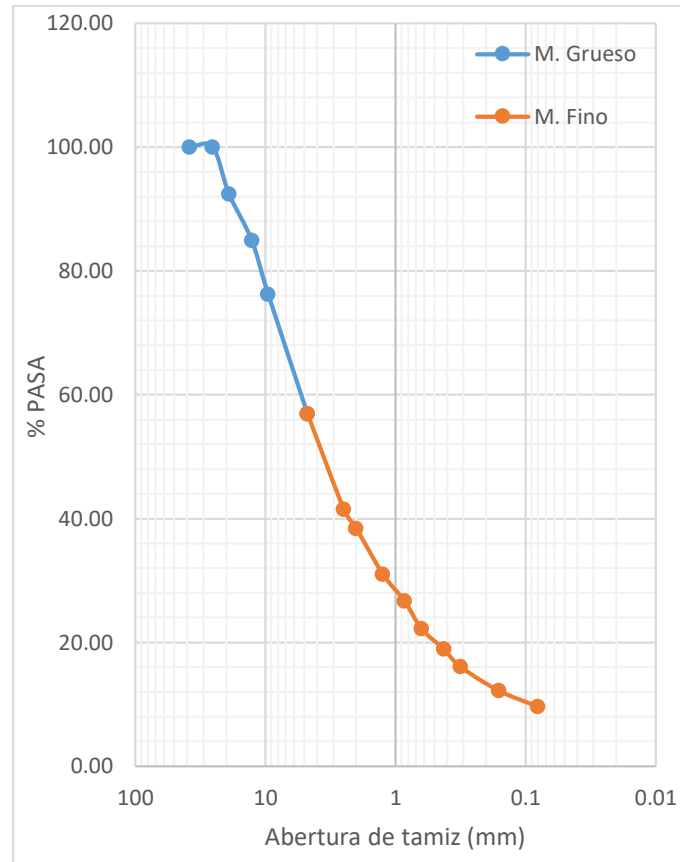


El ensayo se realizó en la muestra completa ya que ésta dará una granulometría más exacta. En la Tabla 23 se muestran los pesos retenidos en cada tamiz para cada ensayo y los resultados de porcentajes de material que pasan los mismos usando las ecuaciones anteriores.

Mientras que en la Gráfica 6 se detalla la curva granulométrica de la muestra ensayada.

PESO ANTES ENSAYO =		751.3 g			
PESO DESPUÉS ENSAYO =		748.8 g			
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO					
TAMÍZ #	ABERTURA	PESO RETENIDO	%	% RETENIDO	%
	(mm)	(g)	RETENIDO	ACUMULADO	PASA
1 1/2	38.1	0.00	0.00	0.00	100.00
1	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4	19.05	56.65	7.54	7.54	92.46
1/2	12.7	56.76	7.56	15.10	84.90
3/8	9.525	64.90	8.64	23.73	76.27
4	4.75	145.36	19.35	43.08	56.92
8	2.5	115.53	27.02	27.02	41.54
10	2	23.38	5.47	32.49	38.43
16	1.25	55.5	12.98	45.47	31.04
20	0.85	32.55	7.61	53.08	26.71
30	0.63	33.77	7.90	60.98	22.21
40	0.425	24.55	5.74	66.72	18.94
50	0.315	21.61	5.05	71.77	16.07
100	0.16	28.92	6.76	78.54	12.22
200	0.08	19.3	4.51	83.05	9.65
Fondo		0.5	0.11	83.16	9.59

Tabla 23: Análisis granulométrico - Material de extracción.



Gráfica 6: Curva granulométrica - material de extracción.

De la misma manera que las granulometrías anteriores, ésta cumple con las gradaciones dadas por la norma MOP-001-F 2002 tanto para las clases de bases expuestas como para base estabilizada con cemento.

3.10. CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) – NORMA ASTM D1883

El objetivo de este ensayo es determinar un índice de resistencia de los suelos llamado valor de la relación de soporte, CBR, tanto de la subrasante como de la capa base y subbase. El ensayo se lo prepara comúnmente en laboratorio bajo condiciones predeterminadas de humedad y densidad, sin embargo, éste también puede realizarse sobre muestras inalteradas traídas de campo.

El número CBR se obtiene como la relación de la carga unitaria en kg/cm^2 que es necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón dentro de la muestra compactada, con respecto a una carga unitaria patrón requerida para alcanzar la misma profundidad de penetración en una muestra estándar, esta



relación se detalla en la Ecuación 20:

$$CBR = \frac{\text{Carga unitaria de ensayo}}{\text{Carga unitaria patrón}} * 100$$

Ecuación 20

Usualmente, la carga unitaria patrón es la que se obtiene a una penetración de 2.54 mm (0.1”) y con ésta se halla el número CBR, sin embargo, si el valor de CBR a una penetración de 5.08 mm (0.2”) es mayor, éste debe aceptarse como el valor final de CBR.

Los equipos que fueron utilizados en el proceso son: moldes de metal cilíndricos provistos de collarín y una placa base, pisón de compactación, pesas de metal, disco espaciador, deformímetro, prensa similar a la usada para compresión simple, piscina para sumergir los moldes, papel filtro, balanza de 0.1 g de precisión, tamices $\frac{3}{4}$ ” y No. 4; y demás implementos que sirvan para realizar la mezcla del material.

La cantidad material a utilizarse en el ensayo es de 5.5 kg, este material debe llegar a la humedad óptima obtenida en el ensayo de Proctor Modificado por lo cual se debe calcular la cantidad de agua a ser añadida.

En este caso, el material fresado tenía una humedad inicial de 1.8% debiendo alcanzar una humedad óptima de 5.13% es por ello que se deben seguir las ecuaciones 21 a 24 para determinar los pesos de material y agua que se necesitan para cumplir con el peso total de 5.5 kg.

$$\text{Total de agua} = \text{Peso total} * \text{Humedad óptima}$$

Ecuación 21

$$\text{Total de agua en la muestra} = \text{Peso total} * \text{Humedad inicial}$$

Ecuación 22

$$\text{Agua a añadir} = \text{Total de agua} - \text{Total de agua en la muestra}$$

Ecuación 23

$$\text{Peso de material} = \text{Peso total} - \text{Agua a añadir}$$

Ecuación 24



En la Tabla 24, se detallan los pesos de material a usar y de agua añadida con los cuales se procede a realizar el ensayo.

Peso de material (g)	5316.85
Agua a añadir (g)	183.15

Tabla 24: Pesos iniciales de materiales para mezcla.

Para la preparación del material se realizó una restitución, es decir, el material retenido en el tamiz $\frac{3}{4}$ " se reemplazó por el material pasante el tamiz $\frac{3}{4}$ " y el retenido en el tamiz No. 4. A continuación, se agrega el agua en el material y se mezcla muy bien para que toda la mezcla sea homogénea.

Una vez que se tenga listo el material, se preparan los moldes. Se coloca el disco espaciado sobre la placa base y se fija el molde sobre ésta, acompañada del collarín. Sobre el disco espaciador se debe colocar un disco de papel filtro el cual impide que se pierda partículas finas durante el proceso.

El material debe colocarse en el molde en 5 capas iguales y cada una de ellas debe compactarse de acuerdo al ensayo Proctor con el fin de obtener la humedad óptima y la densidad máxima. Se deben realizar 3 moldes que cuentan con 56, 25 y 12 golpes.

Terminado el proceso de compactación, se retira el collarín y se enrasa la superficie de manera cuidadosa, rellenando con material fino los espacios vacíos que queden en la superficie. Con el material sobrante se determina la humedad antes de la inmersión de la muestra, como se detalla en la Tabla 25.

CONTENIDO DE AGUA (Antes de Saturación)						
No. de Golpes/Capa	56 Golpes		25 Golpes		12 Golpes	
Tara #:	31	78	21	26	29	66
Tara + Suelo Húmedo (g)	125.81	142.89	176.71	136.09	149.35	147.83
Tara + Suelo Seco (g)	121.44	138.86	170.02	131.20	143.91	142.50
Peso de la Tara (g)	31.51	29.78	31.58	31.52	31.43	30.81
Peso de Agua (g)	4.37	4.03	6.69	4.89	5.44	5.33
Peso de Suelo Seco (g)	89.93	109.08	138.44	99.68	112.48	111.69
Contenido de Humedad (%)	4.86	3.69	4.83	4.91	4.84	4.77
Humedad Promedio (%)	4.28		4.87		4.80	

Tabla 25: Humedad del material antes de la inmersión de moldes.

Se retira la placa base, se invierte el molde y se vuelve a ajustar a la base; se pesa todo el conjunto. Se colocan las placas metálicas y el vástago ajustable en el molde y con un deformímetro se toma la primera medida de expansión, la cual debe ser cero.

Posteriormente, se sumergen los moldes en una piscina y se vuelve a tomar la lectura con deformímetro para comprobar que ésta se mantenga en cero. Se dejan los moldes por 7 días, y en cada uno de ellos se toma la lectura de expansión. El cálculo del porcentaje de expansión de las muestras se especifica en la Tabla 26.

DATOS DE ESPONJAMIENTO														
FECHA	DÍAS EN AGUA	MOLDE #: 1		# golpes: 56			MOLDE #: 2		# golpes: 25		MOLDE #: 3		# golpes: 12	
		Hora	Lectura Dial 0.001pulg	Altura Muestra pulg	Esponjam. %	Hora	Lectura Dial 0.001pulg	Altura Muestra pulg	Esponjam. %	Hora	Lectura Dial 0.001pulg	Altura Muestra pulg	Esponjam. %	
2-dic.-2020	0.00	12:30	0	4.570	0.00	12:30	0	4.570	0.00	12:30	0	4.570	0.00	
3-dic.-2020	1.00	12:30	4	4.574	0.09	12:30	3	4.573	0.07	12:30	2	4.572	0.04	
4-dic.-2020	2.00	12:30	4	4.574	0.09	12:30	3	4.573	0.07	12:30	2	4.572	0.04	
5-dic.-2020	3.00	12:30	4	4.574	0.09	12:30	3	4.573	0.07	12:30	2	4.572	0.04	
6-dic.-2020	4.00	12:30	4	4.574	0.09	12:30	3	4.573	0.07	12:30	2	4.572	0.04	
7-dic.-2020	5.00	12:30	4	4.574	0.09	12:30	3	4.573	0.07	12:30	2	4.572	0.04	
8-dic.-2020	6.00	12:30	4	4.574	0.09	12:30	3	4.573	0.07	12:30	2	4.572	0.04	
9-dic.-2020	7.00	12:30	4	4.574	0.09	12:30	3	4.573	0.07	12:30	2	4.572	0.04	

Tabla 26: Cálculo de Esponjamiento del material sumergido.

Al cabo de estos días, se retiran las probetas del agua y se deja drenar el agua durante 15 minutos. Cumplido este tiempo, se retiran las cargas y se pesa la probeta cuidando de no alterar la superficie de la misma.

Finalmente, se realiza el ensayo de penetración colocando la probeta en la máquina de presión con las placas metálicas (cargas). Se apoya el pistón de penetración sobre la muestra y se da carga a una velocidad de 1.25 mm/min y se toman los datos que se ven en el dial de carga y en el deformímetro. Se saca el material y se toma muestras con las que se determinará su humedad después de la inmersión.

En la Tabla 27, se especifican los datos obtenidos en el ensayo de penetración y en la Tabla 28 se detalla la humedad alcanzada después de la inmersión de los moldes:

Penetración	56 golpes	25 golpes	12 golpes
<i>0.001 pulg</i>	<i>Lectura dial</i>	<i>Lectura dial</i>	<i>Lectura dial</i>
0	0	0	0
25	53	21	10
50	93	26	25
75	117	46	31.5
100	143	54	36
150	174	64	-

Tabla 27: Resultados del Ensayo de Penetración.

CONTENIDO DE AGUA (Después de Saturación)						
No. de Golpes/Capa	56 Golpes		25 Golpes		12 Golpes	
Tara #:	108	63	31	95	9	88
Tara + Suelo Húmedo (g)	112.19	116.44	134.90	132.97	130.07	108.42
Tara + Suelo Seco (g)	107.62	111.04	127.28	125.67	118.94	100.81
Peso de la Tara (g)	31.08	30.50	31.53	29.99	31.57	30.15
Peso de Agua (g)	4.57	5.40	7.62	7.30	11.13	7.61
Peso de Suelo Seco (g)	76.54	80.54	95.75	95.68	87.37	70.66
Contenido de Humedad (%)	5.97	6.70	7.96	7.63	12.74	10.77
Humedad Promedio (%)	6.34		7.79		11.75	

Tabla 28: Humedad del material después de la inmersión de moldes.

A partir de los datos obtenidos en el dial de carga se aplica la Ecuación 25 para hallar la carga que fue aplicada sobre la muestra. Asimismo, se debe hallar la presión aplicada al dividir la carga para el área del pistón, que en este caso el área es de 3 pulg².

$$Carga = (9.4504 * Lectura dial) + 25.179$$

Ecuación 25

El CBR obtenido es la relación que se da a una penetración de 2.54 mm dando para



la muestra con 56 golpes un valor de 46%, para 25 golpes de 18%, y para 12 golpes dio un CBR de 12%; como se puede apreciar en la Tabla 29.

PENET.	PRESIÓN ESTÁND.	MOLDE #: 1		# golpes:	56
		CARGA	PRESIÓN	PRESIÓN CORREG	C.B.R.
0.001 pulg	Lb/pulg ²	Lb	Lb/pulg ²	Lb/pulg ²	
0.0		0	0.0		
25.0		526.050	175.4		
50.0		904.066	301.5		
75.0		1130.876	377.1		
100	1000	1376.586	459.1	459.1	46%
150		1669.549	556.7		
PENET.	PRESIÓN ESTÁND.	MOLDE #: 2		# golpes:	25
		CARGA	PRESIÓN	PRESIÓN CORREG	C.B.R.
0.001 pulg	Lb/pulg ²	Lb	Lb/pulg ²	Lb/pulg ²	
0.0		0	0.0		
25.0		223.6374	74.6		
50.0		270.8894	90.3		
75.0		459.8974	153.4		
100	1000	535.5006	178.6	178.6	18%
150		630.0046	210.1		
PENET.	PRESIÓN ESTÁND.	MOLDE #: 3		# golpes:	12
		CARGA	PRESIÓN	PRESIÓN CORREG	C.B.R.
0.001 pulg	Lb/pulg ²	Lb	Lb/pulg ²	Lb/pulg ²	
0.0		0	0.0		
25.0		119.683	39.9		
50.0		261.439	87.2		
75.0		322.8666	107.7		
100	1000	365.3934	121.8	121.8	12%
150			0.0		

Tabla 29: Determinación de CBR.

Finalmente, los resultados finales de este ensayo son densidad seca máxima, 95% densidad seca máxima y CBR que se detallan en la Tabla 30 y Tabla 31.



DENSIDAD HÚMEDA Y SECA						
MOLDE #:	1	2	3			
No. de Capas	5	5	5			
No. de Golpes/Capa	56	25	12			
Espécimen:	Antes de Remojo	Después de Remojo	Antes de Remojo	Después de Remojo	Antes de Remojo	Después de Remojo
Molde + Suelo Húmedo (g)	12810	12914	12556	12731.5	12315	12557
Peso Molde (g)	8000	8000	8016	8016	8004	8004
Peso Suelo Húmedo (g)	4810	4914	4540	4715.5	4311	4553
Volumen de la Muestra (cm ³)	3230.00	3230.00	3230.00	3230.00	3230.00	3230.00
Densidad Húmeda (kg/m ³)	1489	1521	1406	1460	1335	1410
Densidad Seca (kg/m ³)	1428	1431	1340	1354	1273	1261

Tabla 30: Determinación de densidades.

RESULTADOS	
Densidad seca máx. (kg/m ³)	1431
95% Densidad seca máx. (kg/m ³)	1359
C.B.R. máx. (%)	46

Tabla 31: Resultados finales del ensayo CBR.

3.11. EXTRACCIÓN DE NÚCLEOS

De la vía Guangarcucho – Jadán se extrajeron del pavimento 3 núcleos empleando un taladro saca-núcleos. Estos se obtuvieron de la abscisa 2+000 en 3 puntos: centro del carril izquierdo, centro del carril derecho y centro de toda la vía.

Al momento de realizar la extracción, se debe tener cuidado para evitar la distorsión, flexión o agrietamiento de los especímenes.

El objetivo de la extracción es observar el espesor de la carpeta asfáltica con la que cuenta el pavimento después del desgaste al que ha sido sometido; además, determinar el peso específico Bulk de las briquetas (ASTM D1188) y realizar los ensayos Marshall (ASTM D1559) y RICE (ASTM D2041).

Para la determinación del peso específico Bulk, se debe establecer primero los pesos de las briquetas secas, en estado SSS y sumergidas. Los equipos que fueron utilizados en el ensayo son: balanza con precisión de 0.01 g, equipo de baño María, canastilla metálica, y balde.

Para comenzar el ensayo se pesan los núcleos extraídos, posteriormente, se colocan dentro del equipo de baño María por 5 minutos a una temperatura de 25°C. Transcurrido este tiempo, se saca del equipo, se secan superficialmente y se pesan, con lo que se tendrán los pesos en estado SSS y, por último, se colocan en una canastilla y se sumerge en un balde con agua y se toma su peso. La toma de estos datos es importante para el cálculo del volumen y la gravedad específica de la mezcla neta (densidad Bulk) de los núcleos, como se detalla en la Tabla 32.

Probetas Marshall	Peso Seco (g)	Peso SSS (g)	Peso Sumergido (g)	Volumen	Gmb
1	573.72	574.5	327.49	247.01	2.323
2	894.2	899.76	503.08	396.68	2.254
3	896.94	897.79	515.95	381.84	2.349

Tabla 32: Características de los núcleos extraídos.

Posteriormente, se vuelve a colocar los núcleos en el equipo de baño María, pero con la diferencia de que la temperatura debe estar ya a 60°C; deben permanecer sumergidos por 30 minutos antes de ser retirados. Una vez que se retiran los núcleos se secan superficialmente y se realiza el ensayo Marshall usando la prensa Marshall del laboratorio de la empresa ASFALTAR EP, como se puede observar en la Ilustración 22:



Ilustración 22: Prensa Marshall.

Esta máquina comprime las briquetas en sus lados laterales y arroja resultados de estabilidad (lbf) y flujo (mm), valores que se detallan en la Tabla 33.

ENSAYO MARSHALL	
Estabilidad (lbf)	Flujo (mm)
790.60	9.80
1067.40	16.10
1544.60	19.40

Tabla 33: Resultados ensayo Marshall.

Una vez realizado el ensayo, se colocan los núcleos en el horno por 24 horas o hasta que toda la muestra esté seca; en el transcurso de este tiempo se va desmenuzando los núcleos para que sea más fácil que el agua se evapore y pueda desmenuzarse de mejor manera para proceder con el ensayo RICE.

El objetivo del ensayo RICE es determinar la gravedad específica teórica máxima de una mezcla asfáltica no compactada, en este caso, de los núcleos disgregados.

Para realizar el ensayo RICE se debe enfriar la muestra hasta la temperatura ambiente, se coloca en un picnómetro y se pesa el material (peso A). Se agrega agua suficiente a una temperatura de 25°C para cubrir la muestra y se remueve el aire atrapado sometiéndolo a un vacío parcial de 30 mm de Hg durante un periodo de 30 minutos por medio de una bomba de vacío y vibración, como se puede observar en la Ilustración 23:



Ilustración 23: Remoción de aire mediante el equipo RICE.



Una vez removido el aire atrapado se llena el picnómetro con agua a 25°C, se enrasa con una placa de vidrio y se toma el peso del picnómetro + agua + muestra + vidrio (peso C). Asimismo, debe tomarse el peso del picnómetro + agua + vidrio (peso B).

Para el cálculo de la gravedad teórica máxima se debe aplicar la Ecuación 26:

$$Gmm = \frac{A}{(A + B - C)}$$

Ecuación 26

Donde:

A: Peso del material.

B: Peso picnómetro + agua + vidrio.

C: Peso picnómetro + agua + muestra + vidrio.

En la Tabla 34 se detallan los pesos obtenidos del ensayo RICE y el resultado de Gmm:

ENSAYO RICE			
A (g)	B (g)	C (g)	Gmm
1781.00	16831.00	17890.00	2.467

Tabla 34: Cálculo de la gravedad teórica máxima (Gmm).

Obtenido los resultados de ambos ensayos se determina la Estabilidad corregida, Flujo y Porcentaje de Vacíos de la mezcla, estos valores se detallan en la Tabla 35.



PROBETA	1	2	3
%ASFALTO	4.65		
PESO AL AIRE (g)	573.72	894.20	896.94
PESO SSS (g)	574.50	899.76	897.79
PESO EN AGUA (g)	327.49	503.08	515.95
VOLUMEN (cm ³)	247.01	396.68	381.84
Gmb	2.32	2.25	2.35
Gmb Promedio	2.31		
Gmm	2.47		
%Vacios Total Va	5.97	8.74	4.90
Va Promedio (%)	6.53		
Estabilidad sin Corregir (lbf)	790.60	1067.40	1544.60
Flujo (mm)	9.80	16.10	19.40
Flujo Promedio (mm)	15.10		
Factor de correccion	4.17	1.56	1.67
Estabilidad Corregida (lbf)	3296.80	1665.14	2579.48
Estabilidad Promedio (lbf)	2513.81		

Tabla 35: Resultados finales del ensayo Marshall.

Como se observa en la tabla anterior, los núcleos contienen un porcentaje de vacíos más alto del rango que indica la Tabla 405-5.2 de norma MOP-001-F 2002; este rango es de 3 – 5 % de vacíos para una capa de rodadura. Al tener un alto porcentaje de vacíos la mezcla permite la circulación de aire y agua lo que puede ocasionar el endurecimiento prematuro de un pavimento (Garnica Anguas, Delgado Alamilla, Gómez López, Alonso Romero, & Alarcón Orta, 2004).



CAPÍTULO IV: ELABORACIÓN DE MEZCLAS CON CEMENTO Y EMULSIÓN ASFÁLTICA

Este capítulo abarca la metodología a seguir para la elaboración de las mezclas con cada uno de los agentes estabilizadores. Como punto inicial se definen las propiedades de estos agentes y, posteriormente, se detalla cada uno de los ensayos realizados para elaborar y caracterizar las mezclas. Con los resultados obtenidos se determina cuál de los dos agentes estabilizadores influye de mejor manera en el material fortaleciendo sus características, encontrando así el óptimo que será utilizado en el diseño de rehabilitación.

4. GENERALIDADES

Uno de los propósitos de este trabajo de titulación es realizar mezclas empleando el material fresado y agentes estabilizantes, mezclas que tengan mejores características y aporten mayor soporte en la estructura del pavimento cuando sea colocado.

Estos agentes estabilizadores son cemento Holcim Base vial y emulsión asfáltica facilitada por la empresa ASFALTAR EP. El material fresado se mezclará con estos dos agentes y se someterán a pruebas para determinar su resistencia y comportamiento para finalmente determinar cuál de ellos otorga mejores características y será seleccionado para el diseño de la alternativa de rehabilitación.

- Cemento Holcim Base Vial

Este tipo de cemento fabricado por la empresa Holcim Ecuador S.A. *“es un cemento de moderado calor de hidratación, desarrollado especialmente para generar las resistencias adecuadas que permitan mejorar y estabilizar suelos mediante el uso del material disponible en sitio, reducir los costos de construcción, conservar el ambiente y mejorar la calidad y durabilidad de los caminos”* (Holcim Ecuador S.A., 2018).

La ficha técnica de Holcim sobre el cemento Base Vial detalla que las ventajas del uso de este cemento son: generan bajo calor de hidratación a largo plazo y reducen



significativamente la tendencia al agrietamiento por contracción en comparación con cementos convencionales, de esta manera, se optimiza los procesos constructivos tradicionales y de alta tecnología. Además, tienen mayor durabilidad ya que los pavimentos aumentan su capacidad de soporte y resistencia a agentes atmosféricos, menor impacto ambiental y reducción de costos de acarreo o transporte de materia prima y material pétreo, reducción del daño a vías circundantes al proyecto, entre otras.

Este tipo de cemento puede mejorar y estabilizar la mayoría de suelos que existen en el país a excepción de los suelos excesivamente plásticos, orgánicos o con altos contenidos de sales ya que afectan al desempeño del mismo.

- *Emulsión Asfáltica: Asfaltar EP*

La emulsión asfáltica utilizada fue proporcionada por la empresa Asfaltar EP, la cual es una emulsión asfáltica para reciclado de pavimentos tipo CSS-REC diseñada por la empresa Emuldec Cía. Ltda.

Ésta es una emulsión asfáltica catiónica formulada con un asfalto de muy baja penetración, aditivos plastificantes y agentes rejuvenecedores de alta calidad (Reclamite), además, es de curado lento por lo que permite ejecutar las actividades de reciclado sin problemas.

Esta emulsión es recomendada para el uso en reciclado de pavimentos asfálticos deteriorados que al ser de curado lento es más estable y puede diluirse en agua, asimismo los coeficientes estructurales alcanzados con este ligante son satisfactorios.

La empresa Emuldec en su hoja de información sobre este producto recomienda temperaturas mínimas y máximas tanto para su almacenamiento como para su aplicación:

- Almacenamiento mín.: 10°C máx.: 60°C
- Aplicación mín.: 10°C máx. 70°C



4.1. DISEÑO DE MEZCLAS

4.1.1. DISEÑO CON CEMENTO HOLCIM BASE VIAL

Una vez que se ha caracterizado el material fresado se debe estimar el contenido de cemento Holcim Base Vial de acuerdo a las recomendaciones indicadas en el libro de Nicholas J. Garber “Ingeniería de Tránsito y Carreteras” considerando el tipo de suelo como se detalla en la Tabla 36:

AASHTO Grupo de suelo	Cemento (porcentaje por peso del suelo)	Cemento (libras por pie cúbico de suelocemento compactado)	Cemento (kilogramos por metro cúbico de suelocemento compactado)
A-1-a	3-5	5-7	80-100
A-1-b	5-8	7-8	110-130
A-2-4	5-9	7-9	110-140
A-2-5			
A-2-6			
A-2-7			
A-3	7-11	8-11	130-180
A-4	7-12	8-11	130-180
A-5	8-13	8-11	130-180
A-6	9-15	9-13	140-210
A-7	10-16	9-13	140-210

Tabla 36: Intervalos normales de cemento. Fuente: (Garber & Hoel, 2002).

Como se determinó en la sección 3.2, el material fresado cumple con las características de un material tipo A-1-a por lo que el rango del contenido de cemento es de 3–5%, es por ello que se realizaron dos mezclas con los límites en este rango con las que se harán las pruebas posteriores. Para el contenido de cemento de 4% se hizo un promedio entre los dos porcentajes.

Como primer ensayo se debe realizar la compactación por medio de Proctor modificado para determinar el peso volumétrico seco máximo o densidad máxima y la humedad óptima de cada una de las mezclas. Al igual que en la sección 3.7 del capítulo anterior, el material a usar depende de la granulometría del material, es decir, con ella se determinará cuanto de material fino y de material grueso se debe usar para que dé un total de 5.5 kg.

- **Ensayo de Compactación**

Para cada porcentaje de cemento a agregarse se realizan 4 ensayos de



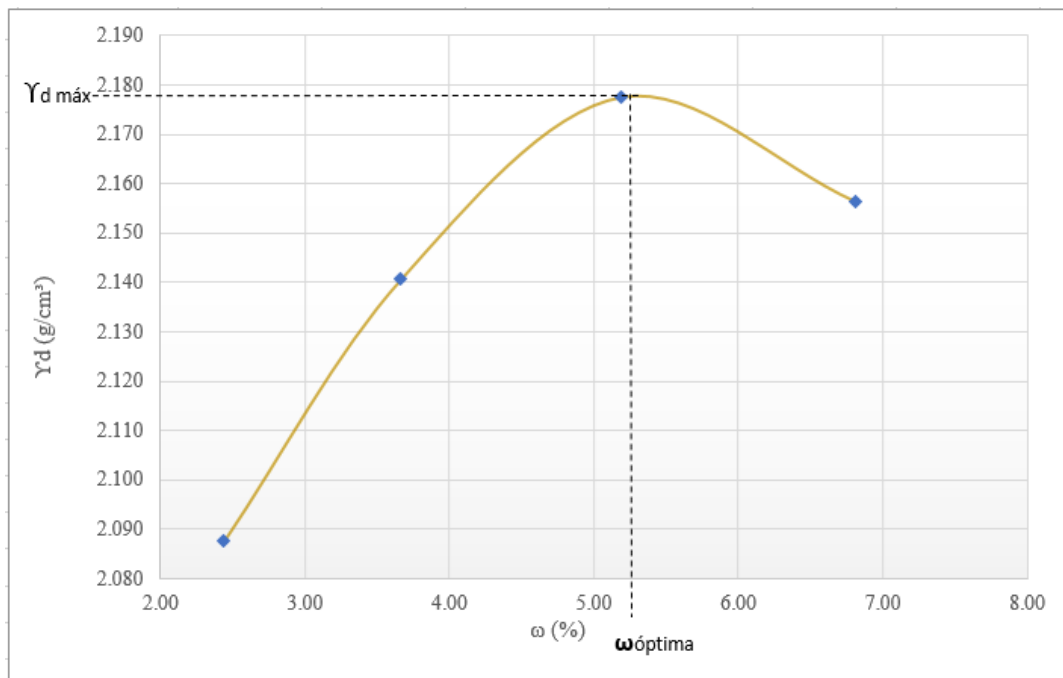
compactación con diferentes cantidades de agua: 100, 200, 300 y 400 ml, es decir, se realizaron 8 pruebas de Proctor modificado.

Desde este punto el procedimiento es el mismo que se detalló en la sección 3.7 del presente trabajo. Con los datos de humedad (%) y peso específico seco (γ_d) se realiza la curva Proctor.

En la Tabla 37 se detallan los resultados de cada una de las pruebas realizadas para el 3% de cemento. Para el ensayo 1, se obtuvo un contenido de humedad de 2.44% y un peso específico seco de 2.09 g/cm³, para la prueba 2 se obtuvo 3.66% y 2.14 g/cm³, para la tercera prueba se obtuvo 5.19% y 2.18 g/cm³, y finalmente para el ensayo 4, se obtuvo 6.81% de humedad y 2.16 g/cm³. Con estos datos se determina la curva de compactación de la Gráfica 7.

N° ensayo	1		2		3		4	
N° capas	5		5		5		5	
Golpes por capa	56		56		56		56	
Peso suelo compactado + molde (g)	11019		11190		11342		11369	
Peso molde (g)	6476.69		6476.69		6476.69		6476.69	
Volumen molde (cm ³)	2124		2124		2124		2124	
Y húmedo (g/cm ³)	2.14		2.22		2.29		2.30	
N° Tara	66 -Medio	15 - Fondo	25 -Medio	62 - Fondo	11 -Medio	27 - Fondo	104 -Medio	78 - Fondo
Peso Tara (g)	30.8	31.64	31.64	31.42	29.98	30.33	30.44	31.59
Peso Tara + suelo húmedo (g)	153.35	132.73	123.86	148.96	116.35	143.39	131.53	135.33
Peso Tara + suelo seco (g)	150.16	130.55	120.48	144.96	111.67	138.36	125.23	128.57
Humedad (%)	2.6726	2.204	3.805	3.523	5.729	4.656	6.646	6.971
Humedad promedio (%)	2.44		3.66		5.19		6.81	
Yd (g/cm³)	2.09		2.14		2.18		2.16	

Tabla 37: Resultados del ensayo Proctor Modificado con 3% de cemento.



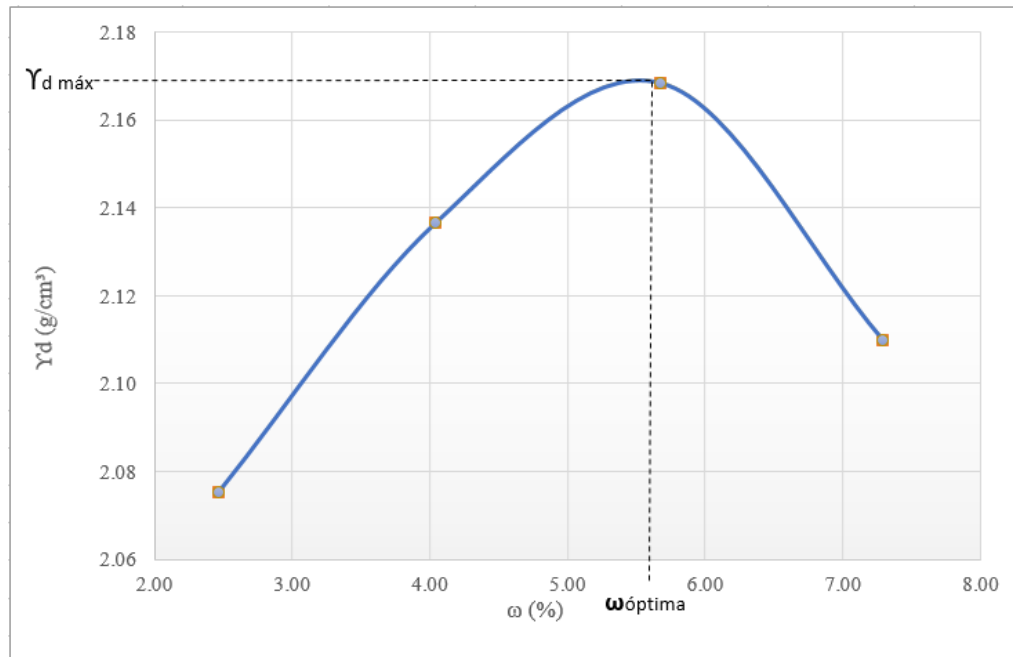
Gráfica 7: Curva de compactación con 3% de cemento.

Dando como resultado un peso específico seco máximo de 2.178 g/cm^3 (2177.56 kg/m^3) y una humedad óptima de 5.19%.

De la misma manera, en la Tabla 38 se detallan los resultados de cada una de las pruebas realizadas para el 5% de cemento. Para el ensayo 1, se obtuvo un contenido de humedad de 2.46% y un peso específico seco de 2.08 g/cm^3 , para la prueba 2 se obtuvo 4.04% y 2.14 g/cm^3 , para la tercera prueba se obtuvo 5.68% y 2.17 g/cm^3 , y finalmente para el ensayo 4 se obtuvo 7.29% de humedad y 2.11 g/cm^3 . Con estos datos se determina la curva de compactación de la Gráfica 8.

N° ensayo	1		2		3		4	
N° capas	5		5		5		5	
Golpes por capa	56		56		56		56	
Peso suelo compactado + molde (g)	10993		11198		11344		11285	
Peso molde (g)	6476.69		6476.69		6476.69		6476.69	
Volumen molde (cm^3)	2124		2124		2124		2124	
Y húmedo (g/cm^3)	2.13		2.22		2.29		2.26	
N° Tara	26 -Medio	31 - Fondo	72 -Medio	29 - Fondo	95 -Medio	90 - Fondo	65 -Medio	21 - Fondo
Peso Tara (g)	31.52	31.53	31.64	31.42	29.98	30.33	30.44	31.59
Peso Tara + suelo húmedo (g)	128.03	148.59	116.81	111.73	107.16	110.05	118.16	137.21
Peso Tara + suelo seco (g)	125.84	145.62	113.38	108.73	102.82	105.97	112.09	130.17
Humedad (%)	2.3219	2.603	4.196	3.880	5.958	5.394	7.434	7.141
Humedad promedio (%)	2.46		4.04		5.68		7.29	
Yd (g/cm^3)	2.08		2.14		2.16849		2.11	

Tabla 38: Resultados del ensayo Proctor Modificado con 5% de cemento.



Gráfica 8: Curva de compactación con 5% de cemento.

Dando como resultado un peso específico seco máximo de 2.168 g/cm^3 (2168.49 kg/m^3) y una humedad óptima de 5.68% .

Como se explicó anteriormente, para el contenido de 4% de cemento se realizó un promedio entre los extremos del rango, dando como resultado un peso específico seco máximo de 2.173 g/cm^3 (2173.03 kg/m^3) y una humedad óptima de 5.44% .

Terminado este ensayo se debe elaborar especímenes con cada uno de los contenidos de cemento para someterlos a la prueba de Compresión Simple y determinar su resistencia.

- **Especímenes y Ensayo a Compresión Simple**

Para la realización de los especímenes se prepara el material, comúnmente es necesario entre 29 y 30 kg para llenar 2 moldes grandes que posee el laboratorio de la empresa ASFALTAR EP.

Primero, se debe determinar la humedad inicial del material, que en este caso es de 1.85% . Posteriormente, se determina las cantidades de cada uno de los materiales



que van a conformar las mezclas, siguiendo las ecuaciones 27 a 31:

$$\text{Total de agua} = \text{Peso total} * \text{Humedad óptima}$$

Ecuación 27

$$\text{Total material seco} = \text{Peso total} - \text{Total de agua}$$

Ecuación 28

$$\text{Total de agua en la muestra} = \text{Total material seco} * \text{Humedad inicial}$$

Ecuación 29

$$\text{Agua a añadir} = \text{Total de agua} - \text{Total de agua en la muestra}$$

Ecuación 30

$$\text{Peso de material} = \text{Total material seco} + \text{Total de agua en la muestra}$$

Ecuación 31

En la Tabla 39 se muestran los resultados de las cantidades que conforman cada mezcla:

Dimensiones	Mezcla 3%	Mezcla 4%	Mezcla 5%
Peso de material (g)	28003.55	27929.7	27858.83
Agua a añadir (g)	996.45	1070.3	1141.17
Cemento (g)	870	1160	1450

Tabla 39: Cantidad de material que componen cada mezcla.

Los moldes tienen 30 cm de altura y un diámetro de alrededor de 15.5 cm, al realizar los especímenes se debe colocar la mezcla en 5 capas con 56 golpes en cada una. Como recomendación, al término de cada capa se raspa la superficie y se humedece con el fin de que éstas tengan mejor adherencia.

Una vez que se termina la última capa, se enrasa y se cubre con una funda plástica para que no pierda humedad, se deja en el molde 24 horas o el tiempo que sea necesario. Transcurrido este tiempo se sacan los especímenes de los moldes, se sumergen en agua por unos segundos y se envuelven con plástico para mantener la humedad.

Con estos especímenes se realiza el ensayo de Compresión Simple a los 7 y 28 días, siendo la resistencia de este último según la norma MOP-001-F 2002 no

inferior a 25 kg/cm^2 , en la Ilustración 24 se observan los especímenes a ensayarse.



Ilustración 24: Especímenes para ensayo de Compresión Simple.

Según la ficha técnica de Holcim Base Vial las resistencias mínimas se detallan en la Tabla 40, que para el caso de la presente investigación serían las resistencias para un suelo arenoso y grava.

Clasificación SUCS.	Descripción genérica del suelo.	f' c mínima a 7 días (MPa).	f' c mínima a 28 días (MPa).	Rango típico de uso de Base Vial (% en peso).
Gw, GC, GP, GM, SW, SC, SP, SM	Suelos arenosos y gravas	2.1	2.7	4 a 11
CL, ML	Suelos limosos	1.8	2.1	7 a 12
MH, CH	Suelos arcillosos	1.4	1.7	10 a 16

Tabla 40: Resistencias mínimas por tipo de suelo estabilizado con Base Vial. Fuente: (Holcim Ecuador S.A., 2018).

En la Tabla 41 y Tabla 42 se detallan las resistencias obtenidas de los especímenes que fueron realizados, estos valores son muy cercanos a las resistencias expuestas en la tabla anterior (ficha técnica de Holcim) y al valor de 25 kg/cm^2 presentada por la MOP-001-F 2002.



Contenido de Cemento	3%		4%		5%	
	1	2	1	2	1	2
N° Muestra	1	2	1	2	1	2
Diámetro (cm)	15.47	15.40	15.50	15.17	15.37	15.43
Peso (kg)	12.189	11.995	12.130	11.622	11.972	12.631
Altura (cm)	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Área (m ²)	0.019	0.019	0.019	0.018	0.019	0.019
Carga (kN)	8.83	13.70	9.91	24.30	26.50	24.20
Esfuerzo (MPa)	1.260	1.310	1.870	1.630	2.050	1.920
Esfuerzo (kg/cm ²)	12.850	13.350	19.070	16.620	20.900	19.580

Tabla 41: Resultados de ensayo a Compresión Simple - 7 días.

Contenido de Cemento	3%		4%		5%	
	1	2	1	2	1	2
N° Muestra	1	2	1	2	1	2
Diámetro (cm)	15.46	15.40	15.78	15.40	15.45	15.43
Peso (kg)	11.915	11.879	12.473	10.807	11.973	11.925
Altura (cm)	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Área (m ²)	0.019	0.019	0.020	0.019	0.019	0.019
Carga (kN)	33.90	33.33	33.80	39.70	49.90	42.30
Esfuerzo (MPa)	1.806	1.789	2.110	2.131	2.662	2.630
Esfuerzo (kg/cm ²)	18.420	18.240	21.490	21.730	27.140	26.790

Tabla 42: Resultados de ensayo a Compresión Simple - 28 días.

Contenido de Cemento	5%	
Esfuerzo (MPa)	2.662	2.630
Esfuerzo (kg/cm ²)	27.140	26.790

Tabla 43: Porcentaje óptimo de cemento.

Como se puede ver en la Tabla 43, la mezcla con 5% de cemento sobrepasó los 25 kg/cm² de resistencia por lo que se concluye que este porcentaje es el óptimo para ser colocado en la vía.

- **Ensayo CBR**

Para cada una de las mezclas se realizó el ensayo CBR para conocer la resistencia y soporte de cada una de ellas. La hipótesis sobre este ensayo es que los resultados obtenidos de CBR serán mayores a 100% debido a la densificación que causa el cemento.

Se realiza un solo molde con 56 golpes para cada uno de los porcentajes de cemento, es decir, se tienen 3 moldes en total. El procedimiento a seguir para el presente ensayo es el detallado en la sección 3.10 del capítulo anterior, con la diferencia de que se agregará el porcentaje de cemento correspondiente.

En la Tabla 44 se detallan las humedades de cada molde antes de la inmersión, y en la Tabla 45 se determina el porcentaje de expansión o esponjamiento de cada una de las muestras durante la inmersión.

CONTENIDO DE AGUA (Antes de Saturación)						
% de cemento	3%		4%		5%	
Tara #:	13	25	75	62	108	9
Tara + Suelo Húmedo (g)	106.12	107.05	132.17	108.77	117.48	130.65
Tara + Suelo Seco (g)	102.33	103.82	127.16	104.98	112.17	124.81
Peso de la Tara (g)	31.78	31.67	29.76	30.41	31.06	31.55
Peso de Agua (g)	3.79	3.23	5.01	3.79	5.31	5.84
Peso de Suelo Seco (g)	70.55	72.15	97.40	74.57	81.11	93.26
Contenido de Humedad (%)	5.37	4.48	5.14	5.08	6.55	6.26
Humedad Promedio (%)	4.92		5.11		6.40	

Tabla 44: Humedad del material antes de la inmersión de moldes.

DATOS DE ESPONJAMIENTO													
FECHA	DÍAS EN AGUA	MOLDE #: 1				MOLDE #: 2				MOLDE #: 3			
		Hora	Lectura Dial	Altura Muestra	Esponjam. %	Hora	Lectura Dial	Altura Muestra	Esponjam. %	Hora	Lectura Dial	Altura Muestra	Esponjam. %
			0.001pulg	pulg			0.001pulg	pulg			0.001pulg	pulg	
5-dic.-2020	0.00	12:30	0	4.570	0.00	12:30	0	4.570	0.00	12:30	0	4.570	0.00
6-dic.-2020	1.00	12:30	0.5	4.571	0.01	12:30	1	4.571	0.02	12:30	0.5	4.571	0.01
7-dic.-2020	2.00	12:30	3	4.573	0.07	12:30	1.5	4.572	0.03	12:30	1	4.571	0.02
8-dic.-2020	3.00	12:30	3	4.573	0.07	12:30	1.5	4.572	0.03	12:30	1	4.571	0.02
9-dic.-2020	4.00	12:30	3	4.573	0.07	12:30	1.5	4.572	0.03	12:30	1	4.571	0.02
10-dic.-2020	5.00	12:30	3	4.573	0.07	12:30	1.5	4.572	0.03	12:30	1	4.571	0.02
11-dic.-2020	6.00	12:30	3	4.573	0.07	12:30	1.5	4.572	0.03	12:30	1	4.571	0.02
12-dic.-2020	7.00	12:30	3	4.573	0.07	12:30	1.5	4.572	0.03	12:30	1	4.571	0.02

Tabla 45: Cálculo de Esponjamiento.

Los moldes fueron dejados en inmersión por 7 días y transcurrido este tiempo se realizó el ensayo de penetración cuyos datos se especifican en la Tabla 46, asimismo, la humedad obtenida después de este ensayo se detalla en la Tabla 47. Finalmente, en la Tabla 48 se muestra la determinación de los valores de CBR para cada uno de los porcentajes.

Penetración	3% cemento	4% cemento	5% cemento
0.001 pulg	Lectura dial	Lectura dial	Lectura dial
0	0	0	0
25	98	115	120
50	185	205	200
75	310	325	325
100	425	434	458
125	515	560	570

Tabla 46: Resultados del Ensayo de Penetración.



CONTENIDO DE AGUA (Después de Saturación)						
% de cemento	3%		4%		5%	
Tara #:	24	62	108	106	87	74
Tara + Suelo Húmedo (g)	125.87	130.76	122.80	131.34	124.8	123.92
Tara + Suelo Seco (g)	119.74	124.54	117.11	124.62	118.57	118.02
Peso de la Tara (g)	31.53	30.41	31.08	30.62	31.08	30.13
Peso de Agua (g)	6.13	6.22	5.69	6.72	6.23	5.90
Peso de Suelo Seco (g)	88.21	94.13	86.03	94.00	87.49	87.89
Contenido de Humedad (%)	6.95	6.61	6.61	7.15	7.12	6.71
Humedad Promedio (%)	6.78		6.88		6.92	

Tabla 47: Humedad del material después de la inmersión de moldes.



PENET.	PRESIÓN ESTÁND.	MOLDE #: 1		% cemento	3
		CARGA	PRESIÓN	PRESIÓN CORREG	C.B.R.
0.001 pulg	Lb/pulg ²	Lb	Lb/pulg ²	Lb/pulg ²	
0.0		0	0.0		
25.0		951.318	317.2		
50.0		1773.503	591.4		
75.0		2954.803	985.3		
100	1000	4041.599	1347.8	1347.8	135%
125		4892.135	1631.4		
PENET.	PRESIÓN ESTÁND.	MOLDE #: 2		% cemento	4
		CARGA	PRESIÓN	PRESIÓN CORREG	C.B.R.
0.001 pulg	Lb/pulg ²	Lb	Lb/pulg ²	Lb/pulg ²	
0.0		0	0.0		
25.0		1111.975	370.8		
50.0		1962.511	654.4		
75.0		3096.559	1032.6		
100	1000	4126.6526	1376.1	1376.1	138%
125		5317.403	1773.2		
PENET.	PRESIÓN ESTÁND.	MOLDE #: 3		% cemento	5
		CARGA	PRESIÓN	PRESIÓN CORREG	C.B.R.
0.001 pulg	Lb/pulg ²	Lb	Lb/pulg ²	Lb/pulg ²	
0.0		0	0.0		
25.0		1159.227	386.6		
50.0		1915.259	638.7		
75.0		3096.559	1032.6		
100	1000	4353.4622	1451.8	1451.8	145%
125		5411.907	1804.7		

Tabla 48: Determinación de CBR.

Como se puede ver en la Tabla 48, el valor de CBR solo se obtiene para una penetración de 0.01" ya que el ensayo terminó en este punto.

Los resultados finales de este ensayo son densidad seca máxima, 95% densidad seca máxima y CBR que se detallan en las Tabla 49 y Tabla 50.

DENSIDAD HÚMEDA Y SECA						
MOLDE #:	1	2	3			
No. de Capas	5	5	5			
% de cemento	3	4	5			
Espécimen:	Antes de Remojo	Después de Remojo	Antes de Remojo	Después de Remojo	Antes de Remojo	Después de Remojo
Molde + Suelo Húmedo (g)	12784	12850.5	12809	12875	12870	12906
Peso Molde (g)	8000	8000	8016	8016	8004	8004
Peso Suelo Húmedo (g)	4784	4850.5	4793	4859	4866	4902
Volumen de la Muestra (cm ³)	3230.00	3230.00	3230.00	3230.00	3230.00	3230.00
Densidad Húmeda (kg/m ³)	1481	1502	1484	1504	1507	1518
Densidad Seca (kg/m ³)	1412	1406	1412	1407	1416	1419

Tabla 49: Determinación de densidades.

RESULTADOS	
Densidad seca máx. (kg/m ³)	1419
95% Densidad seca máx. (kg/m ³)	1348
C.B.R. máx. (%)	145

Tabla 50: Resultados finales de ensayo CBR.

Como se pueden ver los resultados en las tablas anteriores, la hipótesis planteada fue correcta ya que los porcentajes de CBR obtenidos para cada una de las mezclas realizadas sobrepasó el 100%, esto debido a la densificación que causa el cemento en el material.

4.1.2. DISEÑO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA

Para la elaboración de estas mezclas se utilizó el material fresado, emulsión asfáltica proporcionada por la empresa ASFALTAR EP y agua. Se realizaron probetas para el ensayo Marshall utilizando 1200 g de material mezclado con una relación 1:1 de emulsión y agua, a cada probeta se aplican 75 golpes por cara. Se realizaron 3 probetas con 50, 75 y 100 g de la mezcla emulsión-agua usando el equipo Marshall que se puede observar en la Ilustración 25:



Ilustración 25: Equipo Marshall.

Una vez elaboradas las probetas Marshall, se dejan en el molde por 24 horas y transcurrido este tiempo se procede a calcular su densidad Bulk tomando pesos en aire, en estado SSS y sumergido como se detalló en la sección 3.11. Posteriormente, se ensayó en la prensa Marshall para obtener datos de carga y deformación; estos datos y las densidades se detallan en la Tabla 51.

Peso Emulsión:Agua	Probetas Marshall	Peso Seco (g)	Peso SSS (g)	Peso Sumergido (g)	Volumen	Gmb	Gmb promedio	ENSAYO MARSHALL	
								Estabilidad (lbf)	Flujo (mm)
50 g	1	1163.40	1166.10	645.80	520.30	2.236	2.230	7464.70	12.20
	2	1179.48	1182.63	655.14	527.49	2.236		7125.60	13.60
	3	1171.25	1174.35	646.34	528.01	2.218		7220.70	12.10
75 g	4	1194.72	1195.75	661.93	533.82	2.238	2.218	7319.40	14.90
	5	1158.06	1159.61	637.27	522.34	2.217		7057.00	14.60
	6	1169.42	1169.95	638.07	531.88	2.199		8320.30	14.30
100 g	7	1181.04	1181.19	645.00	536.19	2.203	2.202	7468.10	19.90
	8	1181.10	1181.25	645.83	535.42	2.206		7920.60	16.90
	9	1192.68	1192.61	650.10	542.51	2.198		7485.80	19.20

Tabla 51: Resultados de densidades y ensayo Marshall.

Terminado el ensayo se colocan las probetas en el horno para quitar el exceso de agua contenido en su interior, y poder desmenuzarlas y así realizar el ensayo RICE.

Una vez desmenuzadas las probetas se sigue el procedimiento detallado en la sección 3.11 dando así los resultados presentados en la Tabla 52.



ENSAYO RICE			
A (g)	B (g)	C (g)	Gmm
2500.00	16831.00	18358.00	2.569
2500.00	16831.00	18376.00	2.618
2500.00	16831.00	18344.00	2.533

Tabla 52: Cálculo de la gravedad teórica máxima (Gmm).

Finalmente, con los datos obtenidos del ensayo Marshall y el ensayo RICE, se determinan los valores de Estabilidad, Flujo y Porcentaje de vacíos como se especifican en la Tabla 53 (2% de emulsión), Tabla 54 (3% de emulsión), y Tabla 55 (4% de emulsión).

PROBETA	1	2	3
%EMULSIÓN ASFÁLTICA	2		
PESO AL AIRE (g)	1163.40	1179.48	1171.25
PESO SSS (g)	1166.10	1182.63	1174.35
PESO EN AGUA (g)	645.80	655.14	646.34
VOLUMEN (cm ³)	520.30	527.49	528.01
Gmb	2.24	2.24	2.22
Gmb Promedio	2.23		
Gmm	2.57		
%Vacíos Total Va	13.00	13.00	13.69
Va Promedio (%)	13.23		
Estabilidad sin Corregir (lbf)	7464.70	7125.60	7220.70
Flujo (mm)	12.20	13.60	12.10
Flujo Promedio (mm)	12.63		
Factor de correccion	1.00	0.96	0.96
Estabilidad Corregida (lbf)	7464.70	6840.58	6931.87
Estabilidad Promedio (lbf)	7079.05		

Tabla 53: Resultados finales - 2% emulsión asfáltica.



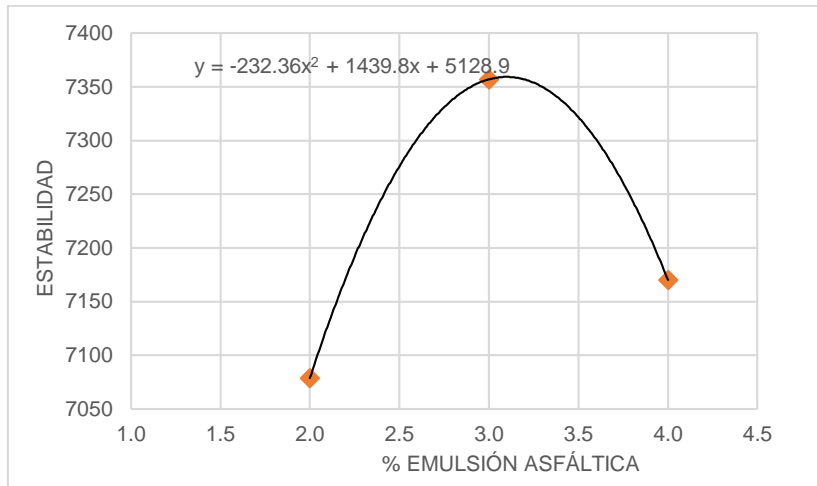
PROBETA	4	5	6
%EMULSIÓN ASFÁLTICA	3		
PESO AL AIRE (g)	1194.72	1158.06	1169.42
PESO SSS (g)	1195.75	1159.61	1169.95
PESO EN AGUA (g)	661.93	637.27	638.07
VOLUMEN (cm ³)	533.82	522.34	531.88
Gmb	2.24	2.22	2.20
Gmb Promedio	2.22		
Gmm	2.62		
%Vacíos Total Va	14.58	15.38	16.08
Va Promedio (%)	15.35		
Estabilidad sin Corregir (lbf)	7319.40	7057.00	8320.30
Flujo (mm)	14.90	14.60	14.30
Flujo Promedio (mm)	14.60		
Factor de correccion	0.96	1.00	0.96
Estabilida Corregida (lbf)	7026.62	7057.00	7987.49
Estabilidad Promedio (lbf)	7357.04		

Tabla 54: Resultados finales - 3% emulsión: agua.

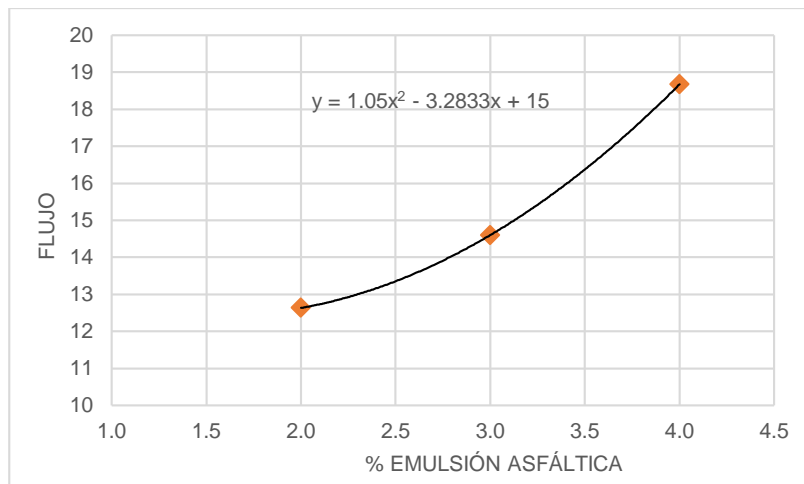
PROBETA	7	8	9
%EMULSIÓN ASFÁLTICA	4		
PESO AL AIRE (g)	1181.04	1181.10	1192.68
PESO SSS (g)	1181.19	1181.25	1192.61
PESO EN AGUA (g)	645.00	645.83	650.10
VOLUMEN (cm ³)	536.19	535.42	542.51
Gmb	2.20	2.21	2.20
Gmb Promedio	2.20		
Gmm	2.53		
%Vacíos Total Va	12.94	12.81	13.10
Va Promedio (%)	12.95		
Estabilidad sin Corregir (lbf)	7468.10	7920.60	7485.80
Flujo (mm)	19.90	16.90	19.20
Flujo Promedio (mm)	18.67		
Factor de correccion	0.93	0.96	0.93
Estabilida Corregida (lbf)	6945.33	7603.78	6961.79
Estabilidad Promedio (lbf)	7170.30		

Tabla 55: Resultados finales - 4% emulsión: agua.

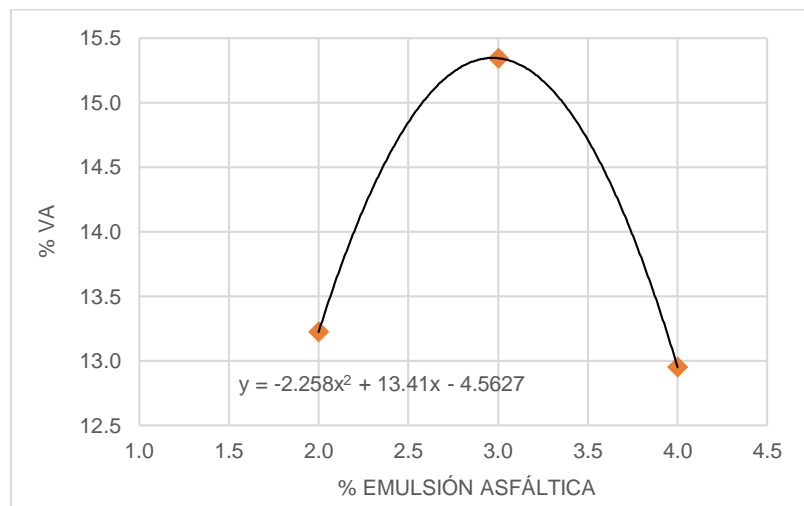
Con estos resultados, se realizan las curvas mostradas en la Gráfica 9 (Estabilidad), Gráfica 10 (Flujo) y Gráfica 11 (Porcentaje de vacíos) con las que se puede observar una tendencia en el comportamiento mecánico de las mezclas realizadas.



Gráfica 9: Estabilidad vs % Emulsión Asfáltica.



Gráfica 10: Flujo vs % Emulsión Asfáltica.



Gráfica 11: % Vacíos vs % Emulsión Asfáltica.

Si se observan los valores obtenidos anteriormente, se puede concluir que el uso de la emulsión asfáltica no es adecuado debido a que las mezclas tienen porcentajes de vacíos bastante altos, esto se puede ver a simple vista en la Ilustración 26 ya que las muestras presentan un exceso de porosidad y en la práctica la emulsión asfáltica no cubría por completo el agregado.

El rango aceptable que indica la Tabla 405-5.2 de norma MOP-001-F 2002 para el porcentaje de vacíos para una capa de base se encuentra entre 3 a 8% mientras que los resultados obtenidos varían de 12 a 15%.



Ilustración 26: Probetas Marshall - mezclas con emulsión asfáltica.

Al comparar los resultados entre las mezclas con cemento y con emulsión asfáltica se concluye que el que mejor actúan en el material fresado y contribuye a la optimización de sus características es el cemento, por lo que ésta será considerada para el diseño de la alternativa de rehabilitación que se detallará en el capítulo V.



CAPÍTULO V: DISEÑO DE LA ALTERNATIVA DE REHABILITACIÓN

En este capítulo se detalla el procedimiento seguido para el diseño de la rehabilitación con el uso de material fresado estabilizado con cemento Holcim Base Vial. El diseño se basa en el método AASHTO 1993 y se explica cada una de las consideraciones a tomar en cuenta para la determinación de los parámetros que influyen en el cálculo del número estructural y con ello realizar la configuración del pavimento.

5.1. ESTUDIO DEL TRÁFICO

5.1.1. TRÁFICO PROMEDIO DIARIO ANUAL (TPDA) Y PROYECCIONES DEL TRÁFICO.

Se considera el estudio de tráfico realizado en el 2007 por Asfaltar EP previo a la construcción de la estructura asfáltica que actualmente se va a rehabilitar, teniendo un TPDA (tráfico promedio diario anual), proyecciones y clasificaciones, para el nivel de servicio y su posterior rehabilitación. En la Tabla 56 se muestran los porcentajes de distribución de cada tipo de vehículo y el TPDA proyectado para 2009, 2019 y 2029 en función del estudio de tráfico realizado en el 2007; además, en la Tabla 57 se detallan las tasas para proyección de vehículos.

Para obtener el TPDA proyectado calculado, utilizando las tasas de crecimiento vehicular proporcionadas, se emplea la Ecuación 32 mostrada a continuación.

$$TPDA_{2021} = TPDA_{2019} * (1 + r)^n$$

Ecuación 32

r = tasa de crecimiento

n = periodo de diseño



Tipos de vehículos	% de distribución	TPDA proyectado		
		2009	2019	2029
Livianos	58.15	239	333	434
Buses (2 ejes)	2.92	12	14	18
Camiones C1 (2 ejes)	8.03	33	40	49
Camiones C2 (2 ejes)	16.30	67	82	101
Camiones C3 (3 ejes) eje tándem	14.60	60	73	90
Volumen Total	100	411	542	692
Vehículos Pesados	41.85	172	209	258

Tabla 56: Proyecciones del volumen de tráfico para el periodo de diseño, vía Guangarcucho-Jadán. Fuente: ASFALTAR EP.

Periodo	Livianos	Buses y Camiones
2007 – 2009	4.00	1.83
2009 – 2014	3.60	1.90
2014 – 2019	3.15	2.00
2019 – 2024	2.80	2.12
2024 – 2029	2.60	2.20

Tabla 57: Tasas para proyección de vehículos. Fuente: ASFALTAR EP.

Los valores mostrados en las tablas anteriores y los que se detallan a continuación fueron obtenidos del estudio de Geotecnia, Diseño de Pavimentos y Fuentes de Materiales proporcionado por la empresa ASFALTAR EP.

Con los resultados mostrados anteriormente de TPDA por carril, se tiene que la vía en estudio, según la tabla 2.A.202 Clasificación funcional de las vías en base al TPDA de la NEVI 12-2A “Norma para Estudios y Diseños Viales”, es una carretera C1 equivalente a una de mediana capacidad, es decir con volumen de tráfico medio (NEVI - 12 - MTOP, 2013).

5.1.2. FACTOR DE CARGA

El daño que cada tipo de vehículo causa en un pavimento está representado por el factor de equivalencia de carga por eje (F_{ec}), el mismo que indica el número de veces que pasa el eje normalizado de 8.2 ton por cada recorrido del tipo de vehículo que se está considerando.



Así el valor de F_{ec} expresa la relación entre la pérdida de servicio producida por la carga del eje normalizado de 8.2 toneladas y la carga producida por otro tipo de eje. En el pavimento circulan varios tipos de vehículos, transmitiendo diversos tipos de carga, por lo que, para su diseño, es necesario transformarlos a un solo tipo denominado estándar (Cevallos Garzón, 2015).

Definidos ya los factores de carga para cada tipo de vehículo, para simplificar el cálculo de tráfico equivalente, se define un Factor Camión Ponderado utilizando los factores de carga de cada vehículo y su participación porcentual dentro de la muestra.

Estudios y cálculos que fueron realizados por la empresa Asfaltar EP para el diseño del pavimento para el periodo de diseño y que se utilizaran en el estudio de la rehabilitación, se muestran a continuación en la Tabla 58.

Tipo de Vehículo	% de distribución	N° De Ejes	Peso Por Eje	Fec	Factor Camión Ponderado
Livianos	58.15	1	1	0.00051	0.00030
		2	2.5	0.01985	0.01154
Buses	2.92	1	4	0.13012	0.00380
		2	9	1.45116	0.04237
C1 (liviano)	8.03	1	2.5	0.01985	0.00159
		2	7	0.53105	0.04264
C2 (mediano)	16.30	1	5.5	0.46511	0.07581
		2	11	3.23829	0.52784
C3 (pesado)	14.60	1	5.5	0.46511	0.06791
		2	19	2.50672	0.36598
TOTAL					1.13978

Tabla 58: Determinación del factor de carga equivalente. Fuente: ASFALTAR EP.

Teniendo como factor de carga $F_{ec} = 1.14$.

5.1.3. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES



Se procede a determinar el total de número de ejes equivalentes, con los parámetros obtenidos anteriormente y otras consideraciones realizadas en el diseño de pavimentos según la AASHTO 93, donde N (W18) es el número de ejes simples equivalentes acumulados durante el periodo de diseño y carril de diseño. Éste se determina por medio de la Ecuación 33:

$$N = TPDA * \%V_C * F_D * F_L * F_{proy} * F_{ec} * 365$$

Ecuación 33

Donde:

$\%V_C$ = Porcentaje de Vehículos Pesados

F_D = Factor de distribución por dirección

F_L = Factor de distribución por carril

F_{ec} = Factor camión ponderado

F_{proy} = Factor de proyección vehicular

El factor de proyección vehicular para el diseño de pavimentos flexibles según el método AASHTO 93, está dado por la Ecuación 34 con la tasa de variación correspondiente obtenido en el estudio del tráfico y siendo n el periodo de diseño.

$$F_{proy} = \frac{(1 + r)^n - 1}{n}$$

Ecuación 34

Donde:

r = tasa de crecimiento

n = periodo de diseño

Para el periodo de diseño y con los parámetros obtenidos del análisis se obtiene el número de ejes simples equivalentes que se utilizó (primera etapa) y se utilizará posteriormente en el diseño de la rehabilitación (segunda etapa), los cuales se muestran a continuación en la Tabla 59.



Periodo de Diseño	F_D	F_L	N (W18) Repeticiones
2009 – 2019	0.5	1	991,167
2019 – 2029	0.5	1	1'283,421
TOTAL			2'274,588

Tabla 59: Número de ejes simples equivalentes para el periodo de diseño. Fuente: ASFALTAR EP.

5.2. DISEÑO DE LA REHABILITACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE LA AASHTO – 1993

Para la propuesta de rehabilitación planteada, se tiene como idea de diseño, realizar el reciclado de la carpeta asfáltica existente y utilizarla como una base estabilizada con cemento, teniendo así una capa extra en la estructura del pavimento, previa a la colocación de la capa de rodadura, utilizando el método AASHTO - 1993.

Las características que tendrá la base estabilizada con cemento son las obtenidas en el capítulo anterior, donde se diseñaron las mezclas con diferentes porcentajes de cemento vial (Holcim Base Vial), el espesor de la misma será igual al espesor que tuvo la capa de rodadura previo al fresado, al igual que para el ancho y largo del pavimento se utilizan las dimensiones de diseño del pavimento inicial.

5.2.1. FÓRMULA AASHTO 1993

El método seleccionado permite diversas estrategias de diseño, desde estructuras construidas para que duren todo el periodo de análisis hasta pavimentos que puedan ser construidos por etapas con una estructura inicial y colocación de sobrecapas.

Las variables a considerar para este método son:

- Características de ejecución del pavimento
- Estudio de tráfico (N o W18)
- Características de la subrasante
- Características de los materiales de construcción a utilizar
- Medio ambiente de la zona del proyecto



- Nivel de serviciabilidad
- Drenaje
- Grado de Confiabilidad

La vida útil mínima para la que se diseña un pavimento flexible es de 10 años; en el caso del pavimento en estudio el diseño está realizado para 20 años teniendo una rehabilitación en los primeros 10.

La Ecuación 35 mostrada a continuación es la empleada para el diseño de pavimentos flexibles con este método:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R * S_O + 9.36 * \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN)^{5.19}}} + 2.32 * \log_{10}(M_R) - 8.07$$

Ecuación 35

Donde:

Z_R = Desviación estandar normal

S_O = Error estandar combinado del tráfico y comportamiento de la estructura

PSI = Pérdida de serviciabilidad prevista en el diseño

M_R = Módulo resiliente de la subrasante (psi)

SN = Número estructural requerido. El SN es un número abstracto, que expresa la resistencia estructural de un pavimento requerido, para una combinación dada de soporte del suelo (M_r), del tránsito total (W_{18}), de la serviciabilidad terminal, y de las condiciones ambientales (Montejo Fonseca, 1997).

El número estructural total que posee un pavimento se encuentra en función de los espesores efectivos (D_i) de las capas que lo constituyen, de los coeficientes de drenaje de las mismas (m_i) y de los coeficientes estructurales (a_i) que representan la resistencia relativa del material de cada capa, para ello se aplica la Ecuación 36:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 + \dots + a_n D_n m_n$$

Ecuación 36

$a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ = Coeficientes estructurales

Un esquema de la estructura del pavimento y los parámetros utilizados en la

Ecuación 36, se muestra en la Ilustración 27.

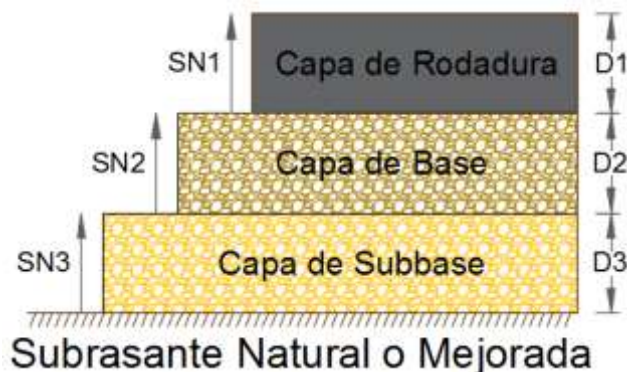


Ilustración 27: Esquema de parámetros considerados para la ecuación del número estructural (SN).

El diseño propuesto para la rehabilitación del pavimento consta de seis capas colocadas sobre la subrasante: el material de mejoramiento existente antes de la primera etapa de pavimentación, material de mejoramiento, la base granular existente, base granular nueva, base estabilizada con cemento producto del reciclado de la carpeta asfáltica deteriorada y la nueva capa de rodadura a colocarse.

5.2.2. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS

La desviación estándar normal Z_R correspondiente a un nivel de confiabilidad (R) que se muestra en la Tabla 60 contiene valores sugeridos por la guía AASHTO 93 para diseño de pavimentos, de manera que exista una probabilidad determinada de que el tránsito realmente soportado sea inferior a $Z_R S_0$.

Clasificación Funcional	Nivel de Confiabilidad Recomendado	
	Urbano	Rural
Interestatal y Otras Vías Libres	85 - 99.9	80 - 99.9
Arterias Principales	80 - 99	75 - 95
Colectoras	80 - 95	75 - 95
Locales	50 - 80	50 - 80

Tabla 60: Niveles de confiabilidad sugeridos para varias clasificaciones funcionales. Fuente: (AASHTO, 1993).

Con los estudios realizados por medio de la empresa Asfaltar EP, el pavimento se diseñó con un nivel de confiabilidad de 50% y de acuerdo con la Tabla 61



proporcionada en la guía de la AASHTO 93 para el diseño de pavimentos, que relaciona el nivel de confiabilidad R y Z_R , se tiene como resultado $Z_R = 0$.

Confiabilidad, R (%)	Desviación Estandar Normal, Z_R
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

Tabla 61: Valores de la desviación estándar normal Z_R correspondientes a niveles seleccionados de confiabilidad R .
Fuente: (AASHTO, 1993).

Para la desviación estándar (S_0) los valores típicos desarrollados por la AASHTO para pavimentos flexibles son de 0.40 y 0.50, escogiendo para este proyecto un promedio de los dos, siendo el mismo valor con el que se diseñó inicialmente el pavimento, $S_0 = 0.45$.

La variación en el nivel de serviciabilidad (ΔPSI) de un pavimento se define como la capacidad de servir al tipo de tránsito para el cual se diseñó, se tiene un índice de servicio el cual varía entre los rangos de valores de 0 (pésimas condiciones) y 5 (perfecto); para el diseño de un pavimento se debe elegir el índice inicial y el final.

El índice inicial (PSI_0) es función del diseño del pavimento y la calidad de construcción, mientras que el índice final (PSI_T) es función de la categoría o importancia de la vía. Los valores recomendados por la AASHTO se encuentran detallados en la Tabla 62:



FUNCIÓN DE LA CARRETERA	PSI_0	PSI_T	ΔPSI
Corredores Arteriales	4.5	2.5	2
Colectores	4.5	2	2.5
Otros	4.2	2	2.2

Tabla 62: Valores recomendados por la AASHTO para el índice de servicio.

Para el análisis, por estar la carreta en la categoría otros, se adopta:

$$PSI_0 = 4.2 \quad PSI_T = 2$$

$$\Delta PSI = 2.2$$

El módulo resiliente M_R es uno de los factores más importantes en el diseño de un pavimento ya que representa la capacidad de los suelos de la subrasante, el valor de la misma se lo establece por correlación con el CBR (%) como se indica en la Ecuación 37 y Ecuación 38 proporcionadas en el diseño según el método AASHTO 1993:

$$\text{Si } CBR < 10\% \quad M_R = 1500(CBR)$$

Ecuación 37

$$\text{Si } CBR > 10\% \quad M_R = 2555(CBR^{0.64})$$

Ecuación 38

5.2.3. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO ESTRUCTURAL REQUERIDO

Aplicando el modelo matemático antes indicado y conociendo los parámetros mostrados anteriormente, se obtiene el número estructural requerido para el periodo de diseño, tanto en la primera etapa (construcción del pavimento actualmente deteriorado) como en la segunda etapa (rehabilitación actual), mismos datos y análisis realizados por Asfaltar EP con los que se diseñó el pavimento.

- Primera Etapa – Hasta el año 2019

Número de ejes simples equivalentes acumulados	W_{18}	991167
Desciación estandar normal con $R = 50\%$	Z_R	0.00
Error estandar combinado	S_o	0.45
Variación de la serviciabilidad	ΔPSI	2.2
Varor relativo de soporte de la subrasante	CBR	4%
Módulo resiliente de la subrasante	M_R	6000 (psi)
Número estructural requerido calculado	SN	2.94

Tabla 63: Determinación del Número estructural - Primera etapa. Fuente: Asfaltar EP.

Como se indica en la Tabla 63 el número estructural requerido, con el número de ejes equivalentes establecidos en el estudio del tráfico y dentro de los primeros 10 años del periodo de diseño (primera etapa), utilizando tanto la Ecuación 35 (ecuación de W_{18}) como el programa computacional AASHTO 93, es de 2.94, resultado que se indica posteriormente en la Ilustración 28.



The screenshot shows the 'Ecuación AASHTO 93' software window. The interface is divided into several sections:

- Tipo de Pavimento:** Radio buttons for 'Pavimento flexible' (selected) and 'Pavimento rígido'.
- Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So):** A dropdown menu set to '50 % $Z_r = 0.000$ ' and a text box for S_o set to '0.45'.
- Serviciabilidad inicial y final:** Text boxes for 'PSI inicial' (4.2) and 'PSI final' (2).
- Módulo resiliente de la subrasante:** Text box for M_r (6000 psi).
- Información adicional para pavimentos rígidos:** Text boxes for 'Módulo de elasticidad del concreto - E_c (psi)', 'Módulo de rotura del concreto - S_c (psi)', 'Coeficiente de transmisión de carga - (J)', and 'Coeficiente de drenaje - (Cd)'. All are currently empty.
- Tipo de Análisis:** Radio buttons for 'Calcular SN' (selected) and 'Calcular W_{18} '. The W_{18} value is shown as 991167.
- Número Estructural:** The calculated SN value is displayed as 2.94.
- Buttons:** 'Calcular' and 'Salir' buttons are at the bottom.

Ilustración 28: Número estructural según programa AASHTO 93 – Primera etapa.

- Segunda Etapa – Hasta el año 2029

<i>Número de ejes simples equivalentes acumulados</i>	W_{18}	2274588
<i>Confiabilidad con $R = 50\%$</i>	Z_R	0.00
<i>Desvío estandar para el diseño</i>	S_o	0.45
<i>Variación de la serviciabilidad</i>	ΔPSI	2.2
<i>Varor relativo de soporte de la subrasante</i>	CBR	4%
<i>Módulo resiliente de la subrasante</i>	M_R	6000 (psi)
<i>Número estructural requerido calculado</i>	SN	3.32

Tabla 64: Determinación del Número estructural - Segunda etapa. Fuente: Asfaltar EP.

Como se indica en la Tabla 64, el número estructural requerido, con el número de ejes equivalentes establecidos en el estudio del tráfico para los 20 años del periodo de diseño (segunda etapa) utilizando tanto la Ecuación 35 (ecuación de W_{18}) como el programa computacional AASHTO 93 es de 3.33, resultado que se indica posteriormente en la Ilustración 29.

The screenshot shows the 'Ecuación AASHTO 93' software window. It contains several input fields and a calculation button. The 'Tipo de Pavimento' section has 'Pavimento flexible' selected. 'Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So)' shows '50 % $Z_R = -0.000$ ' and 'So = 0.45'. 'Serviciabilidad inicial y final' shows 'PSI inicial = 4.2' and 'PSI final = 2'. 'Módulo resiliente de la subrasante' shows 'Mr = 6000 psi'. The 'Tipo de Análisis' section has 'Calcular SN' selected, with 'W18 = 2274588' and 'Número Estructural SN = 3.33' displayed. A 'Calcular' button is visible at the bottom.

Ilustración 29: Número estructural según programa AASHTO 93 – Segunda etapa.

5.3. DETERMINACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

Considerando el espesor de cada capa constituyente del pavimento en análisis, los coeficientes estructurales de las mismas, presentados en los nomogramas de la guía de la AASHTO para diseño de estructuras de pavimentos, tanto para carpeta



asfáltica (a_1), base (a_2), y subbase (a_3), se obtiene el número estructural con el que fue diseñado el pavimento al inicio del periodo de diseño, año 2009 por la empresa Asfaltar EP, el número estructural calculado para la rehabilitación actual y el número que tendrá con el reciclado de la capa de rodadura al momento de realizar la alternativa de rehabilitación.

5.3.1. NÚMERO ESTRUCTURAL REAL – PRIMERA Y SEGUNDA ETAPA

Con la estructura actual del pavimento, misma que se construyó en el año 2009, la información proporcionada por la empresa Asfaltar y los ensayos de laboratorio realizados en el presente estudio, las capas constituyentes tanto del pavimento inicial como su posterior rehabilitación, actual y alternativa en análisis tienen las siguientes características y dimensiones:

- **Coeficiente estructural:**

Como se indicó anteriormente, estos coeficientes se determinaron a partir de los nomogramas de la guía de diseño de la AASHTO, donde para la carpeta asfáltica se determina a partir de su módulo de elasticidad y tanto para la capa de base granular como para el mejoramiento (subbase) se determina a partir de su CBR. Estos nomogramas se pueden encontrar en la sección de ANEXO II-a: Nomogramas.

En la Tabla 65, se detallan los rangos de valores y valores recomendados de coeficientes estructurales para cada superficie:



CLASE DE MATERIAL	NORMAS	ai
CAPA SUPERFICIE		
Concreto asfáltico	Estabilidad Marshall 1000 – 1800lbs	0.134 – 0.173
Arena asfáltica	Estabilidad Marshall 500 – 800lbs	0.079 – 0.118
CAPA DE BASE		
Agregados triturados, graduados uniformemente	PI: 0 - 4 CBR>100%	0.047 – 0.055
Grava graduada uniformemente	PI: 0 - 4 CBR (30- 80%)	0.028 – 0.051
Agregado grueso estabilizado con cemento	Resistencia a compr. 28 – 46 kg/cm ²	0.079 – 0.142
Suelo – cemento	Resistencia a compr. 18 – 32 kg/cm ²	0.059 – 0.071
CAPA DE SUBBASE		
Arena – grava graduada uniformemente	PI: 0 - 6 CBR>30%	0.035 – 0.043
Suelo - cemento	Resistencia a compr. 18 – 32 kg/cm ²	0.059 – 0.071
MEJORAMIENTO DE SUBRASANTE		
Arena o suelo seleccionado	PI: 0 - 10	0.020 – 0.035
Suelo con cal	3% mín de cal en peso de los suelos	0.028 – 0.039
TRATAMIENTO SUPERFICIAL BITUMINOSO		
Simple Riego	Valor para los diferentes tratamientos bituminosos, sin calcular espesores	0.15
Doble Riego		0.25
Triple Riego		0.4

Tabla 65: Valores de coeficiente estructural (a_i) recomendados por la AASHTO 93. Fuente: (AASHTO, 1993).

- **Coeficiente de drenaje:**

Los coeficientes de drenaje de los estratos del pavimento con los que se diseñó, representan la calidad del drenaje y el tiempo en el que cada uno de los estratos está sometido a niveles de humedad cercanas a la saturación. Para ello se utilizan los valores presentados por la guía AASHTO 93 para diseño de pavimentos, que se indican a continuación en la Tabla 66.



Calidad del Drenaje	% del Tiempo que la Estructura del Pavimento está Expuesta a Niveles de Humedad Cercanos a la Saturación			
	< 1	1 - 5	5 - 25	> 25
Excelente	1.40 - 1.35	1.35 - 1.30	1.30 - 1.20	1.20
Bueno	1.35 - 1.25	1.25 - 1.15	1.15 - 1.00	1.00
Regular	1.25 - 1.15	1.15 - 1.05	1.05 - 0.80	0.80
Pobre	1.15 - 1.05	1.05 - 0.8	0.80 - 0.60	0.60
Muy Pobre	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.40

Tabla 66: Valores de m_i recomendados para los coeficientes de capa en pavimentos flexibles. Fuente: (AASHTO, 1993).

En el proyecto, con estudios de Asfaltar y por el tipo de material empleado en la construcción se usaron valores de coeficientes 1.0 para la base granular y capa de mejoramiento y 0.8 para el mejoramiento existente.

En la Tabla 67 y Tabla 68 de resumen se muestran los valores del coeficiente y espesor de cada capa con los que se diseñó el pavimento; mismos que se utilizarán para el cálculo del número estructural para la primera y segunda etapa utilizando la Ecuación 36 (SN).

Número estructural diseñado – Primera etapa (Año 2009, construida)

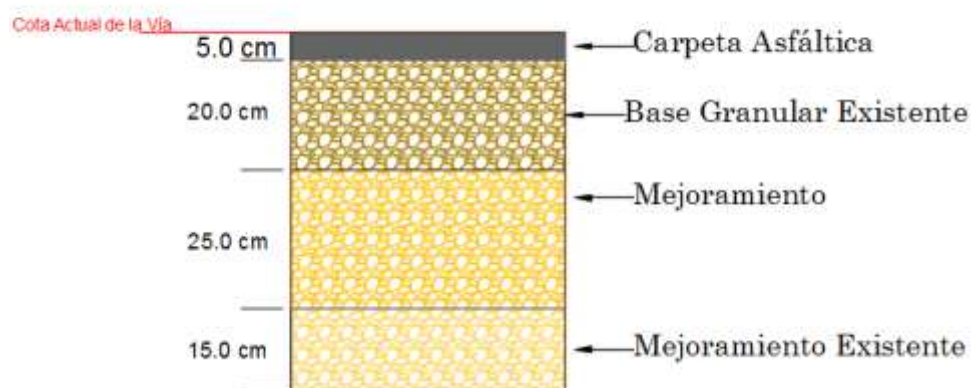
CAPA	CBR	COEFICIENTE ESTRUCTURAL	COEFICIENTE DE DRENAJE	ESPESOR
	(%)	(a_i)	(m_i)	(cm)
Concreto Asfáltico		0.42		5
Base Granular	80	0.13	1	20
Mejoramiento	20	0.09	1	25
Mejoramiento existente	16.6	0.085	1	15

Tabla 67: Datos para determinar el SN - Primera etapa. Fuente: ASFALTAR EP.

$$\text{Número Estructural} \quad SN = 3.15$$

En la Gráfica 12 se presenta el esquema de la conformación del paquete estructural inicial.

Estructura Inicial del Pavimento Primera Etapa



Gráfica 12: Esquema de la estructura inicial del pavimento - Primera etapa.

Número estructural diseñado – Segunda etapa (Rehabilitación actual)

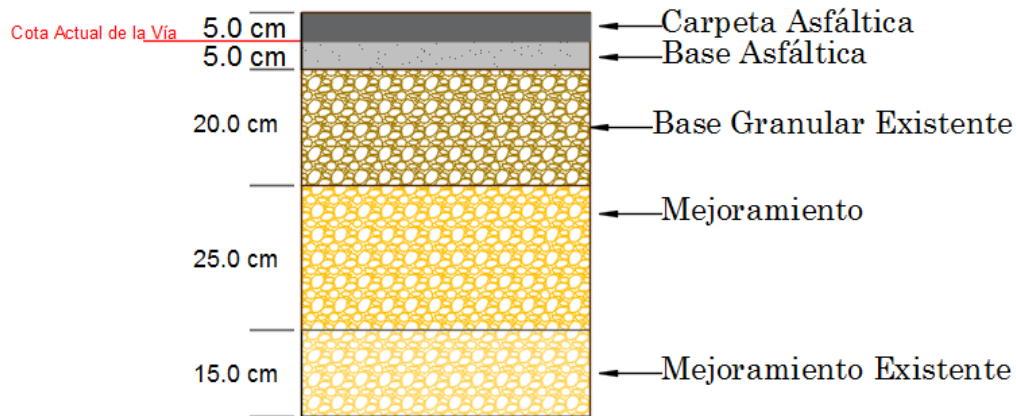
CAPA	CBR	COEFICIENTE ESTRUCTURAL	COEFICIENTE DE DRENAJE	ESPESOR
	(%)	(a_i)	(m_i)	(cm)
Carpeta Asfáltica		0.42		5
Base Asfáltica		0.28		5
Base Granular	80	0.13	1	20
Mejoramiento	20	0.09	1	25
Mejoramiento existente	16.6	0.085	1	15

Tabla 68: Datos para determinar el SN - Segunda etapa. Fuente: ASFALTAR EP.

$$\text{Número Estructural} \quad SN = 3.69$$

Un esquema de la composición y dimensiones del pavimento con la rehabilitación propuesta en el diseño se muestra a continuación en la Gráfica 13.

Alternativa de Rehabilitación Actual Segunda Etapa



Gráfica 13: Esquema de la estructura rehabilitada propuesta en el diseño del pavimento (Segunda etapa).

5.3.2. NÚMERO ESTRUCTURAL REAL – SEGUNDA ETAPA (ALTERNATIVA DE REHABILITACIÓN)

En la alternativa de rehabilitación se plantea la colocación de un doble tratamiento superficial bituminoso (DTSB) como capa de rodadura, para el cual se utilizaron los valores de coeficiente estructural recomendados por la guía AASHTO 93 para diseño de pavimentos, como indica la Tabla 65 mostrada anteriormente; mientras que para las capas de base granular y mejoramiento, se usaron los nomogramas.

Para determinar coeficiente estructural (a_i) de la base estabilizada con cemento se utiliza la Ecuación 39 mostrada a continuación proporcionada por la ficha técnica de Holcim Base Vial, misma que se basa en el diseño estructural de pavimentos con el método AASHTO 1993. Esta ecuación está en función de la resistencia a compresión:

$$a = (750 + 386r + 8.83r^2) * 10^{-4}$$

Ecuación 39

r = Resistencia a la compresión simple en MPa

El coeficiente de drenaje se escoge el mismo que el de la base granular, debido a que tiene características similares a ésta, es decir 0.8. En la Tabla 69 se resumen los coeficientes y espesores de cada una de las capas.

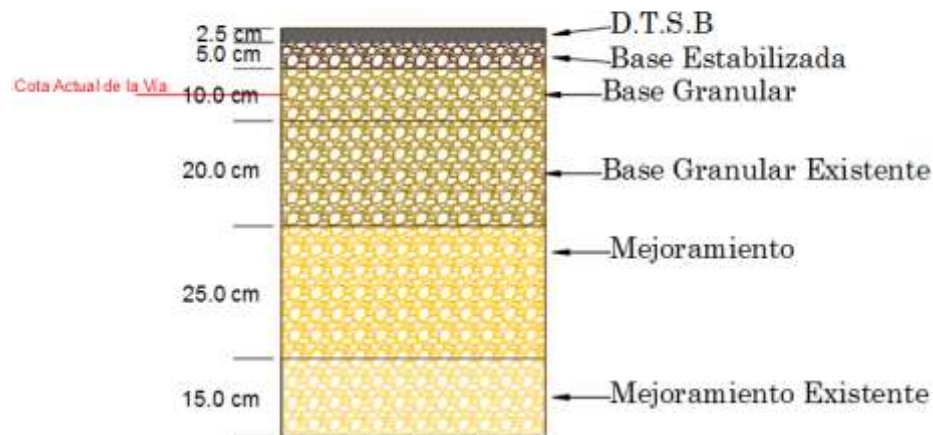
CAPA	CBR	COEFICIENTE ESTRUCTURAL	COEFICIENTE DE DRENAJE	ESPESOR
	(%)	(ai)	(mi)	(cm)
DTSB		0.25		2.5
Base Estabilizada con Cemento	145	0.186	1	5
Base Granular	80	0.13	1	10
Base Granular Existente	80	0.13	1	20
Mejoramiento	20	0.09	1	40
Mejoramiento existente	16.6	0.085	0.8	15

Tabla 69: Datos para determinar el SN - Alternativa de rehabilitación (reciclado).

Número Estructural $SN = 3.44$

Un esquema de la composición y dimensiones del pavimento con esta alternativa de rehabilitación se muestra a continuación en el Gráfica 14.

Alternativa de Rehabilitación (Reciclado) Segunda Etapa



Gráfica 14: Esquema de la estructura rehabilitada reciclando la capa de rodadura.

En resumen, se tiene:

	PRIMERA ETAPA	SEGUNDA ETAPA	
		REHABILITACION ACTUAL	REHABILITACION PROPUESTA
SN Requerido	2.94	3.33	3.33
SN Colocado	3.15	3.69	3.44

Tabla 70: Resumen de Números Estructurales.

En la Tabla 70 se muestra un resumen de los Números Estructurales obtenidos tanto para la rehabilitación actual como para la rehabilitación propuesta, los mismo



que cumplen con el SN requerido para el periodo de diseño.

5.4. PRESUPUESTO DE CADA ALTERNATIVA DE REHABILITACIÓN

Los rubros analizados a continuación son los que difieren entre la alternativa de rehabilitación actual y la alternativa de rehabilitación propuesta con reciclado, puesto que se requiere encontrar las diferencias económicas y estudiar el costo – beneficio entre ellas.

Para los procesos requeridos y los cálculos en la construcción del proyecto se siguen todas las normativas de las Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F 2002.

5.4.1. *PRESUPUESTO REHABILITACIÓN ACTUAL*

Luego de haber finalizado la primera etapa del periodo de diseño, se realiza un recapeo con hormigón asfáltico con la finalidad de reponer el desgaste sufrido en la capa de rodadura inicial. Previo al tendido de la nueva capa se deben corregir todas las deformaciones, hundimientos o baches (bacheo menor y bacheo mayor) que se hayan producido en la etapa inicial de vida del proyecto; posteriormente, se colocará una capa de liga con asfalto RC-250 y finalmente se procederá al tendido del hormigón asfáltico como la nueva capa de rodadura.

Los rubros que intervienen en esta rehabilitación se detallan a continuación y posteriormente en la Tabla 71 se indica el cálculo del presupuesto. El análisis de precios unitarios se encuentra en la sección de ANEXO III-a: Presupuesto Rehabilitación Actual.

1. Bacheo asfáltico
2. Asfalto RC-250 para capa de liga
3. Capa de rodadura de hormigón asfáltico mezclado en planta
4. Transporte de mezcla asfáltica

**PRESUPUESTO REHABILITACIÓN ACTUAL**

VÍA	CÓDIGO	RUBRO	UNIDAD	P. UNITARIO (\$)	CANTIDAD	P. TOTAL (\$)
REHABILITACIÓN DE LA VÍA GUANGARCUCHO - JADÁN, HORMIGÓN ASFÁLTICO L=11.1 Km.	50008	Asfalto RC-250 para capa de liga, suministro y tendido	lt	0.97	86.853.92	84248.30
	50009	Bacheo asfáltico (hasta 20m2), incluye mezcla asfáltica	m3	238.31	166.50	39678.62
	50010	Capa de rodadura de hormigón asfáltico mezclado en planta, e = 2 pulgadas, suministro tendido y compactado, sin transporte.	m2	9.01	66.600.00	600066.00
	50011	Transporte de mezcla asfáltica, (medido después de compactación).	m3-km	0.30	18.315.00	5494.50
	50012	Desalojo de material, distancia menor a 6 Km	m3-km	4.29	266.40	1142.86
	50013	Sobrecarreo de materiales sin clasificar	m3-km	0.35	4.528.80	1585.08
TOTAL GENERAL						732215.35

*Tabla 71: Presupuesto Rehabilitación Actual.***5.4.2. PRESUPUESTO ALTERNATIVA DE REHABILITACIÓN (RECICLADO)**

Esta rehabilitación constará de la estabilización de la capa de rodadura existente y que ha llegado al final de su vida útil; este proceso cuenta primero con la escarificación del hormigón asfáltico y luego con la estabilización con cemento conformando la nueva base estabilizada, para ello se utilizará el equipo caminero adecuado y con la que cuenta la empresa Asfaltar-EP. Posteriormente, se realiza el tendido de asfalto para imprimación RC-250 y finalmente la colocación de un doble tratamiento superficial bituminoso (TSB – 2B), que será la nueva capa de rodadura hasta finalizar el periodo de diseño.

Los rubros que intervienen en esta rehabilitación se detallan a continuación y posteriormente en la Tabla 72 se indica el cálculo del presupuesto. El análisis de precios unitarios se encuentra en la sección de ANEXO III-b: Presupuesto Alternativa de Rehabilitación (Reciclado).

1. Estabilización de carpeta asfáltica
2. Asfalto RC-250 para imprimación
3. Base granular clase 1 tipo “B”
4. Doble tratamiento superficial bituminoso
5. Transporte de áridos para tratamiento superficial bituminoso

**PRESUPUESTO ALTERNATIVA DE REHABILITACIÓN (RECICLADO)**

VÍA	CÓDIGO	RUBRO	UNIDAD	P. UNITARIO (\$)	CANTIDAD	P. TOTAL (\$)
REHABILITACIÓN DE LA VÍA GUANGARCUCHO - JADÁN, HORMIGÓN ASFÁLTICO L=11.1 Km.	50001	Asfalto para imprimación RC-250, suministro y tendido	lt	0.92	86.853.92	79905.61
	50002	Doble Tratamiento Superficial Bituminoso "TSB-2B", (sin transporte de áridos)	m2	3.51	66.600.00	233766.00
	50003	Reconformación y compactación con equipo pesado, incluye escarificado	m2	1.52	66.600.00	101232.00
	50004	Cemento Base Vial	m3	7.08	7.146.18	50594.95
	50005	Base clase 1 tipo "B" d<1 1/2in, conformación y compactación, No incluye el transporte.	m3	29.57	6.660.00	196936.20
	50006	Transporte de materiales (mejoramiento, base granular, sub base granular) (medido desp. compactación) (12m3/viaje).	m3-km	0.29	36.630.00	10622.70
	50007	Transporte de áridos para Tratamientos Superficiales Bituminosos (material suelto)	m3-km	0.26	9.157.50	2380.95
TOTAL GENERAL						675438.41

Tabla 72: Presupuesto Alternativa de Rehabilitación (Reciclado).

Con lo que se puede concluir que:

	REHABILITACION ACTUAL	REHABILITACION PROPUESTA
Presupuesto total (\$)	732215.35	675438.41

Tabla 73: Comparación de presupuestos entre rehabilitaciones.

Como se indica en la Tabla 73, el presupuesto de la rehabilitación propuesta con el reciclado de la carpeta asfáltica es menor al de la rehabilitación actual ejecutada por la empresa pública ASFALTAR EP, dándose un ahorro de \$ 56,776.94.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El proyecto de titulación analiza el reciclado de la carpeta asfáltica de pavimentos antiguos como método de rehabilitación con el fin de tener un ahorro económico respecto a la rehabilitación convencional y que puede ser implementado por la empresa pública ASFALTAR EP.

Para tal fin, se realizó una investigación sobre las diferentes alternativas tradicionales de reciclado de pavimentos que existen y se escogió la más adecuada para su desarrollo e implementación en la vía de estudio, correspondiente a la carretera Guangarcucho – Jadán, a cargo de la Prefectura del Azuay.

Con los ensayos de granulometría, límites de Atterberg, abrasión, Proctor modificado y CBR, realizados en laboratorio, se determinó que el material reciclado de la carpeta asfáltica cumple con los requerimientos para ser utilizado como una base estabilizada con cemento según especificaciones del MOP-001-F 2002 y NEVI-12. Además, mediante la clasificación de suelos por la AASHTO se determina que este material puede ser considerado como un suelo tipo A-1-a.

De igual forma, se realizaron las mezclas con los agentes estabilizadores, cemento Holcim Base Vial y emulsión asfáltica; las cuales fueron ensayadas para determinar la más óptima. Para las mezclas con cemento Holcim Base Vial, se realizó el ensayo de compresión simple y CBR mediante los cuales se estableció que el porcentaje óptimo de cemento Base Vial es de 5%, ya que cumple con las especificaciones de la norma MOP-001-F 2002; alcanzando la resistencia exigida de 25 kg/cm² a los 28 días. Para la estabilización in situ se realizará la mezcla con motoniveladora para luego ser hidratada, conformada y compactada de acuerdo a los ensayos Proctor modificado y a las cotas del proyecto.

Y, en cuanto a la mezcla con emulsión asfáltica se realizó el ensayo Marshall y ensayo RICE alcanzando un porcentaje de vacíos entre 12 y 15%, valores que son mayores al máximo permitido de 8% que consta en las especificaciones del MOP-001-F 2002; por lo que no fue considerada para el diseño del paquete estructural. A más de ello, las estabilidades de las mezclas alcanzan valores entre 7000 y 8000



lbf, siendo muy altas para utilizarlas en un pavimento, ya que provocaría que éste se vuelva muy rígido, se fisure a temprana edad y no sea duradero.

Posteriormente, se diseñó el paquete estructural para la rehabilitación planteada, la cual se comparó con la rehabilitación actual que desarrolla la empresa ASFALTAR EP. La carpeta asfáltica reciclada brinda un aporte de 0.37 al número estructural de todo el pavimento mediante su estabilización con cemento, valor que ayuda a cumplir con la resistencia estructural requerida para la segunda etapa del periodo de diseño, es decir, lo necesario para soportar las cargas impuestas por los vehículos para los 10 años posteriores a la rehabilitación.

Finalmente, se realiza una comparación desde el punto de vista económico entre la rehabilitación planteada en este trabajo de titulación y la rehabilitación actual realizada por la empresa ASFALTAR EP. A partir de este análisis se concluye que el uso de la rehabilitación planteada genera un ahorro significativo en el presupuesto de \$ 56,776.94 en comparación al que se tiene con la rehabilitación tradicional, esto debido a que la nueva capa de rodadura no necesita ser de gran aporte estructural como la carpeta asfáltica, sino una menor con un doble tratamiento superficial bituminoso, brindando un beneficio económico.

RECOMENDACIONES

Para conocer más a detalle y con mayor exactitud el estado actual de los materiales que conforman el pavimento actual se recomienda extraer muestras de las capas, para ello, se deben realizar calicatas en diferentes puntos de la vía, analizarlas en laboratorio, y obtener las características y espesores de cada estrato.

Asimismo, se recomienda realizar un análisis de costos de mantenimiento rutinario para obtener un precio global de cada una de las alternativas, teniendo un enfoque claro de cuál de ellas genera mayores beneficios y puede ser aplicada en la provincia del Azuay.

Para futuras líneas de estudio, en base a las mezclas con emulsión asfáltica, se puede agregar filler o aditivos para disminuir el porcentaje de vacíos que están sobre



el máximo; de esta manera estudiar su comportamiento y las ventajas que puede aportar a una rehabilitación.

Otra alternativa de estudio acerca de reciclado de pavimentos es el fresado de la capa de rodadura conjuntamente con un determinado espesor de la capa base, para posteriormente estabilizar. Teniendo así mejores características en la mezcla por el aporte que puedan brindar los agregados que conforman la base.



REFERENCIAS

- AASHTO. (1993). *Guía AASHTO para el Diseño de Estructuras de Pavimentos*. Washington, D.C.
- Banco de Desarrollo de América Latina. (2020). *Análisis de Inversiones en el Sector Transporte Terrestre Interurbano Latinoamericano a 2040*. CAF.
- Bowles, J. E. (1981). *Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil*. México: McGraw-Hill.
- Campagnoli, S. (2017). Innovación en Métodos de Pavimentación: Casos Regionales . *Revista de Ingeniería*, pp. 22-31.
- Cevallos Garzón, J. S. (2015). *Rectificación y Mejoramiento de la vía Punta de Ahuano*. Quito.
- Chicaiza Sambonino, M. (2013). *Rehabilitación Vial con Reciclado y Emulsión Asfáltica con Aplicación en las Vías de la Ciudad de Quito. (Av. Simón Bolívar)*. Quito.
- Constitución de la República del Ecuador. (2010). *Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización*. Quito.
- Das, B. M. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Cengage Learning.
- Dávila, E. (22 de mayo de 2017). La Construcción de Carreteras tuvo mayor empuje hasta el 2012. *El Comercio*.
- Garber, N. J., & Hoel, L. A. (2002). *Ingeniería de Tránsito y Carreteras*. THOMSON.
- Garnica Anguas, P., Delgado Alamilla, H., Gómez López, J. A., Alonso Romero, S., & Alarcón Orta, H. A. (2004). *Aspectos del Diseño Volumétrico de Mezclas Asfálticas*. Querétaro.
- Holcim Ecuador S.A. (2018). *Soluciones en cemento. Holcim Base Vial*.
- INEN: Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). *Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso*. Quito.
- Jaramillo, A. (2015). Reducir costos y daño ambiental, Objetivos del Asfalto Sustentable. *Obras*.
- Jugo B., A. (2005). *Manual de Mantenimiento y Rehabilitación de Pavimentos Flexibles*. Caracas.
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones. (2002). *MOP - 001 - F 2002: Especificaciones Generales para la Construcción de caminos y puentes*. Quito.
- Montejo Fonseca, A. (1997). *Ingeniería de Pavimentos*. Bogotá.
- NEVI - 12 - MTOP. (2013). *Norma para Estudios y Diseños Viales. Volumen N°2 - Libro A*. Quito.



NTE INEN 860. (2011). *Áridos. Determinación del Valor de la Degradación del Árido Grueso de Partículas Menores a 37.5 mm mediante el uso de la Máquina de los Ángeles*. Quito.

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA). (2014). *Reciclaje en Pavimentos*. San José.

Tafur Garro, N. M. (2005). *Criterios de Evaluación para Reciclado de Mezclas Asfálticas. Aplicación a la carretera San Mateo - La Oroya Tramo III*. Lima.

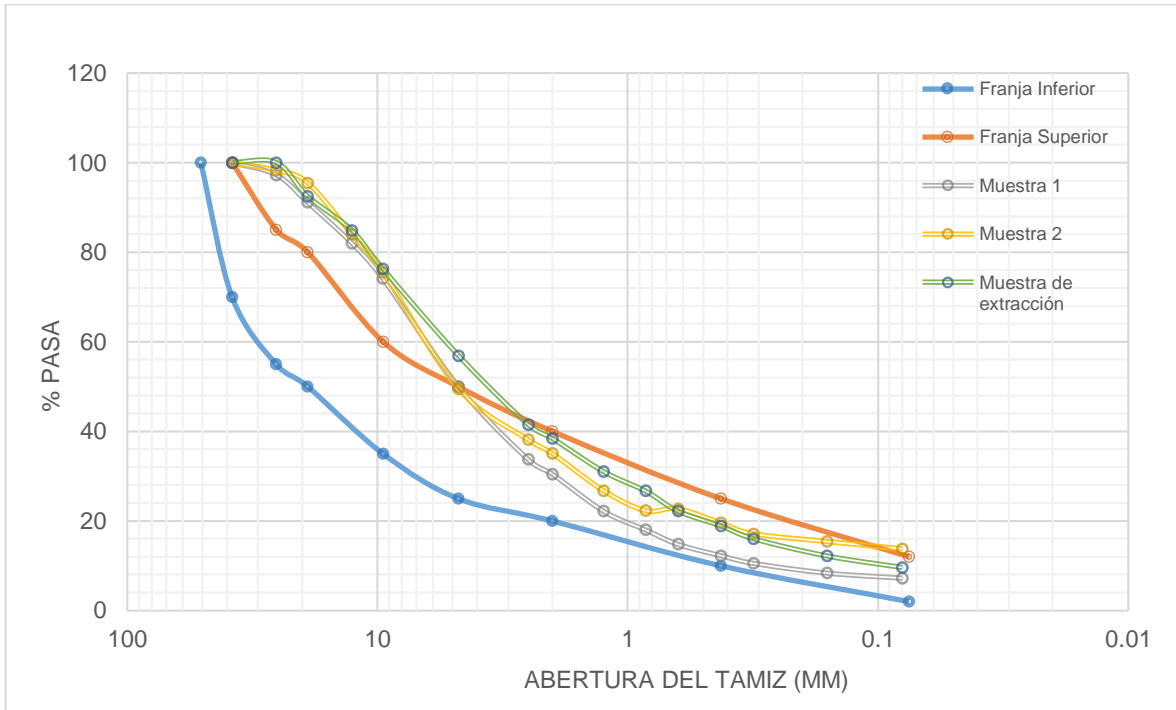
Terán Molina, L. A. (2015). *Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente utilizando Agregados de la mina Cashapamba con Metodología Marshall*. Quito.

Wirtgen Group. (2004). *Wirtgen: Manual de Reciclado en Frío*.

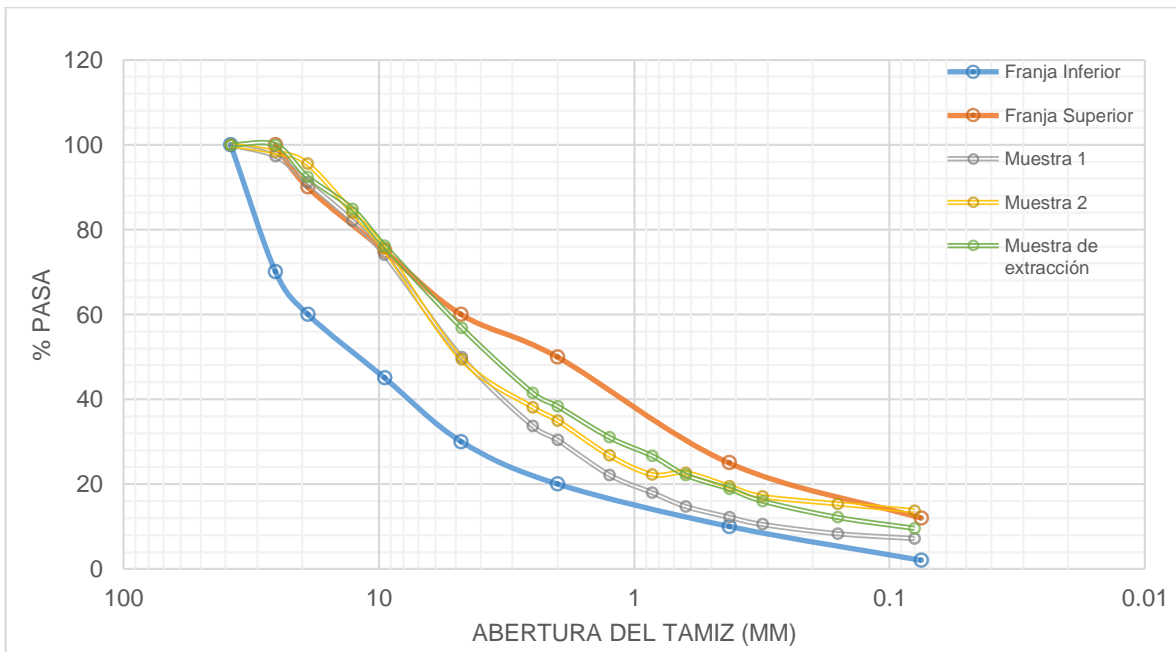


ANEXOS

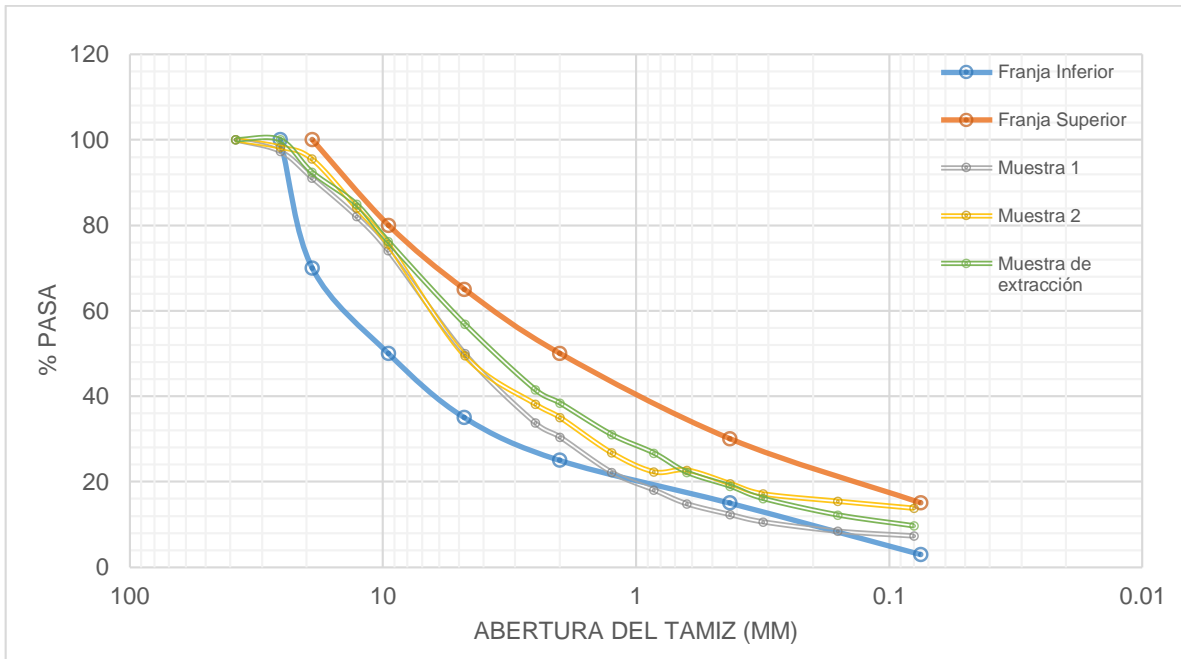
ANEXO I-a: Curvas Granulométricas.



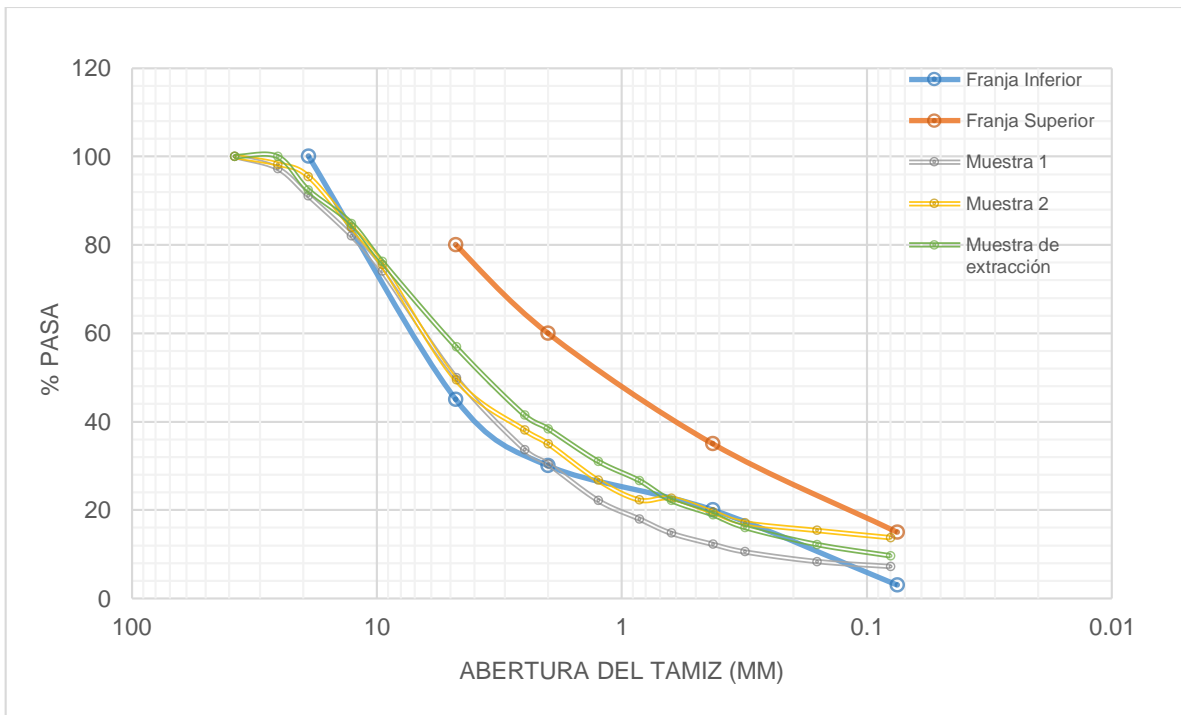
Anexo 1: Gradación - Base Clase 1-A.



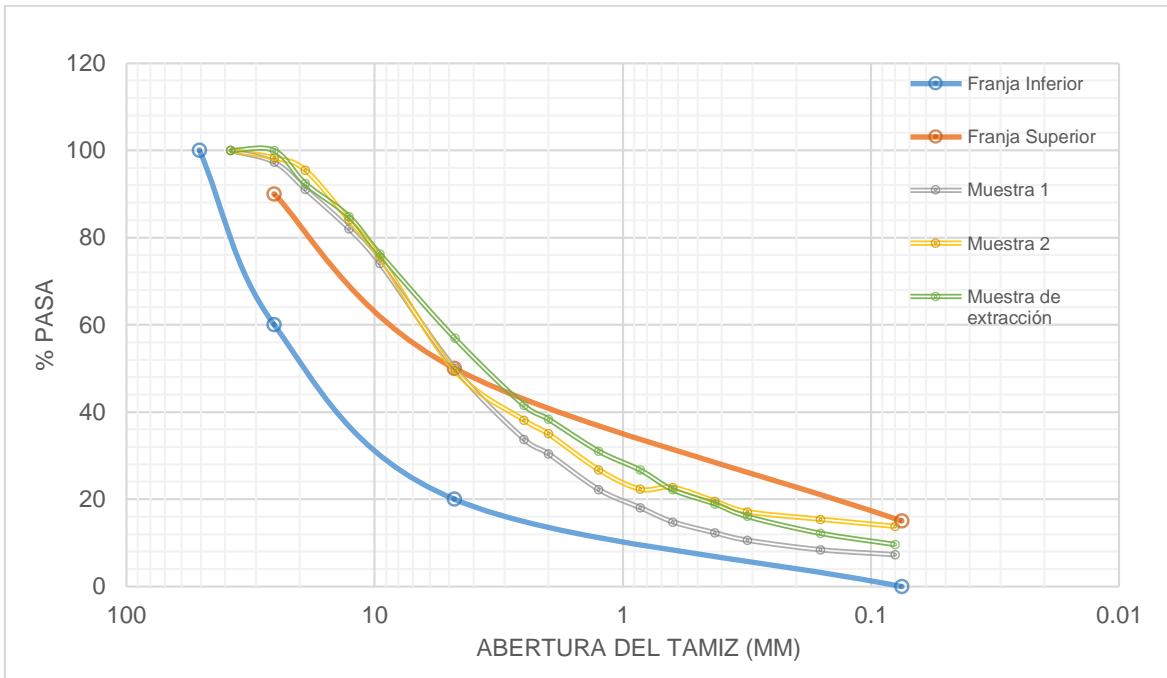
Anexo 2: Gradación - Base Clase 1-B.



Anexo 3: Gradación – Base Clase 2.

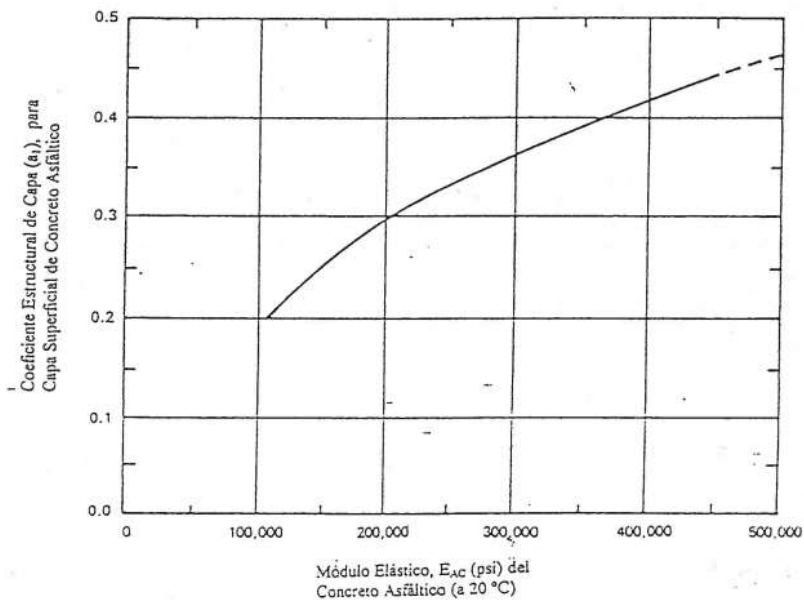


Anexo 4: Gradación - Base Clase 3.

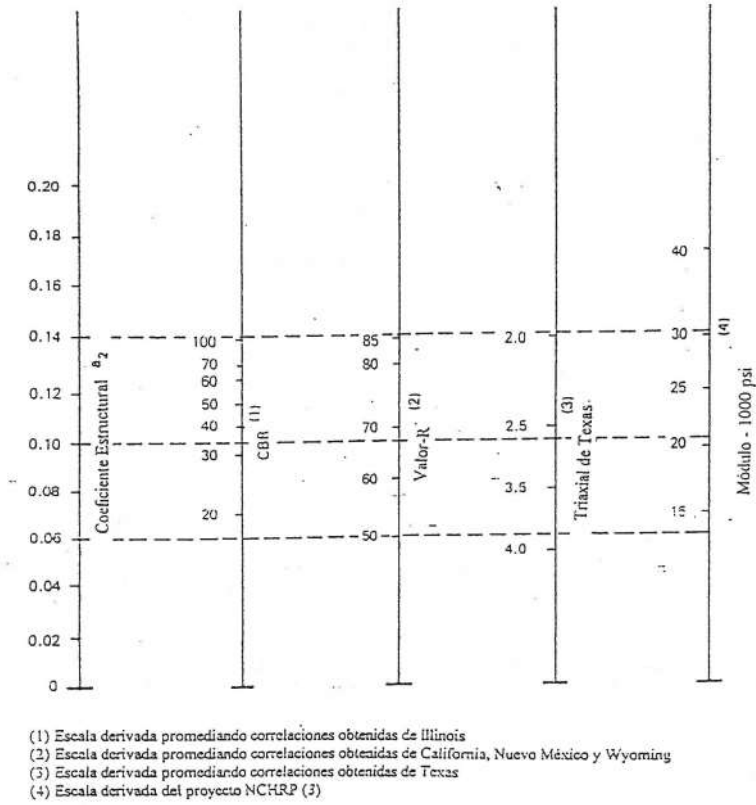


Anexo 5: Gradación - Base Clase 4.

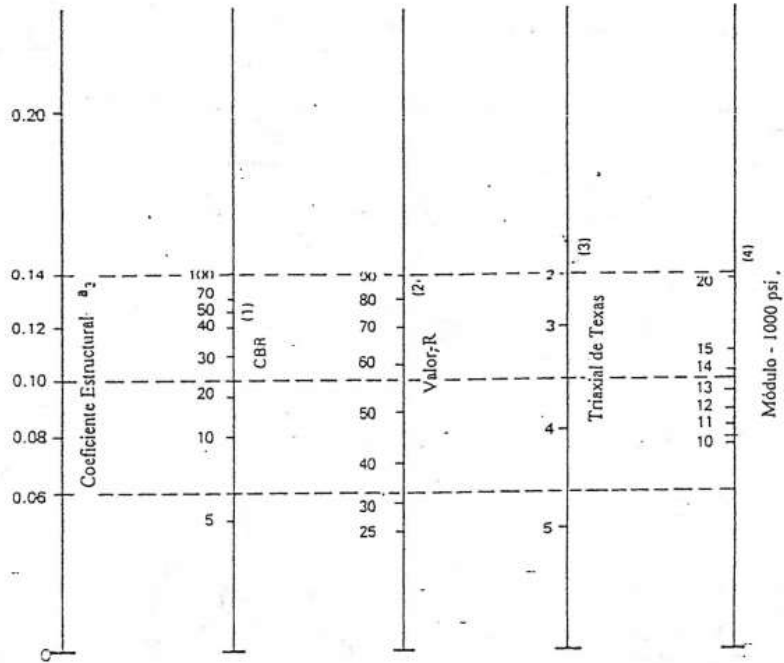
ANEXO II-a: Nomogramas.



Anexo 6: Carta para la estimación del coeficiente estructural de capa de concreto asfáltico de gradación densa basado en el Módulo Elástico. Fuente: (AASHTO, 1993)



Anexo 7: Variación en el coeficiente estructural de capa de base (a_2) con diferentes parámetros de resistencia. Fuente: (AASHTO, 1993)




- (1) Escala derivada de las correlaciones obtenidas de Illinois
- (2) Escala derivada de las correlaciones obtenidas del Instituto del Asfalto, California, Nuevo México y Wyoming
- (3) Escala derivada de las correlaciones obtenidas de Texas
- (4) Escala derivada del proyecto NCHRP (3)


Anexo 8: Variaciones en el coeficiente de capa de subbase granular (a_3) con diferentes parámetros de subbase. Fuente: (AASHTO, 1993)



ANEXO III-a: Presupuesto Rehabilitación Actual.

Análisis de Precios Unitarios							
Código: 50008							
Descrip.: Asfalto RC-250 para capa de liga, suministro y tendido							
Unidad: lt							
COSTOS DIRECTOS							
Equipo y herramienta							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendim.	Total	%
101006	Distribuidor de asfaltos, capacidad=6000lt	Hora	1.000	70.00	0.00400	0.28	33.73%
101007	Escoba mecánica 35hp	Hora	1.000	25.00	0.00400	0.10	12.05%
Subtotal de Equipo:						0.38	45.78%
Materiales							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio		Total	%
204001	Asfalto RC-250	lt	1.000	0.40		0.40	48.19%
Subtotal de Materiales:						0.40	48.19%
Transporte							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa/U	Distancia	Total	%
Subtotal de Transporte:						0.00	0.00%
Mano de Obra							
Código	Descripción	Número	S.R.H.	Rendim.	Total	%	
402004	Peón	1.00	3.60	0.00400	0.01	1.20%	
410013	Operador de escoba mecánica	1.00	3.85	0.00400	0.02	2.41%	
410009	Operador de distribuidor de asfaltos	1.00	3.85	0.00400	0.02	2.41%	
Subtotal de Mano de Obra:						0.05	6.02%
Costo Directo Total:						0.83	
Costos Indirectos 17%						0.14	
Precio Unitario Total						0.97	
Son: 97/100 DÓLARES							




Análisis de Precios Unitarios							
Código: 50009							
Descrip.: Bacheo asfáltico (hasta 20m2), incluye mezcla asfáltica							
Unidad: m3							
COSTOS DIRECTOS							
Equipo y herramienta							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendim.	Total	%
102015	Compactador mecanico 5hp	Hora	1.000	3.12	0.86672	2.70	1.33%
101008	Volquete de 6m3, 210hp	Hora	1.000	20.00	0.86672	17.33	8.51%
101038	Minicargadora con aditamento (fresadora)	Hora	1.000	35.00	0.86672	30.34	14.90%
106001	Herramienta manual y menor de construcción	%MO	5%MO			1.33	0.65%
Subtotal de Equipo:						51.70	25.38%
Materiales							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio		Total	%
503044	Mezcla Asfáltica en Planta (D<3/4-3/8"), Asfaltar-EP.	m3	1.350	89.26		120.50	59.16%
204001	Asfalto RC-250	lt	12.000	0.40		4.80	2.36%
Subtotal de Materiales:						125.30	61.52%
Transporte							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa/U	Distancia	Total	%
Subtotal de Transporte:						0.00	0.00%
Mano de Obra							
Código	Descripción	Número	S.R.H.	Rendim.	Total	%	
402004	Peón	5.00	3.60	0.86672	15.60	7.66%	
410005	Operador de miniexcavadora/minicargadora	1.00	3.85	0.86672	3.34	1.64%	
432001	Chofer tipo E	1.00	5.29	0.86672	4.58	2.25%	
403009	Operador de equipo liviano	1.00	3.65	0.86672	3.16	1.55%	
Subtotal de Mano de Obra:						26.68	13.10%
Costo Directo Total:						203.68	
Costos Indirectos 17%						34.63	
Precio Unitario Total						238.31	
Son: DOSCIENTOS TREINTA Y OCHO CON 31/100 DÓLARES							




Análisis de Precios Unitarios							
Código:	50010						
Descrip.:	Capa de rodadura de hormigón asfáltico mezclado en planta, e = 2 pulgadas, suministro tendido y compactado, sin transporte.						
Unidad:	m2						
COSTOS DIRECTOS							
Equipo y herramienta							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendim.	Total	%
101010	Terminador de asfaltos 400ton	Hora	1.000	175.00	0.00435	0.76	9.87%
101011	Rodillo neumatico 8ton, 9 neumaticos	Hora	1.000	35.00	0.00435	0.15	1.95%
106001	Herramienta manual y menor de construcción	%MO	5%MO			0.01	0.13%
100028	Rodillo doble tandem 8ton.(Asfaltar)	Hora	1.000	45.00	0.00435	0.20	2.60%
101026	Minicargadora 75hp	Hora	1.000	25.00	0.00435	0.11	1.43%
Subtotal de Equipo:						1.23	15.97%
Materiales							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio		Total	%
503044	Mezcla Asfáltica en Planta (D<3/4-3/8"), Asfaltar-EP.	m3	0.06995	89.26		6.24	81.04%
Subtotal de Materiales:						6.24	81.04%
Transporte							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa/U	Distancia	Total	%
Subtotal de Transporte:						0.00	0.00%
Mano de Obra							
Código	Descripción	Número	S.R.H.	Rendim.		Total	%
402004	Peón	10.00	3.60	0.00435		0.16	2.08%
410001	Operador de rodillo compactador	2.00	3.85	0.00435		0.03	0.39%
410007	Operador de terminadora de asfalto	1.00	3.85	0.00435		0.02	0.26%
410011	Operador de minicargadora	1.00	3.85	0.00435		0.02	0.26%
Subtotal de Mano de Obra:						0.23	2.99%
Costo Directo Total:						7.70	
Costos Indirectos 17%						1.31	
Precio Unitario Total						9.01	
Son:	NUEVE CON 01/100 DÓLARES						






Análisis de Precios Unitarios							
Código: 500011							
Descrip.: Transporte de mezcla asfáltica, (medido desp. de compactación).							
Unidad: m3-km							
COSTOS DIRECTOS							
Equipo y herramienta							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendim.	Total	%
101005	Volquete de 8m3, 270hp	Hora	1.000	23.00	0.00917	0.21	80.77%
Subtotal de Equipo:						0.21	80.77%
Materiales							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio		Total	%
Subtotal de Materiales:						0.00	0.00%
Transporte							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa/U	Distancia	Total	%
Subtotal de Transporte:						0.00	0.00%
Mano de Obra							
Código	Descripción	Número	S.R.H.	Rendim.	Total	%	
432001	Chofer tipo E	1.00	5.29	0.00917	0.05	19.23%	
Subtotal de Mano de Obra:						0.05	19.23%
Costo Directo Total:						0.26	
Costos Indirectos 17%:						0.04	
Precio Unitario Total						0.30	
Son: 30/100 DÓLARES							



Análisis de Precios Unitarios							
Código: 500012							
Descrip.: Desalojo de Material (distancia menor a 6 km)							
Unidad: m3							
COSTOS DIRECTOS							
Equipo y herramienta							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendim.	Total	%
101001	Herramienta menor	%MO	5%MO			0.05	1.36%
101002	Retroexcavadora	Hora	1.00	12.00	0.12000	1.44	39.24%
101003	Volquete de 8m3, 270hp	Hora	1.00	12.00	0.12000	1.44	39.24%
Subtotal de Equipo:						2.93	79.84%
Materiales							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio		Total	%
Subtotal de Materiales:						0.00	0.00%
Transporte							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa/U	Distancia	Total	%
Subtotal de Transporte:						0.00	0.00%
Mano de Obra							
Código	Descripción	Número	S.R.H.	Rendim.		Total	%
432001	Peón	1.00	3.00	0.0200		0.06	1.63%
432002	Maestro Mayor	1.00	0.50	0.0200		0.01	0.27%
432003	Operador de Retroexcavadora	1.00	2.42	0.1200		0.29	7.90%
432004	Chofer tipo E	1.00	3.17	0.1200		0.38	10.35%
Subtotal de Mano de Obra:						0.74	20.16%
Costo Directo Total:						3.67	
Costos Indirectos 17%						0.32	
Precio Unitario Total						4.29	
Son: CUATRO CON 29/100 DÓLARES							




Análisis de Precios Unitarios							
Código: 500013							
Descrip.: Sobreacarreo de Materiales							
Unidad: m3-km							
COSTOS DIRECTOS							
Equipo y herramienta							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendim.	Total	%
101005	Volquete de 8m3, 270hp	Hora	1.000	20.00	0.01210	0.24	80.00%
Subtotal de Equipo:						0.24	80.00%
Materiales							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio		Total	%
Subtotal de Materiales:						0.00	0.00%
Transporte							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa/U	Distancia	Total	%
Subtotal de Transporte:						0.00	0.00%
Mano de Obra							
Código	Descripción	Número	S.R.H.	Rendim.	Total	%	
432001	Chofer tipo E	1.00	5.29	0.01210	0.06	20.00%	
Subtotal de Mano de Obra:						0.06	20.00%
Costo Directo Total:						0.30	
Costos Indirectos 17%						0.05	
Precio Unitario Total						0.35	
Son: 35/100 DÓLARES							




ANEXO III-b: Presupuesto Alternativa de Rehabilitación (Reciclado).

Análisis de Precios Unitarios							
Código:	50001						
Descrip.:	Asfalto para imprimación RC-250, suministro y tendido						
Unidad:	lt						
COSTOS DIRECTOS							
Equipo y herramienta							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendim.	Total	%
101006	Distribuidor de asfaltos, capacidad=6000lt	Hora	1.000	70.00	0.00093	0.07	8.86%
101007	Escoba mecanica 35hp	Hora	1.000	25.00	0.00093	0.02	2.53%
101008	Volquete de 6m3, 210hp	Hora	1.000	20.00	0.00093	0.02	2.53%
Subtotal de Equipo:						0.11	13.92%
Materiales							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio		Total	%
204001	Asfalto RC-250	lt	0.80000	0.40		0.32	40.51%
203001	Diesel	lt	0.40000	0.59		0.24	30.38%
226046	Arena de trituración	m3	0.00800	13.87		0.11	13.92%
Subtotal de Materiales:						0.67	84.81%
Transporte							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa/U	Distancia	Total	%
Subtotal de Transporte:						0.00	0.00%
Mano de Obra							
Código	Descripción	Número	S.R.H.	Rendim.	Total	%	
432001	Chofer tipo E	1.00	5.29	0.00093	0.00	0.00%	
402004	Peón	4.00	3.60	0.00093	0.01	1.27%	
410013	Operador de escoba mecánica	1.00	3.85	0.00093	0.00	0.00%	
410009	Operador de distribuidor de asfaltos	1.00	3.85	0.00093	0.00	0.00%	
Subtotal de Mano de Obra:						0.01	1.27%
Costo Directo Total:						0.79	
Costos Indirectos 17%						0.13	
Precio Unitario Total						0.92	
Son:	92/100 DÓLARES						




Análisis de Precios Unitarios							
Código:	50002						
Descrip.:	Doble Tratamiento Superficial Bituminoso "TSB-2B", (sin transporte de áridos)						
Unidad:	m2						
							
COSTOS DIRECTOS							
Equipo y herramienta							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendim.	Total	%
101006	Distribuidor de asfaltos, capacidad=6000lt	Hora	1.00000	70.00	0.00392	0.27	9.00%
101022	Distribuidor de agregados 3.50m3.	Hora	1.00000	80.00	0.00392	0.31	10.33%
101011	Rodillo neumatico 8ton, 9 neumáticos	Hora	1.00000	35.00	0.00392	0.14	4.67%
101007	Escoba mecánica 35hp	Hora	1.00000	25.00	0.00392	0.10	3.33%
101005	Volquete de 8m3, 270hp	Hora	2.00000	23.00	0.00392	0.18	6.00%
100028	Rodillo doble tandem 8ton.(Asfaltar)	Hora	1.00000	45.00	0.00392	0.18	6.00%
Subtotal de Equipo:						1.18	39.33%
Materiales							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio		Total	%
204001	Asfalto RC-250	lt	2.60000	0.40		1.04	34.67%
201027	Agregado d= 3/4in	m3	0.01600	19.00		0.30	10.00%
201029	Agregado d= 3/8in	m3	0.01400	19.00		0.27	9.00%
Subtotal de Materiales:						1.61	53.67%
Transporte							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa/U	Distancia	Total	%
Subtotal de Transporte:						0.00	0.00%
Mano de Obra							
Código	Descripción	Número	S.R.H.	Rendim.	Total	%	
410001	Operador de rodillo compactador	2.00	3.85	0.00392	0.03	1.00%	
410002	Operador de distribuidor de agregados	1.00	3.85	0.00392	0.02	0.67%	
410013	Operador de escoba mecánica	1.00	3.85	0.00392	0.02	0.67%	
432001	Chofer tipo E	2.00	5.29	0.00392	0.04	1.33%	
402004	Peón	7.00	3.60	0.00392	0.10	3.33%	
Subtotal de Mano de Obra:						0.21	7.00%
Costo Directo Total:						3.00	
Costos Indirectos 17%						0.51	
Precio Unitario Total						3.51	
Son:	TRES CON 51/100 DÓLARES						



Análisis de Precios Unitarios							
Código: 50003							
Descrip.: Reconformación y compactación con equipo pesado, incluye escarificado							
Unidad: m2							
COSTOS DIRECTOS							
Equipo y herramienta							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendim.	Total	%
101001	Motoniveladora 150hp	Hora	1.000	40.00	0.00730	0.29	22.31%
101002	Rodillo liso vibratorio 10ton	Hora	1.000	30.00	0.00730	0.22	16.92%
101003	Carro cisterna 200 gal	Hora	1.000	30.00	0.00730	0.22	16.92%
101005	Volquete de 8m3, 270hp	Hora	1.000	23.00	0.00730	0.17	13.08%
101026	Minicargadora 75hp	Hora	1.000	25.00	0.00730	0.18	13.85%
Subtotal de Equipo:						1.08	83.08%
Materiales							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio		Total	%
Subtotal de Materiales:						0.00	0.00%
Transporte							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa/U	Distancia	Total	%
Subtotal de Transporte:						0.00	0.00%
Mano de Obra							
Código	Descripción	Número	S.R.H.	Rendim.	Total	%	
410001	Operador de rodillo compactador	1.00	3.85	0.00730	0.03	2.31%	
402004	Peón	2.00	3.60	0.00730	0.05	3.85%	
410005	Operador de miniexcavadora/minicargadora	1.00	3.85	0.00730	0.03	2.31%	
409001	Operador de motoniveladora	1.00	4.04	0.00730	0.03	2.31%	
432001	Chofer tipo E	2.00	5.29	0.00730	0.08	6.15%	
Subtotal de Mano de Obra:						0.22	16.92%
Costo Directo Total:						1.30	
Costos Indirectos 17%						0.22	
Precio Unitario Total						1.52	
Son: UNO CON 52/100 DÓLARES							




Análisis de Precios Unitarios								
Código: 50004								
Descrip.: Cemento Base Vial Holcim								
Unidad: Sacos								
COSTOS DIRECTOS								
Equipo y herramienta								
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendim.	Total	%	
						Subtotal de Equipo:	0.00	0.00%
Materiales								
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio		Total	%	
101001	Cemento Holcim Base Vial (50 kg)	Saco	1.00000	6.05		6.05	100.00%	
						Subtotal de Materiales:	6.05	100.00%
Transporte								
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa/U	Distancia	Total	%	
						Subtotal de Transporte:	0.00	0.00%
Mano de Obra								
Código	Descripción	Número	S.R.H.	Rendim.	Total	%		
						Subtotal de Mano de Obra:	0.00	0.00%
						Costo Directo Total:	6.05	
						Costos Indirectos 17%	1.03	
Precio Unitario Total						7.08		
Son: SIETE CON 08/100 DÓLARES								



Análisis de Precios Unitarios							
Código:	50005						
Descrip.:	Base clase 1 tipo "B" d<1 1/2in, conformación y compactación, No incluye el transporte.						
Unidad:	m3						
COSTOS DIRECTOS							
Equipo y herramienta							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendim.	Total	%
101001	Motoniveladora 150hp	Hora	1.000	40.00	0.04762	1.90	7.52%
101002	Rodillo liso vibratorio 10ton	Hora	1.000	30.00	0.04762	1.43	5.66%
101003	Carro cisterna 200 gal	Hora	1.000	30.00	0.04762	1.43	5.66%
106001	Herramienta manual y menor de construcción	%MO	5%MO			0.05	0.20%
Subtotal de Equipo:						4.81	19.03%
Materiales							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio		Total	%
201009	Base clase 1B (pasante <1 1/2in)	m3	1.30000	15.00		19.50	77.17%
Subtotal de Materiales:						19.50	77.17%
Transporte							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa/U	Distancia	Total	%
Subtotal de Transporte:						0.00	0.00%
Mano de Obra							
Código	Descripción	Número	S.R.H.	Rendim.		Total	%
432001	Chofer tipo E	1.00	5.29	0.04762		0.25	0.99%
409001	Operador de motoniveladora	1.00	4.04	0.04762		0.19	0.75%
402004	Peón	2.00	3.60	0.04762		0.34	1.35%
410001	Operador de rodillo compactador	1.00	3.85	0.04762		0.18	0.71%
Subtotal de Mano de Obra:						0.96	3.80%
Costo Directo Total:						25.27	
Costos Indirectos 17%						4.30	
Precio Unitario Total						29.57	
Son:	VEINTE Y NUEVE CON 57/100 DÓLARES						





Análisis de Precios Unitarios							
Código:	50006						
Descrip.:	Transporte de materiales (mejoramiento, base granular, sub base granular) (medido desp. compactación) (12m3/viaje).						
Unidad:	m3-km						
							
COSTOS DIRECTOS							
Equipo y herramienta							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendim.	Total	%
101027	Volquete 12m3, 320hp	Hora	1.000	27.00	0.00777	0.21	84.00%
Subtotal de Equipo:						0.21	84.00%
Materiales							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio		Total	%
Subtotal de Materiales:						0.00	0.00%
Transporte							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa/U	Distancia	Total	%
Subtotal de Transporte:						0.00	0.00%
Mano de Obra							
Código	Descripción	Número	S.R.H.	Rendim.	Total	%	
432001	Chofer tipo E	1.00	5.29	0.00777	0.04	16.00%	
Subtotal de Mano de Obra:						0.04	16.00%
Costo Directo Total:						0.25	
Costos Indirectos 17%:						0.04	
Precio Unitario Total						0.29	
Son:	29/100 DÓLARES						



Análisis de Precios Unitarios							
Código:	50007						
Descrip.:	Transporte de áridos para Tratamientos Superficiales Bituminosos (material suelto)						
Unidad:	m3-km						
COSTOS DIRECTOS							
Equipo y herramienta							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendim.	Total	%
101027	Volquete 12m3, 320hp	Hora	1.000	27.00	0.00685	0.18	81.82%
Subtotal de Equipo:						0.18	81.82%
Materiales							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio		Total	%
Subtotal de Materiales:						0.00	0.00%
Transporte							
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa/U	Distancia	Total	%
Subtotal de Transporte:						0.00	0.00%
Mano de Obra							
Código	Descripción	Número	S.R.H.	Rendim.	Total	%	
432001	Chofer tipo E	1.00	5.29	0.00685	0.04	18.18%	
Subtotal de Mano de Obra:						0.04	18.18%
Costo Directo Total:						0.22	
Costos Indirectos 17%						0.04	
Precio Unitario Total						0.26	
Son:	26/100 DÓLARES						

