PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE CIVIL

DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

UTILIZACION DE GRANULOS DE CAUCHO TRITURADO DE NEUMATICOS FUERA DE USO EN MEZCLAS ASFALTICAS EN FRIO CON EMULSION Y MATERIAL FRESADO

NOMBRE:

MORANTE GOMEZ MARY BELEN

QUITO, 2019

DEDICATORIA

La elaboración de esta tesis, así como el proceso de estudio que se resume en esta investigación está dedicado a la memoria de Betty y Juliana, porque por amor hacemos posible lo imposible.

A Sofía porque ningún sueño es imposible y sé que alcanzaras todas tus metas.

AGRADECIMIENTO

El mayo agradecimiento por estos años de estudio es a Dios porque me ayudo en cada paso que di y a pesar de las pruebas nunca dejo de sostener mi mano.

A mis padres que me guiaron y me enseñaron a dar el 100% en todo lo que realice. Gracias porque esta etapa que he finalizado ha sido por su amor y apoyo.

A mis hermanos porque me apoyaron durante todo el proceso.

A mi director y correctores que me ayudaron durante el proceso de investigación y así desarrollar una mejor investigación. Gracias porque los conocimientos que me han impartido me han ayudado mucho.

Agradezco a las empresas Rubberaction e Imptek por la donación de los materiales para la ejecución de mi trabajo de titulación. Al Laboratorio de Carreteras de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil por ayudarme en el proceso de finalización de la tesis.

A los ayudantes del laboratorio de hormigones y pavimentos por la paciencia y por ayudarme a realizar de mejor manera esta investigación.

A mis amigas y amigos que estuvieron durante todo el proceso de carrera. Gracias por darme ánimos por ayudarme a creer en mis sueños y por cada palabra de aliento. Chicos lo logramos.

A Marcelo por tu apoyo incondicional.

Contenido

1. CAPITULO I: GENERALIDADES 12
   1.1 INTRODUCCION 12
   1.2 JUSTIFICACION 13
   1.3 OBJETIVOS 14
      1.3.1 OBJETIVO GENERAL 14
      1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS 14
   1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 14
   1.5 MARCO TEORICO 15
      1.5.1 Pavimento asfaltico reciclado (RAP: Reclaimed Asphalt Pavement) 15
      1.5.2 Emulsión asfáltica 16
      1.5.3 Metodología de Diseño Marshall 19
      1.5.4 Superpave 24
2. CAPITULO II: OBTENCION DEL PAVIMENTO FRESADO 28
   2.1 Ubicación del pavimento fresado (RAP) 28
   2.2 Demolición de la carpeta asfáltica 29
3. CAPITULO III: NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU) 30
   3.1 Composición de los neumáticos 30
      3.1.1 Composición química de los neumáticos 31
      3.1.2 Carbón negro o humo negro 32
   3.2 Métodos actuales para la eliminación de neumáticos fuera de uso (NFU) 33
      3.2.1 Vertedero 33
      3.2.2 Rencauchado 34
      3.2.3 Incineración 34
      3.2.4 Trituración 34
4. CAPITULO IV: OBTENCIÓN DEL GRANO DE CAUCHO TRITURADO 35
   4.1 Ubicación de la empresa Rubberaction 36
   4.2 Proceso de trituración de los neumáticos fuera de uso (NFU) y producción del grano de caucho. 36
      4.2.1Reciclaje de Neumáticos Fuera de Uso (NFU) 37
5. CAPITULO VI: EVALUACION DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO FRESADO (RAP) 39
   5.1 Evaluación del pavimento 39

5.1.1 Defectos de la superficie de rodadura 39
6. CAPITULO VII: METODOS DE RECICLAJE PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES 42
7. CAPITULO V: CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES 44
7.1 Ensayos en el pavimento fresado (RAP) 44
7.1.1 Contenido de asfalto residual: ASTM D2172M, ASTM D6307-16 44
7.1.2 Granulometría: ASTM D421, ASTM D422 46
7.1.3 Gravedad Especifica: ASTM C 128, ASTM C 29 49
7.1.4 Abrasión del agregado grueso (Maquina de Los Ángeles): ASTM C131 49
7.1.5 Desgaste a los sulfatos: ASTM C 88 50
7.1.6 Peso Unitario (Densidad Bulk) y Porcentaje de Vacíos: ASTM C 29, INEN 858, INEN 857, INEN 856. 50
7.1.7 Contenido de Humedad: INEN 862, ASTM C 566-09 52
7.1.8 Ensayo de Penetración para Cementos Asfalticos: ASTM D5 52
7.1.9 Ensayo de Viscosidad Rotacional: ASTM D4402 52
7.1.10 Resumen de resultados obtenidos del Pavimento Fresado (RAP) 53
7.2 Ensayos en el grano de caucho 54
7.2.1 Contenido de Humedad: INEN 2680, ASTM D1864/D1864M – 89 54
7.2.2 Contenido de Partículas Ferrosas: INEN 2680 54
7.2.3 Granulometría: INEN 2680, ASTM D 5644 54
7.2.4 Porcentaje de Fibra: INEN 2680 54
7.2.5 Resumen de resultados obtenidos en el grano de caucho 55
7.3 Emulsión asfáltica 55
7.3.1 Ensayo de Carga de partícula: INEN 908, AASHTO T-59 55
7.3.2 Ensayo de estabilidad y sedimentación de almacenamiento: INEN 910, ASTM D6930-10 55
7.3.3 Tamiz N°20 55
7.3.4 Ensayo de residuo por evaporación 56
7.3.5 Resumen de resultados obtenidos de la emulsión asfáltica 56
8. CAPITULO IX: DISEÑO DE LA MEZCLA ASFALTICA 57
9. CAPITULO X: MEZCLA ASFALTICA EN FRIO 58
9.1 Resultados Diseño Marshall 58
9.1.1 Porcentaje de emulsión asfáltica optimo 58

9.1.2 Dosificación de la mezcla asfáltica no modificado con grano de caucho 63
9.1.3 Resultado obtenidos de la mezcla asfáltica no modificada con grano de caucho 64
9.1.4 Dosificación de la mezcla asfáltica modificado con grano de caucho 66
9.1.3 Resultado obtenidos de la mezcla asfáltica modificada con grano de caucho 66
9.2 Resultados obtenidos Diseño Superpave 70
9.2.1 Granulometría 70
9.2.2 Propiedades de Origen 72
9.2.3 Esfuerzo del compactador giratorio 72
9.2.4 Gravedad específica y vacíos del agregado 73
9.3 Ensayo de módulo de rigidez 73
9.3.1 Resultados del Ensayo de Modulo de Rigidez 74
9.4 Ensayo de resistencia a la tracción indirecta 78
9.4.1 Resultados obtenidos de las briquetas Marshall y Superpave 79
10. CAPITULO X: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 81
10.1 CONCLUSIONES 81
10.2 RECOMENDACIONES 82
BIBLIOGRAFIA 84
ANEXOS 89

INDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Componentes básicos de los neumáticos _____ *31*
Tabla 3-2 Composición básica de los neumáticos _____ *32*
Tabla 3-3 Composición química del humo negro _____ *33*
Tabla 7-1 Ensayos para materiales reciclados en frio _____ *44*
Tabla 7-2 Agregados para mezclas granulométricas cerradas con emulsión _____ *46*
Tabla 7-3 Granulometría para mezclas asfálticas _____ *47*
Tabla 7-4 Agregados de gradación densa para mezclas asfálticas (Diseño Marshall) _____ *47*
Tabla 7-5 Resultados obtenidos del pavimento fresado _____ *53*
Tabla 7-6 Resultados del grano de caucho _____ *55*
Tabla 7-7 Resumen de resultados de la emulsión asfáltica CSS-1h _____ *56*
Tabla 9-1 Porcentaje de emulsión asfáltica para mezcla cerrada en frio _____ *59*
Tabla 9-2 Resultados obtenidos de las briquetas por método Marshall _____ *60*
Tabla 9-3 Resumen de resultados obtenidos de las briquetas por Método Marshall _____ *61*
Tabla 9-4 Diseño definitivo con pavimento fresado (RAP) _____ *62*
Tabla 9-5 Porcentaje de mezcla de los agregados _____ *63*
Tabla 9-6 Resultados mezcla asfáltica optima (2.5% emulsión + 0% caucho) _____ *65*
Tabla 9-7 Resumen de resultados mezcla asfáltica optima (2.5% emulsión + 0% caucho) _____ *65*
Tabla 9-8 Resultados obtenidos de las briquetas modificadas con grano de caucho _____ *67*
Tabla 9-9 Resumen de resultados obtenidos de las briquetas modificadas con grano de caucho _____ *68*
Tabla 9-10 Mezcla asfáltica diseñada con grano de caucho _____ *69*
Tabla 9-14 Parámetros de compactación de Superpave _____ *72*
Tabla 9-19 Módulo de rigidez briquetas Marshall _____ *74*
Tabla 9-20 Módulo de rigidez briquetas Superpave _____ *76*
Tabla 9-21 Resistencia a la tracción indirecta (kg/cm2) _____ *80*
Tabla 0-1 Determinación del contenido de ligante asfaltico en el pavimento fresado-muestra 1 _____ *89*
Tabla 0-2 Determinación del contenido de ligante asfaltico en el pavimento fresado-muestra 2 _____ *90*
Tabla 0-3 Promedio del contenido de ligante asfaltico en el pavimento fresado Av. Napo y Granada _____ *90*
Tabla 0-4 Determinación del contenido de ligante asfaltico en el pavimento fresado-muestra 3 _____ *91*
Tabla 0-5 Determinación del contenido de ligante asfaltico en el pavimento fresado-muestra 4 _____ *92*
Tabla 0-6 Promedio del contenido de ligante asfaltico en el pavimento fresado-Calles Dr. José Fernández Salvador y Julio Larrea _____ *92*
Tabla 0-7 Granulometría del agregado fino N°4 _____ *93*
Tabla 0-8 Granulometría del agregado intermedio 1/2" _____ *94*
Tabla 0-9 Granulometría del agregado grueso ¾" _____ *95*
Tabla 0-10 Gravedad especifica agregado fino N°4 _____ *96*
Tabla 0-11 Gravedad especifica agregado grueso 1 ½" _____ *97*
Tabla 0-12 Ensayo de abrasión (Maquina de Los Ángeles) _____ *98*
Tabla 0-13 Ensayo de desgaste a los sulfatos (agregado grueso ¾") _____ *99*
Tabla 0-14 Ensayo de desgaste a los sulfatos (agregado fino N°4) _____ *100*
Tabla 0-15 Densidad Bulk (compacta y suelta) y porcentaje de vacíos (agregado fino N°4) _____ *101*
Tabla 0-16 Densidad Bulk (compacta y suelta) y porcentaje de vacíos (agregado grueso 1 ½") _____ *102*
Tabla 0-17 Contenido de humedad (%w) _____ *103*
Tabla 0-18 Ensayo de penetración _____ *104*

Tabla 0-19 Ensayo de viscosidad rotacional ____ *105*
Tabla 0-20 Contenido de humedad del grano de caucho ____ *106*
Tabla 0-21 Contenido de partículas ferrosas ____ *107*
Tabla 0-22 Granulometría del grano de caucho ____ *108*
Tabla 0-23 Porcentaje de fibra ____ *109*
Tabla 0-24 Resultados del ensayo de carga de partícula ____ *110*
Tabla 0-25 Resultados del ensayo de estabilidad 24h ____ *110*
Tabla 0-26 Resultados del ensayo de estabilidad 5 días ____ *111*
Tabla 0-27 Resultados del ensayo del tamiz N°20 ____ *112*
Tabla 0-28 Resultados del ensayo sobre el residuo asfáltico ____ *113*
Tabla 0-29 Resultados del ensayo de ductilidad sobre el residuo asfáltico ____ *114*
Tabla 0-30 Resultados del ensayo de viscosidad Saybolt ____ *114*
Tabla 0-31 Resultados del ensayo de penetración sobre residuo asfáltico ____ *115*
Tabla 9-11 Resultado del ensayo de durabilidad para agregado grueso ____ *116*
Tabla 9-12 Resultado del ensayo de durabilidad para agregado fino ____ *117*
Tabla 9-13 Resultado del ensayo de tenacidad para agregado grueso ____ *118*
Tabla 9-15 Gravedad especifica máxima teórica muestra 1 (Gmm) ____ *119*
Tabla 9-16 Gravedad especifica máxima teórica muestra 2 (Gmm) ____ *120*
Tabla 9-17 Gravedad especifica neta de la mezcla asfáltica modificada (Gmb) ____ *121*
Tabla 9-18 Porcentaje de vacíos de aire (%) ____ *122*

INDICE DE GRAFICAS

Grafica 7-1 Curva granulométrica del agregado fino N°4 ____ *48*
Grafica 7-2 Curva granulométrica del agregado intermedio ½" ____ *48*
Grafica 7-3 Curva granulométrica del agregado grueso ¾" ____ *49*
Grafica 7-4 Viscosidad Vs Temperatura del asfalto residual recuperado ____ *52*
Grafica 8-1 Matriz de clasificación de mezclas asfálticas ____ *57*
Grafica 9-1 Densidad Bulk con 4% agua ____ *61*
Grafica 9-2 Estabilidad con 4% de agua ____ *62*
Grafica 9-3 Flujo con 4% de agua ____ *62*
Grafica 9-4 Curva granulométrica de diseño ____ *64*
Grafica 9-5 Estabilidad Vs Grano de caucho ____ *69*
Grafica 9-6 Flujo Vs Grano de caucho ____ *69*
Grafica 9-7 Perdida de Estabilidad Vs Grano de Caucho ____ *70*
Grafica 9-8 Carta granulométrica de Superpave ____ *71*
Grafica 9-9 Modulo de rigidez briquetas Marshall (1M) ____ *75*
Grafica 9-10 Modulo de rigidez briquetas Marshall (2M) ____ *76*
Grafica 9-11 Modulo de rigidez briquetas Superpave (1S) ____ *77*
Grafica 9-12 Módulo de rigidez briquetas Superpave (2S) ____ *78*

INDICE DE FOTOS

Foto 1-1 Metodología de Diseño Marshall ____ *20*
Foto 1-2 Estabilidad ____ *21*
Foto 1-3 Flujo ____ *22*
Foto 1-4 Gravedad Especifica Bulk ____ *23*
Foto 1-5 Rice ____ *24*
Foto 1-6 Briquetas Superpave ____ *25*
Foto 1-7 Ensayo de Abrasión Maquina de los Ángeles (Tenacidad) ____ *25*
Foto 1-8 Ensayo de Sulfatos (Durabilidad) ____ *26*
Foto 1-9 Compactador Giratorio Superpave ____ *27*
Foto 4-1 Polvo de Caucho (Tamiz No.20) ____ *35*
Foto 4-2 Grano de Caucho (1-4 mm) ____ *35*
Foto 5-1 Piel de Cocodrilo ____ *40*
Foto 5-2 Fisuras en bloque ____ *40*
Foto 5-3 Fisura longitudinal y transversal ____ *41*
Foto 5-4 Desgaste de la superficie ____ *41*
Foto 7-1 Ensayo de Ignición Av. Napo y Granada ____ *45*
Foto 7-2 Ensayo de ignición Calles Dr. José Fernández Salvador y Julio Larrea ____ *45*
Foto 7-3 Ensayo de abrasión ____ *50*
Foto 7-4 Peso unitario agregado fino (Tamiz N°4) ____ *51*
Foto 7-5 Peso unitario agregado grueso (Tamiz 1 ½") ____ *51*
Foto 7-6 Ensayo de granulometría del grano de caucho ____ *54*
Foto 9-1 Briquetas cilíndricas Diseño Marshall ____ *73*
Foto 9-2 Briquetas cilíndricas Método Superpave ____ *74*
Foto 9-3 Ensayo de resistencia a la tracción indirecta ____ *79*

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Emulsión Asfáltica *17*
Figura 1-2 Proceso de Fabricación de la Emulsión Asfáltica *17*
Figura 2-1 Ubicación de la Av. Napo y Granada. *28*
Figura 2-2 Ubicación de las Calles Dr. José Fernández Salvador y Julio Larrea. *28*
Figura 2-3 Diagrama de flujo del proceso de Fresado de Pavimento Asfaltico *29*
Figura 3-1 Estructura de los neumáticos (OPONEO.ES, 2015) *30*
Figura 3-2 Componentes básicos de los neumaticos *31*
Figura 3-3 Ciclo GRIN (Gestión y Reciclaje Integral de los Neumáticos) (Viviendo en la Tierra, 2018) *34*
Figura 4-1 Ubicación de la Planta ***Rubberaction Cia.Ltda.*** *36*
Figura 4-2 Recuperación y Asignación de Neumáticos Fuera de Uso (Cloud, 2016) *37*
Figura 4-3 Diagrama de flujo del proceso de reciclaje de neumáticos fuera de uso (NFU) *38*

1. CAPITULO I: GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCION

El desarrollo vial en el Ecuador ha permitido que se generen nuevos sistemas viales con nuevos métodos constructivos. Al realizar la infraestructura viaria se comienza con la fase de "explotación". El desarrollo de esta fase genera dos actividades: la primera dirigida al servicio que prestará a los usuarios y vehículos en la carretera; la segunda fase corresponderá al mantenimiento de la infraestructura vial. A pesar de ello, el mantenimiento vial aun es un tema que se ha relegado a un segundo plano y que solo se lo efectúa cuando el tramo de vía ya no cumple con ninguna de las características que se diseñó o su nivel de serviciabilidad ha disminuido (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013b).

El Manual NEVI-12 Volumen 6 específica la clasificación de las actuaciones que se deberán realizar en una infraestructura vial deberán estar orientadas a conservar y mantener las cualidades de diseño iniciales de la infraestructura vial. Así mismo se especifica otro tipo de intervenciones que buscaran optimizar las cualidades iniciales de la infraestructura (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013b).

Actualmente se ha priorizado en las vías el desarrollo de evaluaciones sobre la condición global del pavimento, las cuales determinaran las deficiencias estructurales. Esto ha permitido en algunos tramos viales incrementar la capacidad estructural; mediante métodos de refuerzo, reciclado o reconstrucción (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2001b).

El proceso de reciclado permite la reutilización de los materiales triturados de capas de pavimento, que han sido extraídos mediante procesos mecánicos. Esto permitirá conformar la capa base o capa de rodadura, del pavimento asfaltico reciclado. De tal manera, que optimice el uso de materiales reciclados y se disminuya los volúmenes de residuos que se generan al realizarse el fresado del pavimento (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002).

Los procesos de reciclaje de materiales asfalticos, a nivel mundial, se lleva a cabo de dos maneras diferentes. La primera consiste en trasladar el material generado del fresado del pavimento envejecido hacia una planta de fabricación de mezclas bituminosas e incorporarlo, en pequeños porcentajes, al manufacturar la nueva mezcla asfáltica (Miró, Centeno, Martínez, & Pérez, 2007).El segundo método de reciclaje, procede al usar directamente in situ el material asfaltico reciclado, empleando y tratando el material fresado con un porcentaje de material ligante; en este proceso se puede incluir otro componente, tales como áridos, mejorando la calidad del material reciclado (Miró et al., 2007).

El reciclado in situ en frio con emulsión es una técnica que permite la reutilización del 100% del material fresado (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2001b). Se realiza con equipos multifunción que mezclan el material fresado con agua y emulsión; extendiéndole sobre la zona deteriorada en una capa de base, todo este proceso se realizará a temperatura ambiente. La capa de rodadura que se coloque a continuación podrá tener un espesor pequeño (Instituto Nacional de Vias, s. f.).

> Sin embargo, no todo son ventajas en el reciclado de firmes, ya que desde el punto de vista técnico, la utilización del material procedente del fresado de pavimentos antiguos, denominado genéricamente RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), modifica el comportamiento mecánico de las mezclas bituminosas a las que se incorpora, ya sea porque los áridos producidos durante el fresado no tiene una granulometría estandarizada o porque estos áridos reutilizados están envueltos por betún envejecido, que lleva a obtener una mezcla más rígida y probablemente más frágil de lo que sería en el caso de utilizar un árido virgen. (Miró et al., 2007)

En la actualidad, ciertas industrias recicladoras han optado por la reutilización del caucho vulcanizado triturado como aglutinante en la construcción de carreteras. La característica principal que aporta al asalto es que su vida útil se incrementa tres veces más y su comportamiento con los cambios de temperatura mejora (Castro, 2007).

El caucho que se produce los neumáticos usados puede usarse como material ligante o sellante asfaltico o como un árido (asfalto modificado con caucho) (Castro, 2007).

La combinación de materiales reciclados, tales como el granulo de caucho de neumáticos fuera de uso (NFU) en combinación con el material fresado aportan a la industria de los pavimentos una solución ambientalmente viable y se genera nuevos procesos constructivos para pavimentos asfalticos.

1.2 JUSTIFICACION

El incremento de la fabricación de neumáticos, debido al crecimiento del parque automotriz y la dificultad de un tratamiento adecuado para su reutilización, es uno de los problemas medioambientales más graves de los últimos años a nivel mundial (Sorgato, 2016).

La fabricación de neumáticos requiere de elastómeros o cauchos que constituyen el 60% de la producción anual de la industria del caucho. La manufactura de los neumáticos requiere de procesos químicos y físicos, por lo que es necesario usar técnicas de reciclado o reutilización de los materiales que conforman a los neumáticos (Ministerio del Ambiente, 2017a). Actualmente, ciertas industrias recicladoras han optado por la reutilización del caucho vulcanizado triturado como aglutinante en la construcción de carreteras. La característica principal que aporta al asalto es que su vida útil se incrementa tres veces más y su comportamiento con los cambios de temperatura mejora (Holubka, Salaiová, Holubka, & Salaiova, 2013).

La conservación de la estructura de un pavimento flexible y rígido es fundamental para garantizar las características de diseño inicial, pese a estar sometido a factores ambientales y cargas vehiculares (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002). El fresado y reposición de mezclas bituminosas como rehabilitación vial, produce grandes volúmenes de residuos, que al no ser tratados adecuadamente generan otra problemática al medio ambiente (Sorgato, 2016). Las técnicas de reciclado para pavimentos flexibles constituyen una alternativa para la reutilización de material fresado que permite la elaboración de nuevas mezclas asfálticas (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2001b).

Las mezclas asfálticas en frio de pavimentos asfalticos permiten una reutilización del 100% del material procedente del fresado RAP (Asphalt Recycling Pavement) del tramo de vía deteriorada (Centro de Investigaciones Viales, 2008).

Debido a los antecedentes expuestos anteriormente surge el reto para los nuevos proyectos viales, de iniciar procesos amigables con el medio ambiente e implementar sistemas, como son: Mezclas recicladas en frio con caucho vulcanizado triturado como aglutinante.

En el presente trabajo de tesis se plantea realizar un estudio que permite determinar la resistencia, aplicabilidad y eficiencia de los gránulos de caucho triturado de neumáticos para proyectos de rehabilitación vial que garanticen solucionar la disminución de volúmenes de residuos inertes e incrementar el uso de material reciclado en frio de pavimentos asfalticos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

- Determinar si el comportamiento de la mezcla de los gránulos de caucho triturado de neumáticos fuera de uso (NFU) con cierta granulometría; en conjunto con material procedente del fresado RAP (Asphalt Recycling Pavement), en un porcentaje de mezcla en frio de 1%,1.5%,2% y 2.5%; utilizando como ligante emulsión bituminosa para optimizar la resistencia y durabilidad de la capa de rodadura que conforma la estructura del pavimento flexible.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Calibrar los porcentajes de mezcla de los materiales para las probetas de ensayo, las cuales estarán en función de la granulometría de los gránulos de caucho triturado de neumáticos fuera de uso (NFU). Además, deberán cumplir con los requerimientos del Ensayo Marshall Modificado para emulsiones asfálticas en frio especificado en el Manual del Asphalt Institute y utilizando el Método de Diseño SUPERPAVE
- Realizar los diseños y analizar los resultados de las probetas de ensayo, cotejándolas con los resultados de resistencia de las probetas de material fresado; utilizando las normativas que se utilizan para el Ensayo Marshall Modificado y el Método de Diseño SUPERPAVE.
- Estudiar el comportamiento del material reproducido en el laboratorio, mediante ensayos de caracterización mecánica. Los cuales se especifican el Método Marshall Modificado y el Método de diseño SUPERPAVE.
- Evaluar el porcentaje de uso de las llantas fuera de uso y determinar el impacto ambiental de utilizarlas como alternativa para material granular de mezclas recicladas en frio.

1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Ecuador se estima que se desechan anualmente 2’400.000 neumáticos, los cuales se transforman en neumáticos fuera de uso (NFU) (El Universo, 2018). Se ha proyectado que en el Distrito Metropolitano de Quito el número de llantas desechadas para el año 2018 sería de 2696309.19; estos valores se deben al porcentaje de crecimiento anual del 11% que la Secretaria de Movilidad ha estimado (Armas & Baño, 2013).

El impacto ambiental negativo que genera un manejo inadecuado de los neumáticos fuera de uso (NFU), puede provocar la contaminación de cuerpos de agua, vertederos y la vida útil de los rellenos sanitarios disminuye (Castro, 2007). La eliminación inadecuada de los neumáticos fuera de uso (NFU) en Ecuador ha generado la necesidad de implementar planes para poder manejar adecuadamente estos desechos.

El Ministerio del Ambiente (MAE) ante esta amenaza para el medio ambiente emitió el Acuerdo Ministerial N°20, emitió el Plan de Gestión Integral de los Neumáticos Usados; el cual tiene como objetivo principal el gestionar adecuadamente los procedimientos y especificaciones para el manejo adecuado de los neumáticos fuera de uso (NFU) (Ministerio del Ambiente, 2017a).

El Sistema Ecuatoriano de Gestión Integral de Neumáticos Usados (SEGINUS), que fue aprobado por el Ministerio del Ambiente, constituido por empresas que conforman el 80% del mercado de neumáticos en el país. Permitirá manejar adecuadamente todo el proceso de gestión de los neumáticos fuera de uso (NFU). El objetivo final del SEGINUS será transformar y aprovechar a través de procesos mecánicos y tecnológicos los materiales que conforman los neumáticos para la fabricación de nuevos productos y poder incorporarlos como materia prima para otros procesos constructivos en ingeniería (Ministerio del Ambiente, 2017b).

El reciclaje de los neumáticos fuera de uso (NFU) como parte de la estructura del pavimento asfaltico, permite su uso como parte de los áridos o como material ligante (Piggott & Woodhams, 1979). Las propiedades elásticas del caucho triturado en las mezclas asfálticas permiten un mayor reciclaje de los neumáticos fuera de uso, además se disminuye el uso de agregado en la mezcla.

A pesar de que, la fabricación de pavimentos en Ecuador el uso de materiales reciclados no es una práctica común por lo que es necesario buscar alternativas que sean amigables con el medio ambiente. Por tal motivo se incorporará el pavimento asfaltico reciclado (RAP: Reclaimed Asphalt Pavement) más el caucho triturado fuera de uso (NFU) para el diseño de una nueva mezcla asfáltica que no generen contaminantes al medio ambiente y que su impacto ambiental negativo sea bajo.

El uso de pavimento asfaltico reciclado (RAP: Reclaimed Asphalt Pavement) puede generar posibles ahorros en costos de construcción de vías y representa un método de reciclaje ambientalmente positivo (Arun & Ganesh, 2013).

1.5 MARCO TEORICO

1.5.1 Pavimento asfaltico reciclado (RAP: Reclaimed Asphalt Pavement)

El pavimento asfaltico reciclado (RAP: Reclaimed Asphalt Pavement) es el termino dado a los materiales de pavimentos removidos y/o reprocesados que contienen asfalto envejecido y agregados pétreos que aún conservan parte de las propiedades mecánica. Este material se produce cuando se remueve el pavimento asfaltico para sustituirlo, reconstruirlo o para obtener acceso a servicios enterrados.

Existen dos factores principales para el uso del RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) en pavimentos de asfalto, los cuales son: ahorro económico y beneficios ambientales. RAP (Reclaimed Asphalt

Pavement) es una alternativa útil para reducir los agregados vírgenes y la cantidad de asfalto virgen que se requiere para producir una mezcla asfáltica nueva (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2001f).

Cuando se tritura y se tamiza adecuadamente el pavimento asfaltico reciclado (RAP) este puede convertirse en un agregado de alta calidad que puede usarse para repavimentación al incorporarse con mezclas de asfalto en caliente (HMA: Hot Mix Asphalt) y mezclas asfálticas en frio (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2001c).

El pavimento asfaltico reciclado (RAP) al incorporarse con emulsión asfáltica puede producir mezclas asfálticas que servirían para el mantenimiento vial. La dosificación de la emulsión para estas mezclas está en el rango de 1% a 2.5%, por peso seco de RAP (Instituto del Asfalto, 2001b). Sin embargo, es necesario realizar un diseño adecuado para evaluar la cantidad de emulsión y las proporciones requeridas de pavimento asfaltico reciclado (RAP).

El uso de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) permite reducir la cantidad de desechos de construcción que terminarían como escombros y no agota los recursos naturales no renovables que se requieren para producir mezclas de asfalto en caliente (HMA: Hot Mix Asphalt) y mezclas asfálticas en frio (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2001d).

Además, reciclar el asfalto crea un ciclo de reutilización que optimiza el uso de los recursos naturales y permite mejorar la industria del pavimento asfaltico. Para la producción de mezclas asfálticas de calidad con altos contenidos de RAP, es necesario manejar adecuadas prácticas de gestión de materiales.

1.5.2 Emulsión asfáltica

Una emulsión se define como una dispersión de pequeñas gotas de un líquido en otro líquido. Un ejemplo típico de emulsiones son la mantequilla, mayonesa, leche y cremas cosméticas. Las emulsiones pueden estar constituidas por dos líquidos inmiscibles, pero en la mayoría de las emulsiones una de las fases es agua (Instituto del Asfalto, 2018).

Las emulsiones de aceite en agua son aquellas en que la fase continua es el agua y la fase dispersa son las gotas de aceite. Este tipo de emulsiones son las emulsiones asfálticas (TxDOT, 2005).

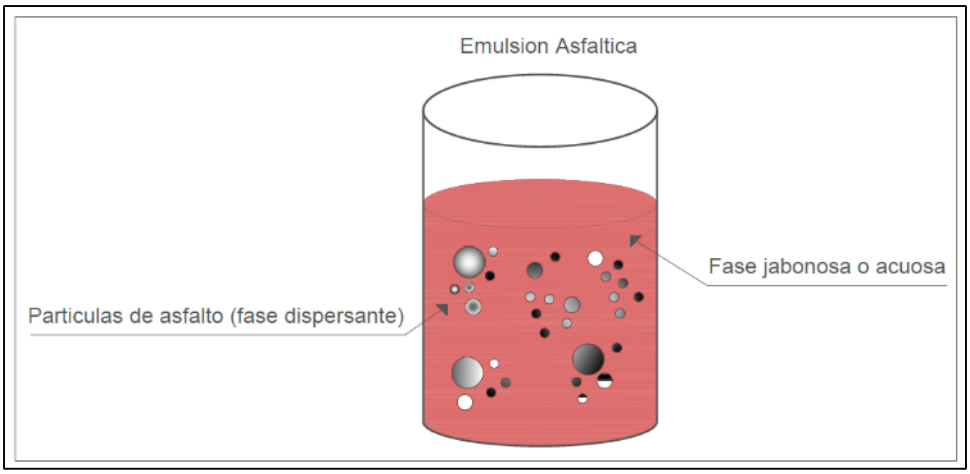


Figura 1-1 Emulsión Asfáltica

La emulsión asfáltica o asfalto emulsificador es la combinación de tres componentes, que son: asfalto, agua y un agente emulsificante. Además, es necesario agregar ácido (ácido clorhídrico, que puede ser remplazado por ácido fosfórico según el tipo de emulsificante) para que las grasas aminas puedan reaccionar y convertirse en una fase jabonosa. La dosificación acida es el factor regulador que determina el pH final de la emulsión (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2001b).

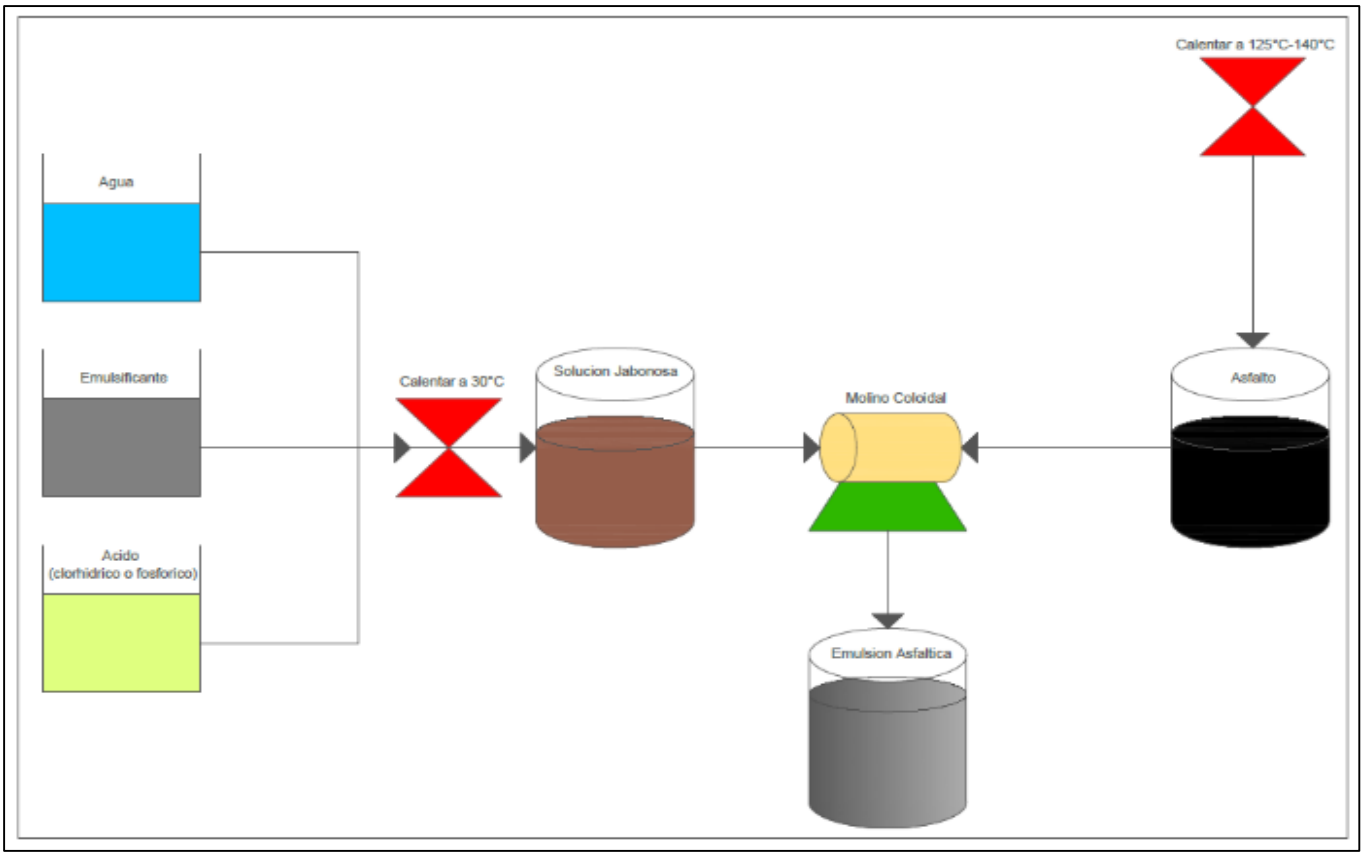


Figura 1-2 Proceso de Fabricación de la Emulsión Asfáltica

El agente emulsificante permite que se puedan mezclas estas dos sustancias. Por lo que es necesaria la utilización de un molino coloidal, para que las partículas de asfalto se puedan combinan con el emulsificante (Jimenez, Ulloa, & Molina, 2010).

Las emulsiones se clasifican por su carga iónica. Las emulsiones catiónicas comienzan con la letra "C"; por lo tanto, aquellas que no tengan la letra "C" suelen ser aniónicas. La carga es importante cuando se diseña una emulsión para ser compatible con ciertos agregados (Instituto del Asfalto, 2018).

- Emulsiones catiónicas: los glóbulos de asfalto poseen carga positiva.
- Emulsiones aniónicas: los glóbulos de asfalto poseen carga negativa.

En Ecuador las emulsiones catiónicas son producidas en mayor cantidad, debido a que el agregado pétreo contiene sílice en su estructura química, lo cual genera una carga negativa en el mismo.

> A las emulsiones catiónicas se les antepone la letra C y a las aniónicas, la letra A. Agregados pétreos del tipo calcáreo y calizos presentan mayor afinidad con las emulsiones aniónicas, y los basaltos, granitos y de origen silicio, con las catiónicas (Rondon & Reyes, 2015a).

El tipo de emulsificante posee una carga eléctrica, la cual rodea la superficie de las partículas de asfalto; las cuales están separadas por las partículas de agua. Esto genera que las partículas de asfalto y de agua se separen durante un periodo determinado de tiempo (Instituto del Asfalto, 2018).

El tiempo de separación de las partículas permite clasificarlas por su reactividad, en donde se produce la perdida de estabilidad de la emulsión o rompimiento (Rondon & Reyes, 2015b). Es por esta razón, que la velocidad de rotura permite clasificar a las emulsiones en cuatro grupos:

- RS (Rapid –Setting): rompimiento rápido
- MS (Medium –Setting): rompimiento medio
- SS (Slow-Setting): rompimiento lento
- QS (Quick-Setting): rompimiento controlado

La Norma INEN 2062- "Emulsiones Asfálticas Catiónicas", clasifican a las emulsiones catiónicas en tres grupos y subgrupos:

- Ruptura Rápida
  - CRS-1
  - CRS-2
- Ruptura Media
  - CMS-2
  - CMS-2h
- Ruptura Lenta
  - CSS-1
  - CSS-1h

A continuación, se realizará una descripción de la nomenclatura utilizada para la clasificación de las emulsiones utilizando la Norma ASTM D977 y D2397:

- R: ruptura rápida
- S: ruptura lenta
- h: asfalto duro
- 1: 57% de asfalto. Viscosidad baja
- 2: 65% de asfalto. Viscosidad alta

Las ventajas de las emulsiones asfálticas en comparación con los aglutinantes asfalticos es la baja temperatura de aplicación, la compatibilidad con otros aglutinantes a base de agua y el bajo contenido de solvente (Instituto del Asfalto, 2001a).

Las propiedades físicas de las emulsiones se pueden modificar para optimizar el almacenamiento, curado, mezcla, carga vehicular y fuerza de unión entre partículas. Las características físico-químicas de las emulsiones permiten la incorporación de aditivos tales como: polímeros, látex, estabilizantes y otros modificadores. Estos permiten mejorar las propiedades físicas de la emulsión asfáltica, así como del asfalto (Instituto del Asfalto, 2018).

1.5.3 Metodología de Diseño Marshall

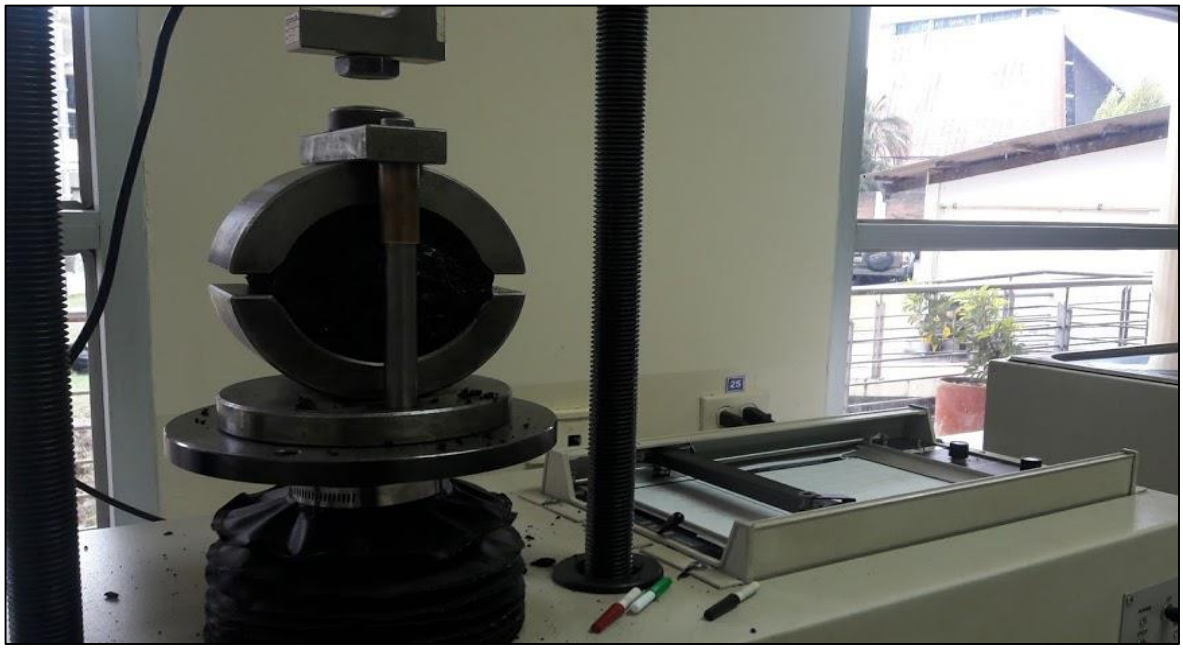
Bruce Marshall desarrollo una técnica de diseño para Mezclas Asfálticas en Caliente. Esta metodología se basa en la estabilidad y contenido de vacíos de la mezcla asfáltica. La metodología Marshall, ASTM D1559, permite controlar y garantizar las proporciones volumétricas de la mezcla (Yanez, 2006).

La metodología de Diseño Marshall permite obtener la Gravedad Especifica Bulk, contenido de vacíos, estabilidad y flujo. Para luego determinar el contenido de asfalto o emulsión asfáltica optimo parar el diseño de las briquetas. Sin embargo, caracterizar los agregados pétreos que integraran la mezcla asfáltica juega un papel importante en el diseño.

El diseño de Marshall para mezclas asfálticas en frío con emulsión asfáltica, es recomendado para capas de rodadura de tráfico vehicular liviano. Estas mezclas son ejecutadas para mezclas in situ a temperaturas ambientales (Jiménez, Sibaja, & Molina, 2009).

La Norma MOP-001-F 2002, establece parámetros y límites para los resultados obtenidos de la Metodología Marshall. Esto nos permitirá determinar el contenido de emulsión asfáltica óptimo para el diseño (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002).

Foto 1-1 Metodología de Diseño Marshall



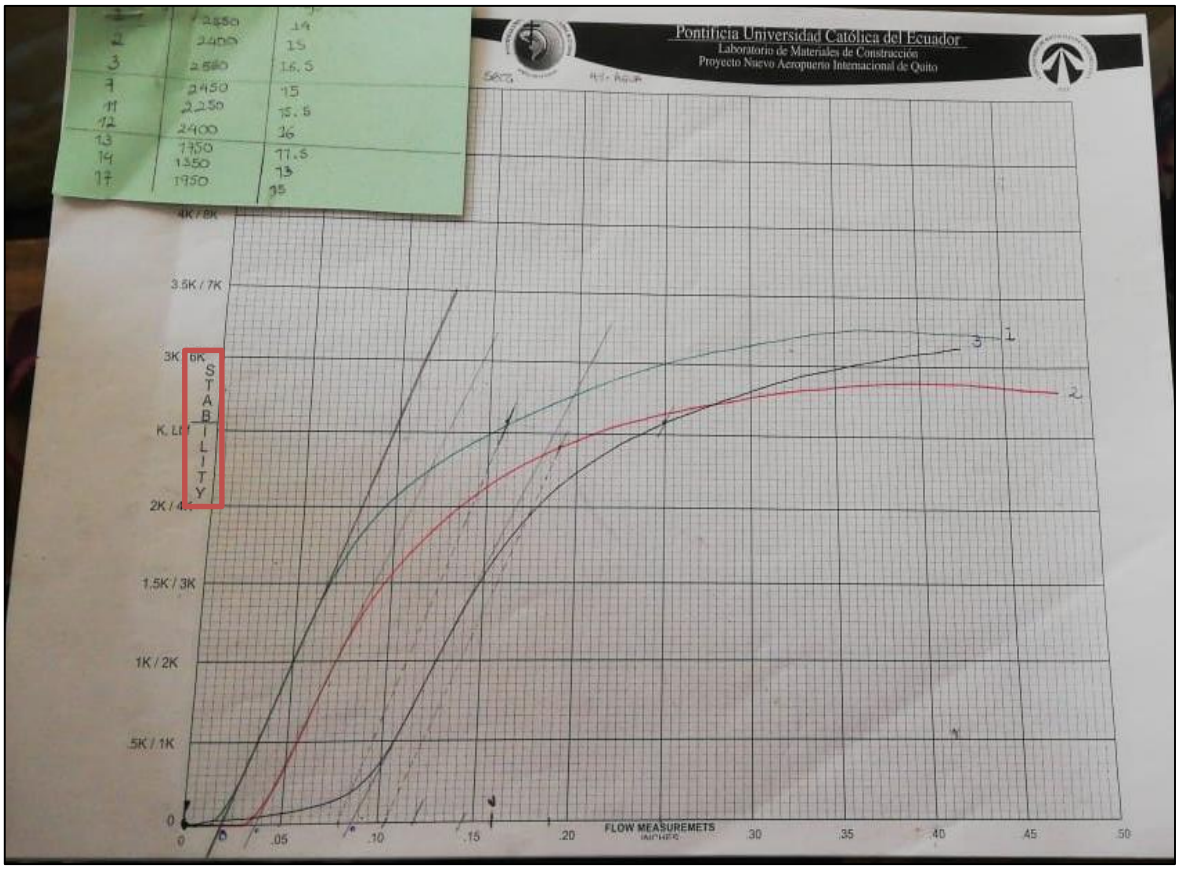
1.5.3.1 Estabilidad

La estabilidad es la carga máxima (lb o kg) que puede resistir una briqueta en el Aparato Marshall; la estabilidad es una propiedad estructural del diseño de la mezcla emulsificada (Garnica, Delgado, & Gomez, 2004).

Un adecuado diseño permite someter a la estructura del pavimento asfaltico a cargas de tránsito vehicular, sin generar deformaciones. La fricción interna de los agregados evita las deformaciones en la estructura del pavimento (Garnica et al., 2004).

La pérdida de estabilidad permite determinar la resistencia de las briquetas (mezcla) a cambios de temperatura y el paso de vehículos. Las briquetas deben ser sometidas a baño María a 60°C durante un periodo de 22 horas, después se las somete otra vez a baño María a 25°C por un periodo de tiempo de 2 horas, se seca las muestras y se las coloca en el Aparato Marshall. El cual aplica una carga máxima para producir la rotura de la probeta, de esta manera se obtiene los valores de estabilidad y flujo.

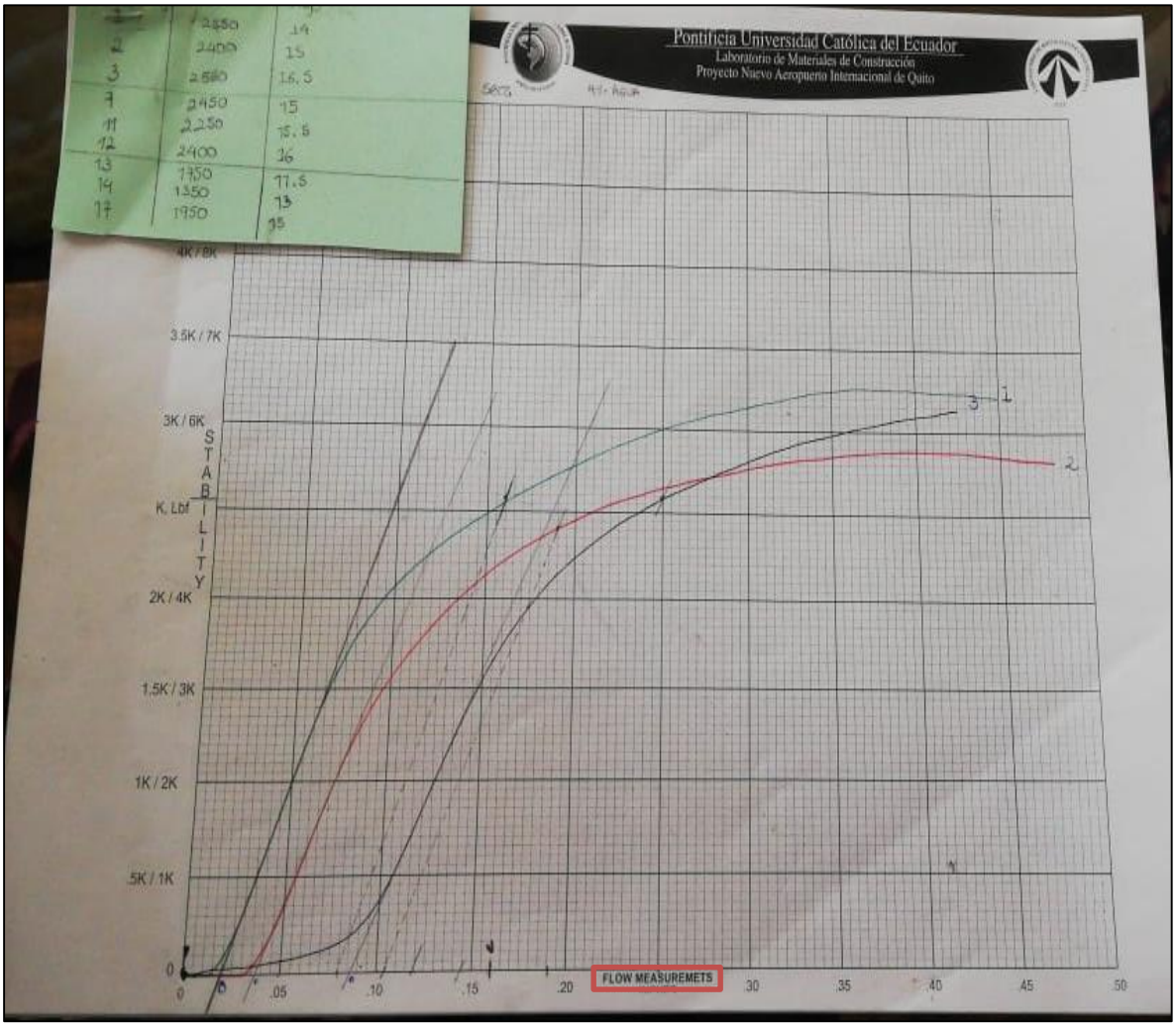
Foto 1-2 Estabilidad



1.5.3.2 Flujo

El flujo o fluidez es la deformación que se produce, debido a una carga máxima. Dicho de otra manera, el flujo es el máximo desplazamiento que experimenta la briqueta al ser sometida a cargas de tráfico vehicular (Rondon & Reyes, 2015b).

Foto 1-3 Flujo



1.5.3.3 Gravedad Especifica Bulk

El valor de la Gravedad Especifica Bulk es determinado después de que las briquetas cumplan con su periodo de curado en el horno; se toman las medidas de diámetro y altura, previo a ser sumergidas en agua a 25°C (Rondon & Reyes, 2015b).

El peso de las briquetas sumergidas en agua y con superficie seca saturada, determinan el valor de la gravedad especifica Bulk.

Foto 1-4 Gravedad Especifica Bulk



1.5.3.4 Rice

El contenido de vacíos de la mezcla emulsificada es determinado a través del Ensayo Rice. Para ejecutar este ensayo es necesario realizar 2 mezclas con el porcentaje de emulsión asfáltica calculado. Se realiza el mismo procedimiento de curado en el horno. La mezcla deberá estar disgregada en las bandejas, para que exista un mayor grado de homogeneidad.

La mezcla emulsificada será colocada en el molde especificado para este ensayo, después se coloca agua y el conjunto es sometido a una bomba de extracción de aire. Después de cumplir con el periodo de tiempo de extracción del aire, se pesa el conjunto y se obtiene el valor de contenido de vacíos (Yanez, 2006).

Foto 1-5 Rice



1.5.4 Superpave

La Metodología Superpave desarrollada en el año de 1987, por el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras de los EEUU, por sus siglas en ingles SHRP (Strategic Highway Research Program). Sus principales enfoques fueron desarrollar especificaciones para los ligantes asfalticos, caracterizar a los agregados (propiedades de origen y consenso) (Instituto del Asfalto, 2001c; Montejo, 2008b).

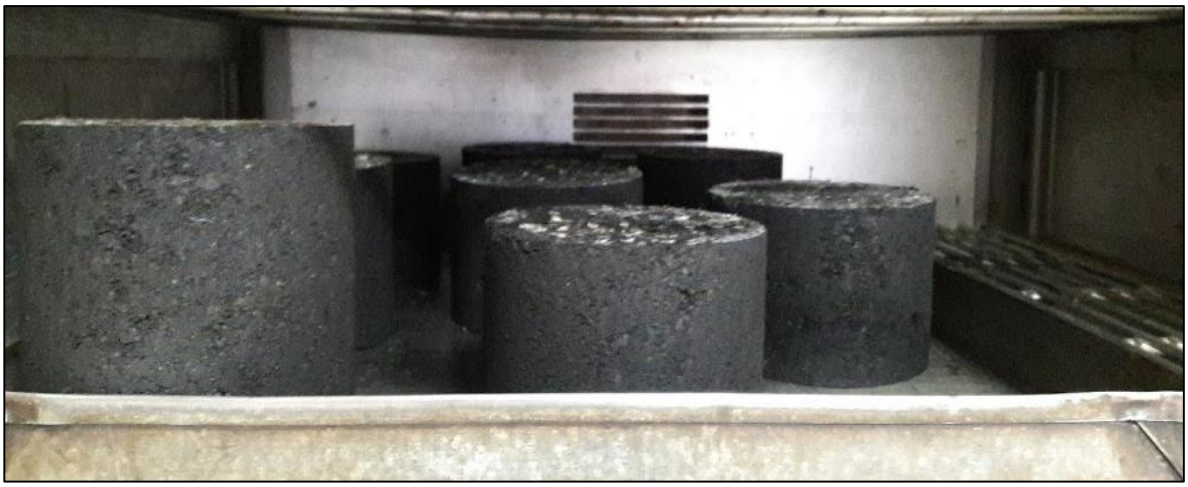
La temperatura y el tiempo de carga vehicular, son los principios básicos que la Metodología Superpave aplica para el diseño de mezclas asfálticas (Bitumix CVV Especialidades Asfalticas, 2015). Sin embrago, al sustituir el ligante asfaltico por emulsión asfáltica las especificaciones que se requieren para Superpave no pueden ser determinadas completamente.

La metodología Superpave se compone de tres niveles de diseño. La complejidad del diseño de esta mezcla se debe a la importancia del pavimento que se construiría. Los niveles de diseño de esta metodología serán expuestos a continuación:

- **Nivel 1:** se evalúan las propiedades empíricas de los agregados y de las mezclas. Se relaciona con el comportamiento en servicio. En este nivel no se evalúa el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica a cargas de tránsito.
  Por lo tanto, no se puede establecer la resistencia a fatiga y ahuellamiento de la mezcla asfáltica.

- **Nivel 2:** esta mezcla asfáltica se diseña para volúmenes de transito intermedios. En este nivel se evalúa la resistencia a la fatiga y ahuellamiento; así como las propiedades evaluadas en el Nivel 1.
  La caracterización de las probetas se ejecutará a través del ensayo de Tracción Indirecta.
- **Nivel 3:** en este nivel las mezclas asfálticas son diseñadas para cargas de transito altas. Esta mezcla posee mayor confiabilidad que los diseños producidos en los Niveles 1 y 2 respectivamente.
  A pesar de ello, este nivel no es utilizado al igual que el Nivel 2. Debido a que no hay suficiente información experimental en las normas de diseño. Por tal motivo se utilizarán los criterios de diseño Superpave Nivel 1 (Montejo, 2008b).

Foto 1-6 Briquetas Superpave



1.5.4.1 Propiedades de Origen

Las propiedades de origen son critica para el diseño de la mezcla asfáltica, sin embargo, estos valores dependen de la fuente de origen (Montejo, 2008b). Esta característica es la diferencia principal con respecto a las propiedades de consenso.

Las propiedades de origen que se evalúan son tenacidad, durabilidad y materiales deletéreos. Estas propiedades son independientes del número de ESALs.

Foto 1-7 Ensayo de Abrasión Maquina de los Ángeles (Tenacidad)



Foto 1-8 Ensayo de Sulfatos (Durabilidad)



1.5.4.2 Compactación de la Mezclas Asfálticas

La compactación de las probetas se las realiza a través del compactador giratorio Superpave. La base del compactador giratorio Superpave (SGC) gira a una velocidad de 30 rev/min durante la compactación, con el molde colocado en un ángulo de compactación de 1.25° (Instituto del Asfalto, 2001c).

La compactación de las probetas diseñadas a través de la metodología Superpave, depende de la carga de tráfico vehicular y temperatura del aire del proyecto. La carga de tráfico vehicular esta expresado en ESAL's (Equivalente single axle loads), se define como el número de ejes equivalentes (Montejo, 2008b).

El Instituto del Asalto especifica los parámetros de compactación en base al número de diseño ESALs (millones) y las aplicaciones que se podrían aplicar a este diseño asfaltico.

Los valores que considera el diseño Superpave para la compactación giratoria de las briquetas son los siguientes:

- **N $_{inicial:}$** número de giros de compactación mínimo para la compactación de la briqueta
- **N $_{diseño:}$** número de giros de compactación de diseño para la compactación de la briqueta
- **N $_{máx.:}$** número de giros de compactación máximo para determinar la densidad de la mezcla asfáltica, después de ser colocada

Las muestras se deben compactar con el N $_{diseño}$ de giros estipulados en la Tabla 5.1 "Esfuerzo de Compactación Giratorio Superpave" del Manual Superpave Serie No.2 (SP-2) y la Tabla 1 "Esfuerzo de Compactación Giratorio Superpave" de la Norma AASHTO R35-04 (AASHTO, 2004; Montejo, 2008b; Universidad de las Americas Puebla, 2013).

Foto 1-9 Compactador Giratorio Superpave



2. CAPITULO II: OBTENCION DEL PAVIMENTO FRESADO

2.1 Ubicación del pavimento fresado (RAP)

La obtención del pavimento fresado (RAP: Reclaimed Asphalt Pavement) para la realización del presente trabajo de tesis fue tomado en dos puntos de la ciudad de Quito:

- Av. Napo y Granada

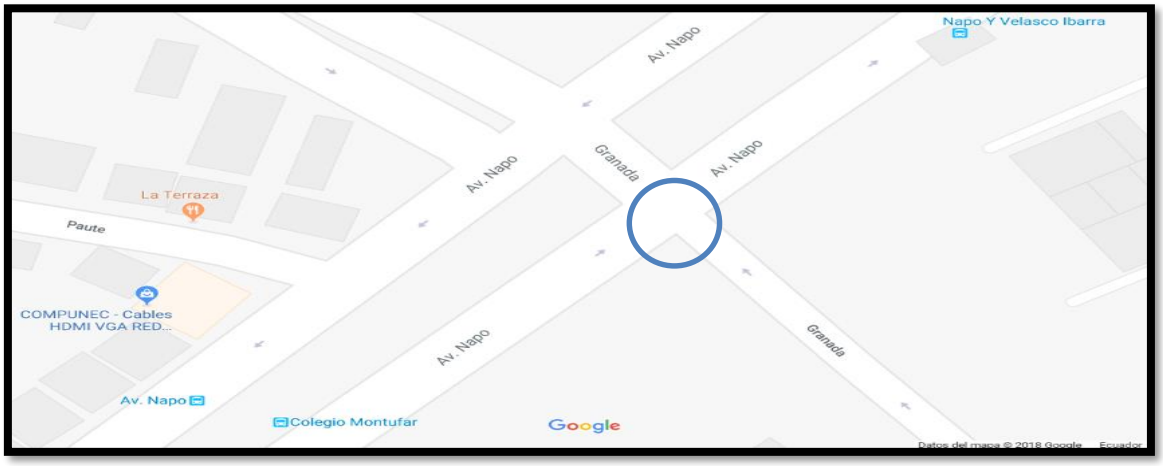


Figura 2-1 Ubicación de la Av. Napo y Granada.

Nota. Fuente: Google Maps. https://www.google.com/maps/@-0.2376153,-78.5091,19.96z
Imagen editada por Belen Morante

- Calles: Dr. José Fernández Salvador y Julio Larrea

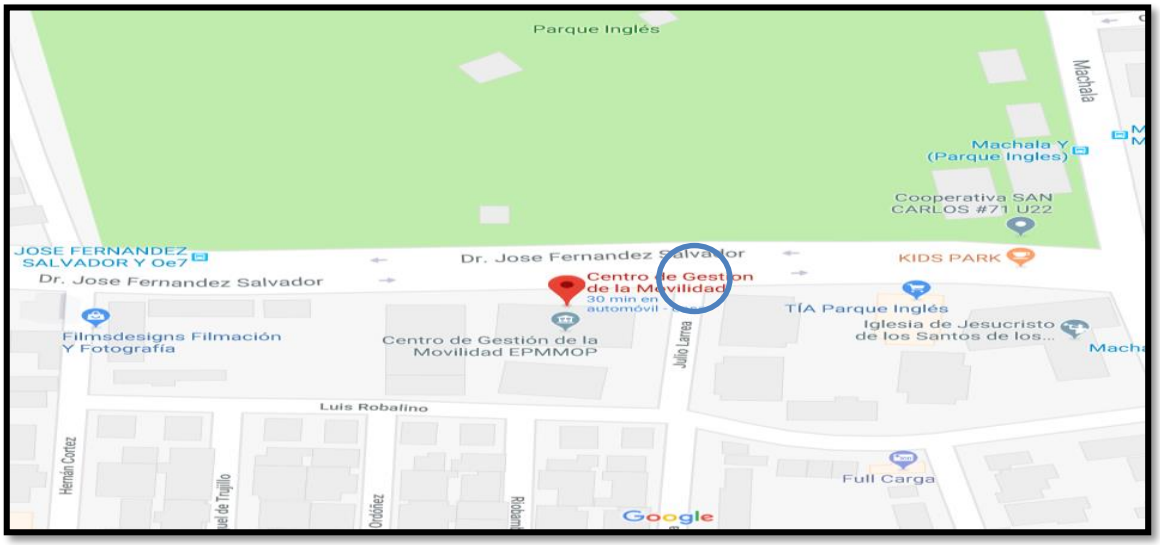


Figura 2-2 Ubicación de las Calles Dr. José Fernández Salvador y Julio Larrea.

Nota. Fuente: Google Maps. https://www.google.com/maps/place/Parque+Ingl%C3%A9s/@-0.1335967,-78.4992472,20.3z/data=!4m5!3m4!1s0x91d5853f35f7317f:0xddd5b9f145ff0e57!8m2!3d-0.1324522!4d-78.4989901
Imagen editada por Belen Morante

2.2 Demolición de la carpeta asfáltica

La obtención del pavimento fresado (RAP) se realiza a partir de cortes sobre la carpeta asfáltica usando una excavadora o retroexcavadora. Este proceso se realiza para parchar áreas pequeñas de la carpeta asfáltica. El proceso de remoción de la carpeta asfáltica da como resultado el material fresado; este proceso, debe ser controlado para evitar contaminarse con otros materiales. Si el material se llega a contaminar con las capas inferiores de la estructura del pavimento, se recomienda triturar de nuevo el material fresado y usarlo como material base en una mezcla asfáltica.

El material que se obtuvo para el presente trabajo de tesis fue a partir de una mini- fresadora. Este proceso permitió parchar pequeñas zonas, evitando dañar las áreas adyacentes a las fallas sobre la carpeta asfáltica.

Las etapas de fresado del material serán representadas esquemáticamente en el siguiente esquema en la Figura 2.3.

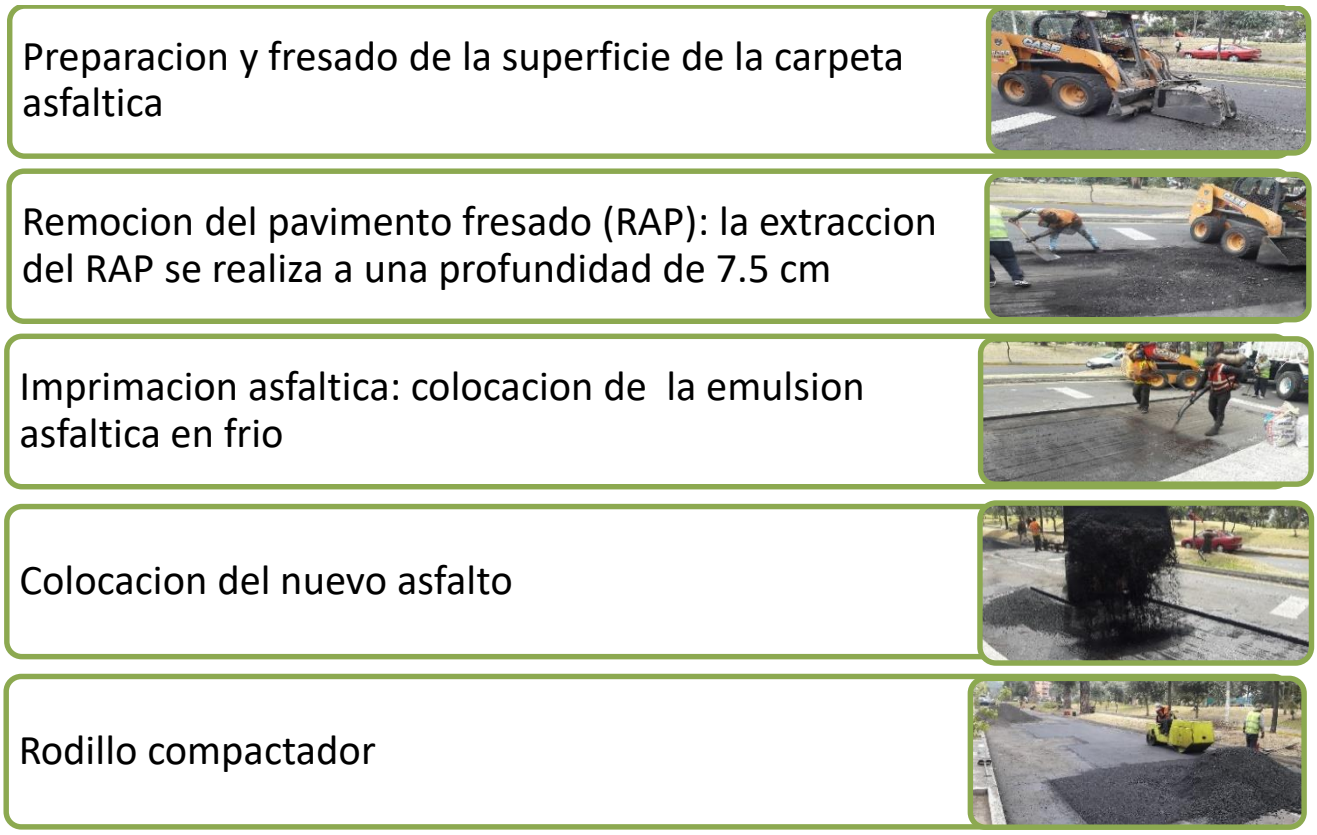


Figura 2-3 Diagrama de flujo del proceso de Fresado de Pavimento Asfaltico

El Manual NEVI-12 Volumen 6 en el Capítulo 6.112.8 “Fresado de Pavimento Asfaltico” establece ciertos parámetros que el constructor deberá cumplir para garantizar el proceso de fresado de pavimento asfaltico, los cuales fueron realizados adecuadamente en los dos sitios de toma de muestras para el trabajo de investigación. Por lo que cumplen con los parámetros establecidos.

3. CAPITULO III: NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)

Los neumáticos fuera de uso (NFU) provienen de las llantas de vehículos pesados y livianos, los cuales después de cumplir con su vida útil son desechados. El proceso de desecho de estos neumáticos aún carece de un control adecuado, en la mayoría de casos son desechados en rellenos sanitarios, en vertientes de agua y en algunos casos son quemados (Castro, 2007).

En Ecuador para contrarrestar esta problemática el Sistema Ecuatoriano de Gestión Integral de Neumáticos Usados (SEGINUS), constituido por empresas que conforman el 80% del mercado de neumáticos en el país ha empezado un proceso para desechar adecuadamente los neumáticos fuera de uso. De tal forma que al transformarlas en gránulos triturados estos puedan emplearse para fabricar nuevos productos o para usarlas en la fabricación de pavimentos asfalticos modificados (El Universo, 2018; Ministerio del Ambiente, 2017a).

3.1 Composición de los neumáticos

Un neumático está diseñado artificialmente por lo que contiene productos químicos, caucho, acero y tela. La composición de los neumáticos varía dependiendo del tipo de vehículo (pesado o liviano), número de pasajeros y metodología de fabricación (Castro, 2007; Diaz & Castro, 2017).

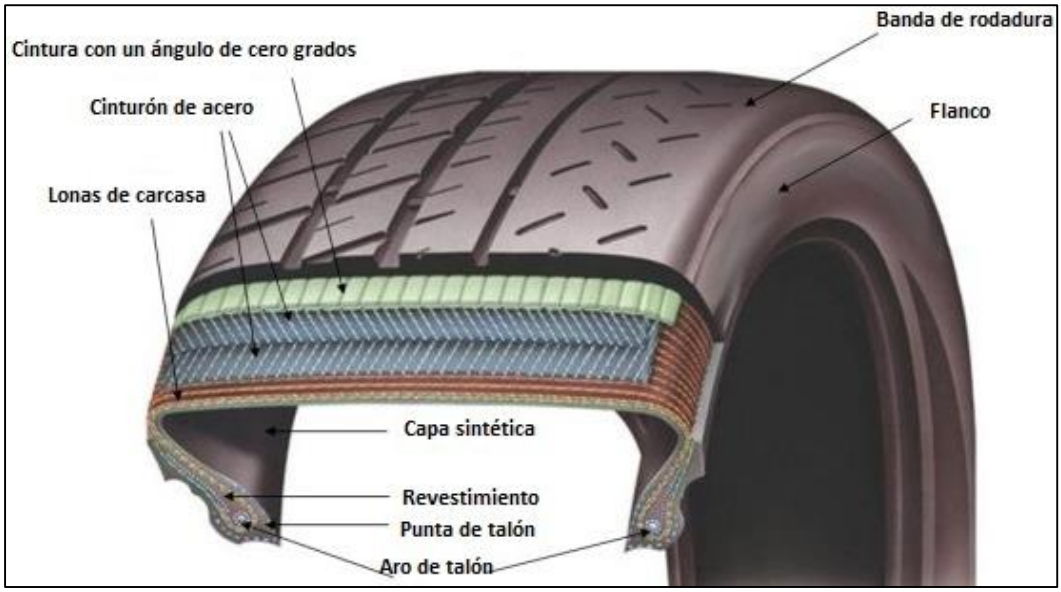


Figura 3-1 Estructura de los neumáticos (OPONEO.ES, 2015)

Nota. Fuente: https://www.oponeo.es/img/es-articulos/fotos/estructura-componentes-neumaticos.jpg

Sin embargo, los componentes básicos que contiene un neumático son los mismos y se proporcionan en las mismas cantidades. En la Tabla 1 se detallarán los componentes y porcentajes de cada material (Bukowski, 2014).

Componentes	Rango Típico
Caucho Natural	14-27%
Caucho Sintético	14-27%
Carbón negro	28%
Acero, fibra	14-15%
Aceites de procesamiento	16-17%

Tabla 3-1 Componentes básicos de los neumáticos

Estos componentes básicos serán mejor representados en la figura 7.

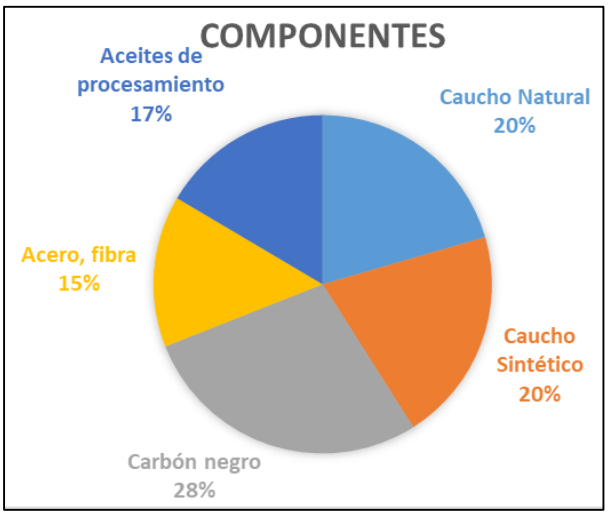


Figura 3-2 Componentes básicos de los neumaticos

Anteriormente, se creía que diferentes tipos de neumáticos o diferentes partes de los neumáticos producían mejor material para ser mezclados con el asfalto. Sin embargo, con la modernización de la fabricación de los neumáticos hay una diferencia mínima entre los neumáticos para camiones de transporte pesado y los vehículos livianos.

Existen ligeras variaciones en el porcentaje de caucho sintético y natural, pero estos porcentajes no causarían diferencias en el rendimiento del asfalto modificado con el granulo de caucho triturado de neumáticos fuera de uso (NFU) (Castro, 2007).

Aproximadamente el 80% de los componentes originales de los neumáticos permanecen al final de su vida útil. La teoría para reducir, reusar y reciclar es un proceso que aún se sigue perfeccionando por lo que será necesario seguir realizando investigaciones y ensayos en laboratorio que permitan buscar alternativas viables para los componentes de las llantas (Bukowski, 2014; Kanta, 1999).

3.1.1 Composición química de los neumáticos

Los componentes químicos que constituyen los neumáticos están representados en la siguientes Tabla 2. Los componentes químicos serán valorados en porcentajes (Kanta, 1999).

Elementos	Protector (%)	Armazon (%)
Carbono (C)	88,30	70,10
Hidrogeno (H)	7,20	7,70
Azufre (S)	1,64	1,30
Hierro (Fe)	-	18,57
Otros	2,86	2,33

Tabla 3-2 Composición básica de los neumáticos

3.1.2 Carbón negro o humo negro

El humo negro al combinarse con el caucho, aumenta sustancialmente la dureza y la durabilidad del neumático. La característica de desgaste del caucho reforzado con carbón negro es una función del tamaño de la partícula, y la capacidad de resistir el desgaste varia inversamente con el tamaño de partícula (cuanto más finas son las partículas, mejores son las propiedades que aporta al refuerzo del caucho) (Arun & Ganesh, 2013; Kanta, 1999).

El tamaño de partícula se mide por grado numérico, en nanómetros (nm). El grado más grande de carbón negro o humo negro tiene un tamaño de partícula inferior a 20 nm y se denomina como horno de súper abrasión (Kanta, 1999).

La industria del caucho es el mayor consumidor de humo negro, mientras que la mayor cantidad de carbono negro se usa en neumáticos para vehículos. El humo negro que se recupera de la planta de reciclaje de neumáticos esté libre de hidrocarburos. Al momento de obtenerse las muestras se comprueba que no tengan un aspecto oleoso u olor residual de residuo de hidrocarburo. El humo negro tiende a ser muy granular y tiene una gran densidad aparente (Kanta, 1999).

El humo negro al incorporarse a las mezclas asfálticas permite aumentar las propiedades de refuerzo y disminuye el envejecimiento en el asfalto.

Los componentes químicos del humo negro serán enlistados en la Tabla 3, a través de la técnica Plasma Acoplado Inductivamente (ICP: Inductively Coupled Plasma) (Kanta, 1999).

La obtención de los metales a través de la técnica Plasma Acoplado Inductivamente (ICP: Inductively Coupled Plasma) permite determinar el contenido de ceniza/contaminantes (ASTM D 482) e identificar los contaminantes presentes. La técnica Plasma Acoplado Inductivamente permite determinar y cuantificar la mayor parte de los diferentes elementos químicos de la muestra de humo negro (Arun & Ganesh, 2013).

Metales por plasma acoplado inductivamente (ICP)	ppm	Metales por plasma acoplado iductivamente (ICP)	ppm
Aluminio	205	Molibdeno	6
Antimonio	<1,0	Niquel	56
Arsenico	<1,0	Fosforo	210
Bario	16	Potasio	301
Berilio	<1,0	Selenio	<1,0
Bismuto	<1,0	Silicio	1960
Boro	16	Plata	<1,0
Cadmio	<1,0	Sodio	330
Calcio	9333	Estroncio	<1,0
Cromo	40	Talio	<1,0
Cobalto	<1,0	Bronce	2
Cobre	44	Titanio	962
Hierro	1600	Vanadio	26
Plomo	69	Zinc	45,866
Magnesio	533	Contenido de ceniza, ASTM D 482, % en peso	8,12

Tabla 3-3 Composición química del humo negro

La fabricación de los neumáticos debe contener menos del 5% en peso de impurezas. Si no se llega a cumplir con esta especificación el carbón negro puede ser tratado, para mejorar la calidad como su valor (Takallou & Takalluo, 2013).

3.2 Métodos actuales para la eliminación de neumáticos fuera de uso (NFU)

La reutilización de los neumáticos fuera de uso (NFU) ha sido un proceso que se ha ido incorporando recientemente en Ecuador. Por lo que los productos que se puedan obtener de la reutilización de los neumáticos se podría ampliar en el mercado nacional; pero si consideramos que dichos mercados alcancen su máximo potencial de aprovechamiento de los neumáticos usados, aun existirían neumáticos usados que serían desechados de manera inadecuada. La cantidad de neumáticos generados cada año continuaría excediendo la demanda de neumáticos usados (Armas & Baño, 2013; El Telegrafo, 2018; Ministerio del Ambiente, 2017a).

Los métodos actuales que se utilizan para la eliminación de los neumáticos fuera de uso son vertedero, rencauchado, incineración y trituración (Castro, 2008).

El proceso de rencauchado aun cubre solo una pequeña parte de reutilización de los neumáticos fuera de uso. La construcción de carreteras con pavimento asfaltico tiene un mayor potencial para la demanda del grano de caucho triturado de los neumáticos fuera de uso, a través del proceso de trituración (Castro, 2007).

3.2.1 Vertedero

El 50% de los neumáticos fuera de uso se utilizan para vertederos. Un pequeño porcentaje de estos neumáticos son utilizados con fines adecuados para la construcción de vertederos (Castro, 2007).

El manejo inadecuado de los neumáticos en vertederos es que al ser enterrados pueden causar incendios, los cuales son difíciles de controlar debido a los compuestos volátiles que en ocasiones están presentes en los rellenos sanitarios (Oke, 2010; Sorgato, 2016).

3.2.2 Rencauchado

El proceso de rencauchado de los neumáticos es costoso y representa un mayor uso de mano de obra. Además, el porcentaje de neumáticos aptos para realizar este proceso es muy bajo. Por lo que no es un proceso recomendado (Pennington, 1996).

3.2.3 Incineración

El uso de neumáticos para la generación de energía eléctrica a través de la incineración de los neumáticos es un proceso que en Ecuador aún no se ha desarrollado (Pennington, 1996).

La eliminación de los neumáticos a través de incineración es un proceso que contamina el aire y genera residuos que son difíciles de eliminar. Este proceso no se recomienda.

3.2.4 Trituración

La trituración de los neumáticos para convertirlos el granulo de caucho es un proceso que requiere cortar en planchas al neumático para poder procesarlo, y obtener como producto final el granulo de caucho (Pennington, 1996). Este granulo dependiendo de su granulometría puede ser utilizado con diferentes aplicaciones como:

- Bloques de caucho para pisos
- Planchas de caucho
- Fabricación de nuevos neumáticos
- Manufactura de señalización horizontal: topes, divisores y reductores de velocidad.
- Producción de pavimento asfaltico modificado

Este método es el más efectivo para el reciclaje de los neumáticos fuera de uso (NFU), ya que no causa o genera otro problema de contaminación (Diaz & Castro, 2017; Viviendo en la Tierra, 2018).



Figura 3-3 Ciclo GRIN (Gestión y Reciclaje Integral de los Neumáticos) (Viviendo en la Tierra, 2018)

Nota. Fuente: https://verdeporquetequieroverde.files.wordpress.com/2018/02/schermata-2018-02-06-alle-12-18-26.png

4. CAPITULO IV: OBTENCIÓN DEL GRANO DE CAUCHO TRITURADO

El Sistema Ecuatoriano de Gestión Integral de Neumáticos Usados (Seginus), estima que se desechan anualmente 2.4 millones de neumáticos, de los cuales el 95% de los materiales pueden ser aprovechados (El Universo, 2018).

El caucho obtenido a través del proceso mecánico de trituración fue donado por el gestor en reciclaje de los Neumáticos Fuera de Uso (NFU), **Rubberaction Cia. Ltda.** Este gestor ambiental realiza el procesamiento de trituración de 20.000 NFU por mes, para obtener dos productos de los Neumáticos Fuera de Uso (NFU); lo cuales son: grano de caucho (1-4 mm) y polvo de caucho.

Las especificaciones del polvo del caucho (Tamiz N°20) permiten usarlos como materia prima para fabricar nuevos productos, tales como: bloques de caucho para pisos de protección o aislamiento, asfalto modificado y moquetas para vehículos (Instituto Ecuatoriano de Normalizacion, 2013).



Foto 4-1 Polvo de Caucho (Tamiz No.20)

El grano de caucho (Tamiz N°8 a Tamiz N°18), en base a sus especificaciones se utiliza como materia prima para canchas sintéticas, planchas de caucho para pisos, durmientes para líneas férreas y piezas para automóviles (Bukowski, 2014).



Foto 4-2 Grano de Caucho (1-4 mm)

4.1 Ubicación de la empresa Rubberaction

La empresa **Rubberaction Cia. Ltda.** Se encuentra ubicada en la parroquia rural de Yaruqui del Distrito Metropolitano de Quito, a 2 ½ km al Norte del Colegio Técnico "Yaruqui".

Su acceso es en una vía empedrada, ingresando a la Hacienda Santa Teresita.



*Figura 4-1 Ubicación de la Planta **Rubberaction Cia.Ltda.***

Nota. Fuente: Google Maps. https://www.google.com/maps/@-0.1447957,-78.3153168,15z

Imagen editada por Belén Morante

4.2 Proceso de trituración de los neumáticos fuera de uso (NFU) y producción del grano de caucho.

La producción del grano de caucho y polvo de caucho, se realiza a través de la trituración de los neumáticos fuera de uso (NFU). Previo a realizar el proceso de trituración los neumáticos se clasifican en dos grupos: neumáticos para ser reencauchados y neumáticos para ser triturados. Su clasificación dependerá del desgaste que tengan (Castro, 2007; Diaz & Castro, 2017).

Los neumáticos se trituran en un molino, se retira la fibra textil y se elimina la presencia de partículas ferrosas, a través de un imán. Las características y especificaciones del grano de caucho y del polvo de caucho, deberán ser evaluadas con las especificaciones de la Norma INEN 2680:2013 (Instituto Ecuatoriano de Normalizacion, 2013).

La empresa **Rubberaction Cia. Ltda** realiza cinco procesos importantes previo al reciclaje de los neumáticos fuera de uso (NFU), los cuales son:

- Localización
- Recolección
- Traslado
- Reciclaje
- Asignación



Figura 4-2 Recuperación y Asignación de Neumáticos Fuera de Uso (Cloud, 2016)

Nota. Fuente: https://prezi.com/1zhjvztgalwg/contactos/
Imagen editada por Belén Morante

Estos procesos se ejecutan en cumplimiento con el Plan Integral de Gestión de los Neumáticos Fuera de Uso (NFU), permitiendo ejecutar una gestión integral de la recolección y reutilización de los neumáticos (Ministerio del Ambiente, 2017b).

4.2.1Reciclaje de Neumáticos Fuera de Uso (NFU)

El proceso de reciclaje de los neumáticos, tiene varios subprocesos que permiten obtener el grano y polvo de caucho. A continuación, se detallará los procesos que se realizan en la empresa **Rubberaction Cia. Ltda.**

Recepción de Neumáticos Fuera de Uso (NFU)



Cortes laterales en las llantas

- Se corta el flanco de llanta, para facilitar la obtención del cinturón de acero o malla de acero



Extracción del cinturón o malla de acero

- La extracción del cinturón o malla de acero, se lo puede realizar a través de la destalonadora o por corte de tiras de las llantas



Cizallamiento

- La llanta es cortada por la mitad. Se facilita el proceso de trituración en los molinos
- Si la extracción de la malla de acero se lo realiza a través de la destalonadora, es necesario ejecutar el proceso de cizallamiento



Trituración

- Al realizar el proceso de cizallamiento se debe lavar la llanta, para proceder a triturarla.
- Este proceso se lo ejecuta en una trituradora de un eje.



Molinos

- En esta etapa el caucho triturado o picado, se transformara en grano de caucho (1-4 mm) o en polvo de llanta (Tamiz No.20).



Ciclón

- Proceso final que permite la separación de partículas ferrosas y fibra. Permite que el producto final sea mas refinado.



Figura 4-3 Diagrama de flujo del proceso de reciclaje de neumáticos fuera de uso (NFU)

5. CAPITULO VI: EVALUACION DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO FRESADO (RAP)

El pavimento asfaltico está constituido por varias capas de agregados, aglutinantes asfalticos y, en ocasiones, aditivos especiales. La función principal de la estructura del pavimento es soportar cargas de vehículos y transferirlas a cada capa, de manera que, las cargas se distribuyan equitativamente. Además, deberán resistir los efectos climáticos adversos (Chicaiza, 2013; Javier, 2013; Miró et al., 2007; Thenoux & García, 2011).

Durante la vida útil y uso de la estructura del pavimento, se produce el proceso de deterioro debido a diferentes causas y pueden suceder durante diferentes periodos de tiempo. En base a estudios realizados, en función a las condiciones de tráfico y condiciones ambientales, se puede establecer un patrón predecible del deterioro del pavimento asfaltico (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2001f, 2001e; Chicaiza, 2013; McDaniel, Soleymani, & Shah, 2002).

Una evaluación inicial de la carpeta asfáltica permite determinar, que proceso debe ejecutarse para realizar el reciclaje o si es necesario la utilización de nuevos materiales aglutinantes y agregado (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2001e). La selección de un proceso de rehabilitación incluye los siguientes parámetros:

- Evaluación visual de asentamientos de la superficie del pavimento
- Historia de la vía
- Evaluación de las propiedades del pavimento
- Ensayo de fatiga
- Selección preliminar del proceso de rehabilitación
- Análisis económico
- Diseño detallado del proyecto

5.1 Evaluación del pavimento

La evaluación del pavimento existente en la vía permite determinar el método de reciclaje y recuperación adecuado en base a la inspección visual que se ejecute. Las principales irregularidades que se encuentran en la superficie del pavimento, son producidas por fatiga. Por lo que es necesario evaluar tipo, severidad y frecuencia (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2001e).

5.1.1 Defectos de la superficie de rodadura

Los defectos de la superficie del pavimento están relacionados principalmente con los materiales y deficiencias constructivas; además, del tráfico y condiciones climáticas (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2001e; ASTM International, 2018).

La Norma ASTM D6433-11 detalla 19 tipos de fallas en la superficie de la estructura del pavimento. En la presente investigación solo se detallarán las más comunes y aquellas presentes en la Av. Napo y Granada (ASTM International, 2018).

5.1.1.1 Piel de Cocodrilo

Fisuras producidas por fatiga de la mezcla asfáltica, debido a cargas de tráfico. Este tipo de fisuras se generan inicialmente en la parte inferior de la superficie o base estabilizada, debido a que los esfuerzos por tensión, carga de las ruedas, son superiores (ASTM International, 2018).



Foto 5-1 Piel de Cocodrilo

5.1.1.2 Fisuras en bloque

La diferencia entre las fisuras en bloque y piel de cocodrilo, es que este tipo de fisuras se interconectan. Formándose piezas rectangulares en la superficie del pavimento, que no están asociadas con la carga de las ruedas (ASTM International, 2018).

Estas fisuras son producidas por la retracción de la mezcla asfáltica y los ciclos variables de temperatura del ambiente. Se generan esfuerzos y deformación en ciclo diarios (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2001f).



Foto 5-2 Fisuras en bloque

5.1.1.3 Fisura Longitudinal y Transversal

Las fisuras longitudinales y trasversales pueden ser producidas por la inadecuada construcción de juntas, retracción de la carpeta asfáltica (cambios de temperatura) y debido a fisuras bajo la superficie de la capa de rodadura. Este tipo de fallas no se asocian con la carga de las llantas (ASTM International, 2018).



Foto 5-3 Fisura longitudinal y transversal

5.1.1.4 Desgaste de la Superficie

La superficie de rodadura del pavimento se envejece, se pierde agregado fino y se puede observar los bordes del agregado grueso. Si existe desprendimiento del agregado grueso se clasificará como falla por Desprendimiento de Agregados (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2001e; ASTM International, 2018).



Foto 5-4 Desgaste de la superficie

6. CAPITULO VII: METODOS DE RECICLAJE PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES

La implementación de tratamientos preventivos y de mantenimiento más oportunos o proactivos en pavimentos asfalticos se está utilizando como un medio para preservar la infraestructura vial existente; permitiendo aumentar la serviciabilidad de todas las capas que constituyen la estructura de la calzada.

El reciclaje de mezclas asfálticas, se entiende como la reutilización de la carpeta asfáltica o de un material que conforma el pavimento flexible. La reutilización se lo realiza después de ejecutar un tratamiento al material; se pueden emplear como refuerzo de la carretera o como una capa para la construcción de una calzada nueva.

La reutilización de los pavimentos flexibles, permite desarrollar factores ambientales y económicos positivos para la construcción y rehabilitación de las vías (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2001a). De acuerdo a la Asociación de Reciclado y Recuperación de Asfalto (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, ARRA), se clasifican en cinco categorías el reciclado de pavimentos asfalticos:

- Fresado en Frio (Cold Planing, CP)
- Reciclado en Caliente (Hot Recycling)
- Reciclado en Caliente In Situ (Hot In-Place Recycling, HIR)
- Reciclado en Frio (Cold Recycling, CR)
- Recuperación Full Depth (Full Depth Reclamation, FDR)

Estas cinco categorías, incluyen un número de sub categorías, que definen aún más el reciclaje de los pavimentos asfalticos flexibles (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2001a). Estos incluyen:

- Reciclado en Caliente In Situ (Hot In-Place Recycling, HIR)
  - Reciclaje Superficial (Reparación Superficial)
  - Remezclado
  - Repavimentación

- Reciclado en Frio (Cold Recycling, CR)
  - Reciclado en Frio In-Situ (Cold In-Place Recycling, CIR)
  - Reciclaje en Planta en Frio (Cold Central Plant Recycling, CCPR)

- Recuperación Full Depth (Full Depth Reclamation, FDR)
  - Pulverización
  - Estabilización Mecánica
  - Estabilización Bituminosa
  - Estabilización Química

Además, los métodos de reciclaje de asfalto se pueden utilizar conjuntamente en algunos proyectos de rehabilitación de carreteras. Alternativamente, antes de colocar la mezcla reciclada, la superficie de CP expuesta podría haber sido HIR, CIR o FDR para mitigar o eliminar los efectos del agrietamiento por reflexión. En la presente investigación se realizaron dos procesos: Fresado en Frio (Cold Planing, CP) y Reciclado en Frio (Cold Recycling, CR) (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2001a).

El proceso de mantenimiento vial que se ejecutó en la Av. Napo y Granada fue la sustitución de material virgen con emulsión asfáltica, mezcla cerrada en frio. De tal forma, que el pavimento fresado (RAP), fue descartado para ser usado en el de bacheo que se realizó.

Las características del pavimento fresado ubicado en la Av. Napo, cumplían con los requerimientos y especificaciones del MOP- 001-F 2002 Capitulo 4 "Estructura del Pavimento" y del Basic Asphalt Recycling Manual del "ARRA" (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2001b; Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002). Concluyendo que podría reutilizarse, en conjunto con la emulsión asfáltica o con el betún asfaltico. Sin embargo, debido al desconocimiento de la ejecución de Métodos de Reciclaje para carpetas asfálticas, se utilizó la mezcla mencionada anteriormente.

En el presente trabajo de investigación se plantea el Reciclaje en Frio (CR), aplicando la sub categoría Reciclaje en Frio In Situ (CIR); para la reutilización del Pavimento Fresado (RAP) en conjunto con emulsión asfáltica y grano de caucho de neumáticos fuera de usos (NFU) (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2001d; Montejo, 2008a).

7. CAPITULO V: CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES

La evaluación de las características físicas y mecánicas del Pavimento Fresado (RAP), proporcionan la información requerida para la adición de emulsión asfáltica o asfalto.

El Manual Básico de Emulsiones Asfálticas MS N°19 determina los ensayos que se deben ejecutar a los pavimentos indicados para el reciclaje de carpetas asfálticas (Instituto del Asfalto, 2005b).

Tabla 7-1 Ensayos para materiales reciclados en frio

Nota. Fuente: Asphalt Institute. (2005). Manual Básico de Emulsiones Asfálticas MS N°19 (p.89. Tabla 9.1). USA.

Tabla 9.1 Procedimientos de Evaluación de Materiales – Reciclado en Frío y Recuperación Full-Depth

Características	Método de ensayo	
	ASTM	AASHTO
Contenido de asfalto de una mezcla asfáltica vial	D 2172	T 164
Asfalto recuperado de una mezcla asfáltica vial	D 1856	T 170
Tamizado de agregados finos y gruesos	C 136	T 27
Porcentaje de material menor de 75 mm (tamiz Nº 200) mediante tamizado vía húmeda	C 117	T 11
Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad del suelo	D 4318	T 89/90
Equivalente de arena de suelo o agregado	D 2419	T 176
Penetración de materiales bituminosos	D 5	T 49
Viscosidad del asfalto mediante viscosímetro capilar por vacío	D 2171	T 202

En el presente capítulo se presentarán los ensayos ejecutados en el pavimento fresado, emulsión asfáltica y grano de caucho. Los materiales evaluados, deberán cumplir con las especificaciones nacionales MOP 001 F 2002, INEN y el Manual NEVI-12 Volumen 6 en el Capítulo 6.112.2 “Recuperación de Pavimentos con Emulsiones Asfálticas” (Instituto del Asfalto, 2005b; Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002, 2013b). Además, se deberá cumplir con las normativas internacionales Manual Básico de Emulsiones Asfálticas MS N°19, normas AASHTO y ASTM.

7.1 Ensayos en el pavimento fresado (RAP)

7.1.1 Contenido de asfalto residual: ASTM D2172M, ASTM D6307-16

El contenido de asfalto residual o porcentaje de bitumen que está presente en las muestras del pavimento fresado puede ser determinado a través de los siguientes métodos normados:

- Determinación del contenido de asfalto a través de la extracción cuantitativa de mezclas de pavimento bituminoso (Centrífuga): ASTM D2172 M
- Determinación del contenido de asfalto residual con horno de ignición: ASTM D6307-16

Las muestras obtenidas en la Av. Napo y Granada y de las Calles Dr. José Fernández Salvador y Julio Larrea, fueron ensayadas a través del Método de Horno de Ignición ASTM D6307-16. Se tomaron dos muestras por cada punto de extracción del fresado.

Foto 7-1 Ensayo de Ignición Av. Napo y Granada



Foto 7-2 Ensayo de ignición Calles Dr. José Fernández Salvador y Julio Larrea



El pavimento fresado (RAP) obtenido de los dos puntos de la ciudad, Av. Napo y Granada y de las Calles Dr. José Fernández Salvador y Julio Larrea, tienen un promedio de asfalto residual de 6.50% y 10.39% respectivamente.

Por lo tanto, para el diseño de la mezcla asfáltica del presente trabajo de investigación se utilizó el pavimento fresado (RAP) de la Av. Napo y Granada, con un porcentaje de asfalto residual presente de 6.50%.

7.1.2 Granulometría: ASTM D421, ASTM D422

La gradación del agregado afecta las propiedades y características de las mezclas asfálticas, como: durabilidad, permeabilidad, resistencia y estabilidad. Es importante en el diseño de la nueva mezcla asfáltica (Instituto del Asfalto, 2001b; Yanez, 2006).

La granulometría de los agregados permite conocer el tamaño de partículas, a través del peso que retiene la serie de tamices. El cual será representado en porcentaje que pasa, para ser graficado en una curva granulométrica.

La granulometría del pavimento fresado permitirá determinar si cumple con los parámetros establecidos en el MOP 001 F 2002, Manual Básico de Emulsiones Asfálticas MS N°19 y Manual NEVI-12 Volumen 3 en la Sección 811-5 "Agregados para mezclas asfálticas en frio" (Instituto del Asfalto, 2001b; Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002, 2013a). Los parámetros establecidos, así como los requisitos están indicados en las siguientes tablas:

Tabla 7-2 Agregados para mezclas granulométricas cerradas con emulsión

Nota. Fuente: Asphalt Institute. (2005). Manual Básico de Emulsiones Asfálticas MS N°19 (p.76. Tabla 7.2). USA.

Tabla 7.2 Agregados para Mezclas, con Emulsion, de Granulometria Cerrada

Tamaño del tamiz	Mat. semi-procesado de trituración, de cantera o de río	Granulometrías para Mezclas Asfálticas Cerradas, porcentaje pasante en peso				
50 mm (2 pulg.)	–	100	–	–	–	–
37.5 mm (1-1/2 pulg.)	100	90-100	100	–	–	–
25.0 mm (1 pulg.)	80-90	–	90-100	100	–	–
19.0 mm (3/4 in)	–	60-80	–	90-100	100	–
12.5 mm (1/2 pulg.)	–	–	60-80	–	90-100	100
9.5 mm (3/8 pulg.)	–	–	–	60-80	–	90-100
4.75 mm (No. 4)	25-85	20-55	25-60	35-65	45-70	60-80
2.36 mm (No. 8)	–	10-40	15-45	20-50	25-55	35-65
1.18 mm (No. 16)	–	–	–	–	–	–
600 µm (No. 30)	–	–	–	–	–	–
300 µm (No. 50)	–	2-16	3-18	3-20	5-20	6-25
150 µm (No. 100)	–	–	–	–	–	–
75 µm (No. 200)	3-15	0-5	1-7	2-8	2-9	2-10
Equivalente de arena, en%	min. 30	min. 35	min. 35	min. 35	min. 35	min. 35
Ensayo Los Angeles, @500 rev.	–	máx. 40	máx. 40	máx. 40	máx. 40	máx. 40
Porcentaje de caras trituradas	–	mín. 65	mín. 65	mín. 65	mín. 65	mín. 65

Tabla 7-3 Granulometría para mezclas asfálticas

Nota. Fuente: MOP-001-F 2002. (2002). Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes (p.299. Tabla 405-5.1.). Ecuador

Tabla 405-5.1.

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	¾"	½"	3/8"	N°4
1" (25.4 mm.)	100	--	--	--
¾" (19.0 mm.)	90 - 100	100	--	--
½" (12.7 mm.)	--	90 - 100	100	--
3/8" (9.50 mm.)	56 - 80		90 - 100	100
N° 4 (4.75 mm.)	35 - 65	44 - 74	55 – 85	80 - 100
N° 8 (2.36 mm.)	23 - 49	28 - 58	32 – 67	65 - 100
N° 16 (1.18 mm.)	--	--	--	40 - 80
N° 30 (0.60 mm.)	--	--	--	25 - 65
N° 50 (0.30 mm.)	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7 - 40
N° 100 (0.15 mm.)	--	--	--	3 - 20
N° 200 (0.075 mm.)	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10

Tabla 7-4 Agregados de gradación densa para mezclas asfálticas (Diseño Marshall)

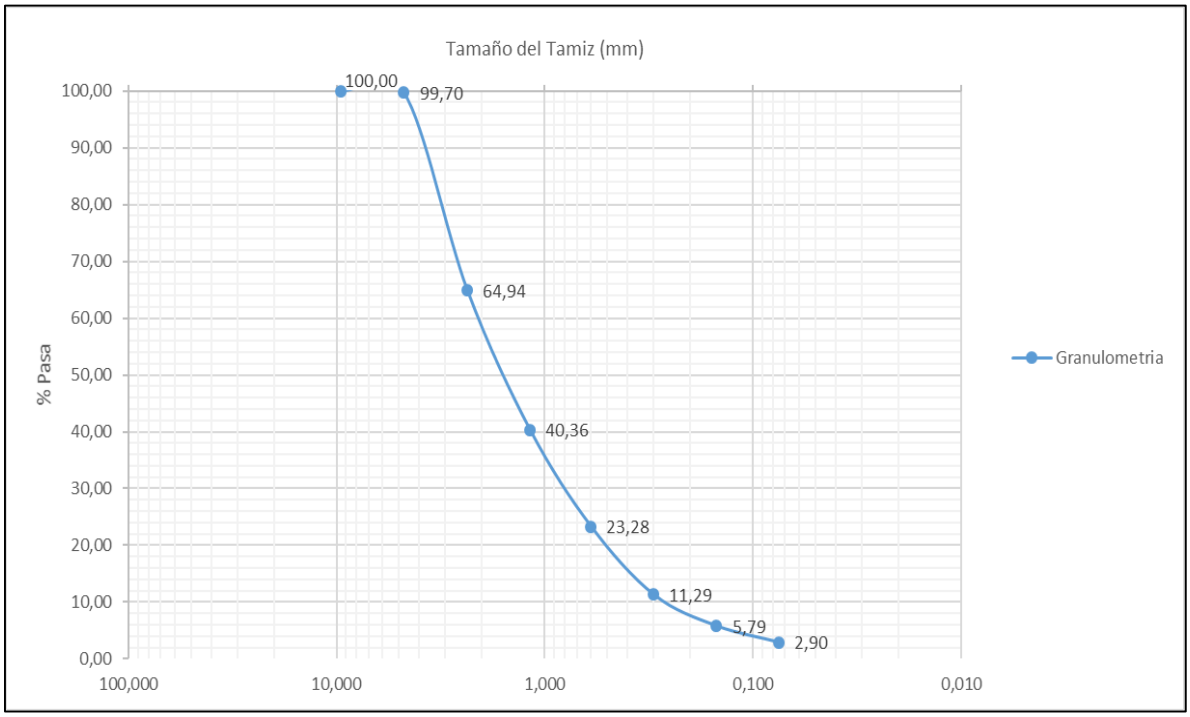
Nota. Fuente: Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2013). Volumen N°3 Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes (p.906. Tabla 811-4.4). Ecuador.

Tabla 811-4.4 Requisitos de Graduación para Agregados en Mezclas Asfálticas Densas (Marshall)

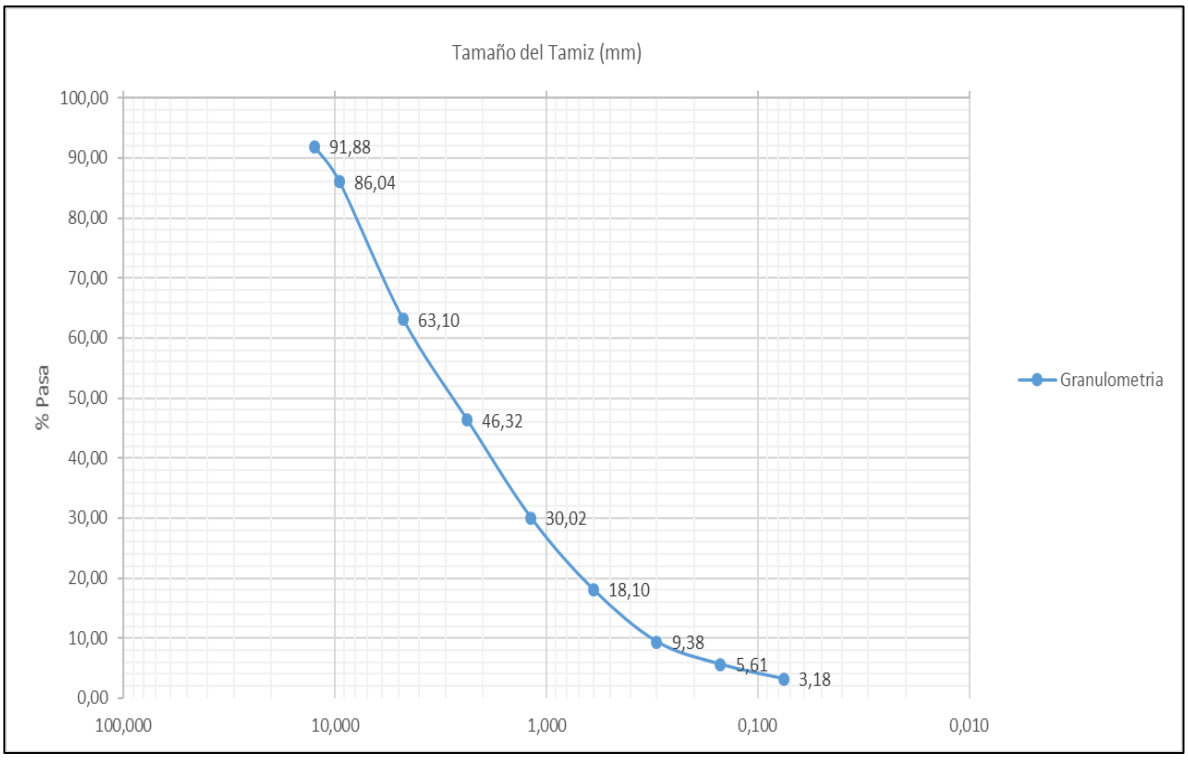
Tamaño Tamiz [mm]	Tamaño Nominal Máximo del Agregado [mm]			
	19.0	12.5	9.5	4.75
	Material más fino que cada tamiz (malla cuadrada), % que pasa en peso			
25.0	100			
19.0	90 a 100	100		
12.5		90 a 100	100	
9.5	56 a 80		90 a 100	100
4.75	35 a 65	44 a 74	55 a 85	80 a 100
2.36	23 a 49	28 a 58	32 a 67	65 a 100
1.18				40 a 80
0.6				25 a 65
0.3	5 a 19	5 a 21	7 a 23	7 a 40
0.15				3 a 20
0.075	2 a 8	2 a 10	2 a 10	2 a 10

El pavimento fresado (RAP) obtenido de la Av. Napo y Granada, fue dividido en agregado fino, intermedio y grueso. Para poder tener una curva granulométrica que cumpla con las especificaciones del Manual NEVI-12, MOP-001-F 2002 y con el Manual Básico de Emulsiones Asfálticas MS N°19. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

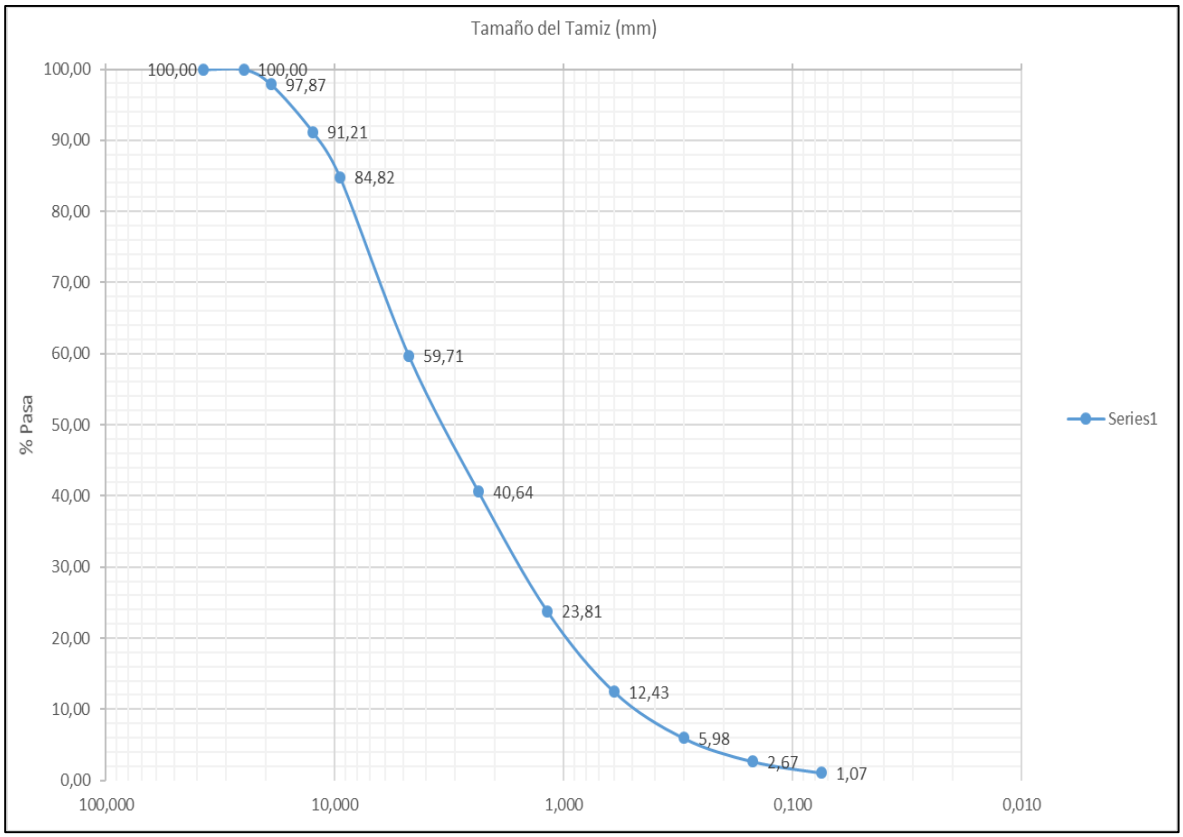
Grafica 7-1 Curva granulométrica del agregado fino N°4



Grafica 7-2 Curva granulométrica del agregado intermedio ½"



Grafica 7-3 Curva granulométrica del agregado grueso ¾"



7.1.3 Gravedad Especifica: ASTM C 128, ASTM C 29

La gravedad especifica permite determinar la relación entre la densidad de los agregados con respecto a la densidad del agua, a una temperatura constante. Los ensayos ejecutados permitieron determinar: gravedad específica, gravedad especifica aparente y absorción de los agregados que estarán presentes en el diseño de la mezcla asfáltica (Yanez, 2006).

Los porcentajes de absorción de los agregados no están delimitados. Sin embargo, se considera que para el agregado grueso de buena calidad el porcentaje de absorción debe ser menor al 3%, mientras que para agregados finos el porcentaje de absorción debe ser menor a 5%

7.1.4 Abrasión del agregado grueso (Maquina de Los Ángeles): ASTM C131

Los agregados varían su resistencia a la fractura producida por impacto (tenacidad) y se descompondrán en partículas más pequeñas al ser sometidas a la abrasión (dureza) (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002; Yanez, 2006).

El ensayo de abrasión del agregado utilizando la Maquina de Los Ángeles (AASHTO T 96) establece ciertos límites para la pérdida del material o degradación, como resultado del impacto y las acciones abrasivas. Los limites varían en el rango del 30% al 50%, dependiendo a la clasificación del agregado grueso (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002).

La Norma INEN 860 “Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37.5 mm mediante el uso de la Maquina de Los Ángeles”, establece ciertos parámetros para la colocación del número de esferas de acero en el tambor, dependiendo de la gradación del agregado grueso. La gradación del agregado ensayado es tipo C (Tamiz N°4), por lo se colocaron 8 esferas de acero.

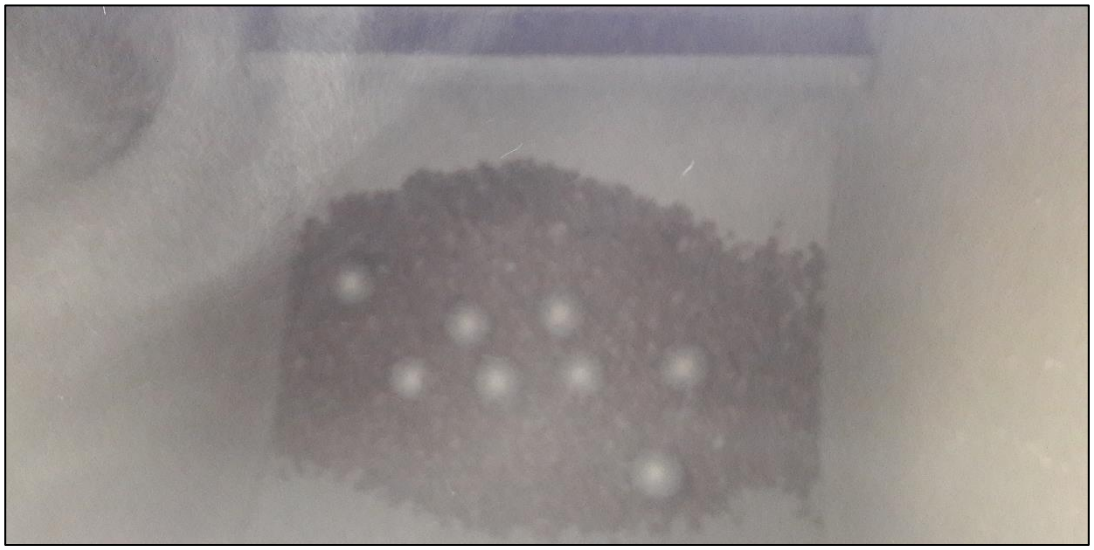


Foto 7-3 Ensayo de abrasión

7.1.5 Desgaste a los sulfatos: ASTM C 88

La resistencia de los agregados a los agentes externos (cambios de T°, gravedad, viento, lluvia, congelamiento) y desgaste químico en formaciones rocosas, es una de las consideraciones más importantes al momento de construir una carretera. El ensayo de desgaste a los sulfatos permite conocer el comportamiento que tendrán los agregados a los cambios abruptos de temperatura (Montejo, 2008a).

7.1.6 Peso Unitario (Densidad Bulk) y Porcentaje de Vacíos: ASTM C 29, INEN 858, INEN 857, INEN 856.

El peso unitario o densidad Bulk nos permite calcular el porcentaje de vacíos presentes en el agregado. Este porcentaje de vacíos es imprescindible al momento de realizar el diseño Marshall (Yanez, 2006).

En el pavimento fresado (RAP), la densidad Bulk se debe calcular para no afectar al diseño (con asfalto o emulsión asfáltica); el principal problema es la capacidad de humectación y absorción del agua, debido al residuo asfaltico presente.

Foto 7-4 Peso unitario agregado fino (Tamiz N°4)



Foto 7-5 Peso unitario agregado grueso (Tamiz 1 ½")



<u>Los siguientes ensayos corresponden al asfalto residual presente en la muestra de pavimento fresado (RAP) de la Av. Napo y Granada.</u>

7.1.7 Contenido de Humedad: INEN 862, ASTM C 566-09

Este método de ensayo nos permite determinar el contenido de agua presente en el agregado. La humedad se puede constituir por la suma de la humedad superficial y la que contiene los poros (Yanez, 2006).

El contenido de humedad se determina a través del agua que se ha evaporado al secarse en el horno a una temperatura de 110 °C ± 5 °C. El contenido de humedad óptimo para mezclas asfálticas con RAP es más alto que para las mezclas convencionales.

7.1.8 Ensayo de Penetración para Cementos Asfalticos: ASTM D5

El ensayo de penetración permite determinar la distancia vertical, se expresa en decimas de milímetros (dmm), que la aguja penetra en el cemento asfaltico. Durante el proceso de ejecución del ensayo se debe controlar la temperatura (T°), peso, distancia horizontal entre puntos y tiempo (Instituto del Asfalto, 2005a; Yanez, 2006).

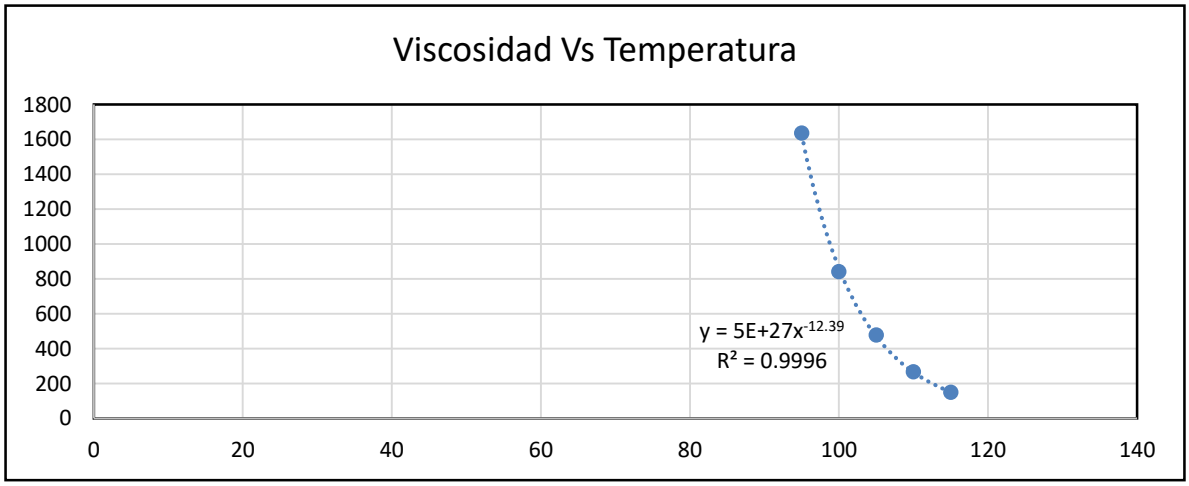
El ensayo de penetración aplicado en el cemento asfaltico recuperado del pavimento fresado, nos permitirá determinar la fluencia. La extracción del cemento asfaltico residual se realizó por el Método de Centrifugación (ASTM D2172 M) y se complementaron con el Método de Rotovapor (ASTM D 1856).

7.1.9 Ensayo de Viscosidad Rotacional: ASTM D4402

El ensayo de viscosidad rotacional en el equipo Brookfield DV-II+ Pro, permite evaluar la manejabilidad del asfalto a temperaturas elevadas. La viscosidad del cemento asfaltico debe ser lo suficientemente fluida, para realizar el bombeo y ejecución de la mezcla bituminosa (Yanez, 2006).

El valor de viscosidad rotacional se determina al medir el torque necesario para mantener la velocidad constante rotacional del vástago cilíndrico, el cual está sumergido en la muestra (Instituto del Asfalto, 2005a; Montejo, 2008a). La temperatura del ensayo de viscosidad es constante. La muestra ensayada fue del asfalto residual presente en el pavimento fresado (RAP) de la Av. Napo y Granada. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Grafica 7-4 Viscosidad Vs Temperatura del asfalto residual recuperado



7.1.10 Resumen de resultados obtenidos del Pavimento Fresado (RAP)

Los datos obtenidos en cada uno de los ensayos serán tabulados a continuación:

Tabla 7-5 Resultados obtenidos del pavimento fresado

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR				
	FACULTAD DE INGENIERIA				
	ESCUELA DE CIVIL				
	RESUMEN DE RESULTADOS				
	PAVIMENTO FRESADO (RAP)				
	ENSAYO	**ESPECIFICACION**	**RESULTADOS**	**UNIDADES**	**ESPECIFICACION**
	Contenido de asfalto residual: Av. Napo y Granada	ASTM D2172 M	6.50%	%	-
	Contenido de asfalto residual: Calles Dr. José Fernández Salvador y Julio Larrea	ASTM D2172 M	10.39%	%	-
AGREGADOS	Gravedad Especifica: Agregado Fino N°4	ASTM C128	2.16	-	-
	Absorción: Agregado Fino N°4	ASTM C128	4.60%	%	-
	Gravedad Especifica: Agregado Grueso 1 1/2"	ASTM C29	2.35	-	-
	Absorción: Agregado Grueso 1 1/2"	ASTM C29	2.82%	%	-
	Abrasión del agregado grueso (Maquina de Los Ángeles): % Perdido	ASTM C131	24.80%	%	Cumple
	Abrasión del agregado grueso (Maquina de Los Ángeles): % Desgaste	ASTM C131	24.44%	%	Cumple
	Desgaste a los sulfatos: Agregado Grueso 3/4"	ASTM C88	3.04%	%	Cumple
	Desgaste a los sulfatos: Agregado Fino N°4	ASTM C88	21.16%	%	No Cumple
	Peso Unitario (Densidad Bulk): Agregado Fino N°4 (Material Suelto)	ASTM C29	1277.88	kg/m3	-
	Peso Unitario (Densidad Bulk): Agregado Fino N°4 (Material Compacto)	ASTM C29	1396.71	kg/m4	-
	Peso Unitario (Densidad Bulk): Agregado Grueso 1 1/2" (Material Suelto)	ASTM C29	1263.74	kg/m5	-
	Peso Unitario (Densidad Bulk): Agregado Grueso 1 1/2" (Material Compacto)	ASTM C29	1375.84	kg/m6	-
	Contenido de Humedad	ASTM C566-09	0.53%	%	-
ASFALTO	Penetración para cementos asfalticos	ASTM D5	5	dmm	-
	Viscosidad rotacional 95°C	ASTM 4402	1637	Ps	-

7.2 Ensayos en el grano de caucho

7.2.1 Contenido de Humedad: INEN 2680, ASTM D1864/D1864M – 89

El contenido de humedad presente en el grano de caucho será determinado a través de una muestra representativa, la cual será sometida a una temperatura de 110 °C. Los resultados obtenidos deberán ser evaluados y comparados con los requisitos de la Norma INEN 2680 (Instituto Ecuatoriano de Normalizacion, 2013).

7.2.2 Contenido de Partículas Ferrosas: INEN 2680

La presencia de partículas ferrosas y no ferrosas en el grano de caucho deben ser evaluadas, se debe usar los parámetros establecidos en la Norma INEN 2680. Los resultados obtenidos se obtuvieron de tres muestras de 50 gr cada una (Instituto Ecuatoriano de Normalizacion, 2013).

7.2.3 Granulometría: INEN 2680, ASTM D 5644

La gradación del grano de caucho es un factor importante para el diseño del pavimento asfaltico. La manejabilidad, resistencia y economía de la mezcla dependerá de la distribución del tamaño del grano (Arun & Ganesh, 2013).

Foto 7-6 Ensayo de granulometría del grano de caucho



El análisis de la gradación del grano de caucho se realizó en base a los parámetros establecidos en la Norma INEN 2680; los resultados obtenidos de las dos muestras se presentan en la Tabla 0-22 Granulometría del grano de caucho (Instituto Ecuatoriano de Normalizacion, 2013).

7.2.4 Porcentaje de Fibra: INEN 2680

La presencia de fibras en las mezclas asfálticas está limitada por los parámetros establecidos en la Norma INEN 2680. Los resultados obtenidos de las muestras en los anexos.

7.2.5 Resumen de resultados obtenidos en el grano de caucho

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados en el grano de caucho serán presentados a continuación.

Tabla 7-6 Resultados del grano de caucho

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE CIVIL

RESUMEN DE RESULTADOS

GRANO DE CAUCHO MOLIDO DE 1-4 mm

ENSAYO	ESPECIFICACION	RESULTADOS	UNIDADES	ESPECIFICACION
Contenido de Humedad	INEN 2680	0.75%	%	Cumple
Contenido de Partículas Ferrosas	INEN 2680	0.06%	%	No Cumple
Granulometría: Muestra 1	INEN 2680	65.18	%	No Cumple
Granulometría: Muestra 2	INEN 2680	71.84%	%	No Cumple
Porcentaje de Fibra	INEN 2680	0.61%	%	Cumple

7.3 Emulsión asfáltica

7.3.1 Ensayo de Carga de partícula: INEN 908, AASHTO T-59

Este ensayo nos permite caracterizar e identificar la carga de la emulsión asfáltica. La emulsión asfáltica que se utiliza en Ecuador es de tipo catiónica, debido a que la carga de los agregados en su mayoría son aniónicos (Chicaiza, 2013; Instituto del Asfalto, 2005a).

7.3.2 Ensayo de estabilidad y sedimentación de almacenamiento: INEN 910, ASTM D6930-10

La estabilidad que la emulsión pueda tener durante su almacenamiento, determinan la tendencia que tendría los glóbulos de asfaltos a sedimentarse después de un periodo de tiempo (Instituto del Asfalto, 2005a). En este ensayo es necesario realizar la sedimentación después de 24h y 5 días después.

7.3.3 Tamiz N°20

El ensayo de Tamiz N°20 permite determinar si el asfalto presente en la emulsión ha emulsionado correctamente (Instituto del Asfalto, 2005a; Yanez, 2006). Un manejo inadecuado de la emulsión asfáltica es representado a través de una retención excesiva de partículas en el tamiz.

7.3.4 Ensayo de residuo por evaporación

Las propiedades y características del asfalto presente en la emulsión asfáltica deben ser ensayados según lo estipulado en el Manual Básico de Emulsiones Asfálticas MS N°19. El porcentaje de residuo asfaltico presente en la emulsión, permitirá conocer el asfalto total presente en la mezcla asfáltica cerrada en frio con pavimento fresado (RAP) (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2001d; Instituto del Asfalto, 2005a).

7.3.4.1 Ensayo de ductilidad

La ductilidad nos permite determinar el comportamiento de los asfaltos al ser sometidos a grandes deformaciones, sin perder resistencia (Yanez, 2006). Aquellos asfaltos que poseen una ductilidad normal presentan mejores propiedades aglutinantes; sin embargo, aquellos asfaltos cuya ductilidad es superior a la normal son susceptibles a deformarse por cambios de temperatura y carga vehicular.

7.3.4.2 Viscosidad Saybolt

La viscosidad de la emulsión asfáltica se evalúa a través del tiempo de circulación del flujo, calibrado bajo condiciones normadas. Se determina el tiempo de flujo en segundos. La Norma MOP-001F 2002 establece límites mínimos y máximos para las emulsiones asfálticas (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002).

7.3.4.3 Ensayo de penetración

La consistencia del residuo asfaltico presente en la emulsión asfáltica, se puede determinar al ejecutar el ensayo de penetración. El cual se lo realiza a través de una aguja normalizada y en baño María a una temperatura de 25°. La medida de la penetración es la distancia vertical que la aguja penetro en la muestra del residuo asfaltico (Yanez, 2006).

7.3.5 Resumen de resultados obtenidos de la emulsión asfáltica

Tabla 7-7 Resumen de resultados de la emulsión asfáltica CSS-1h

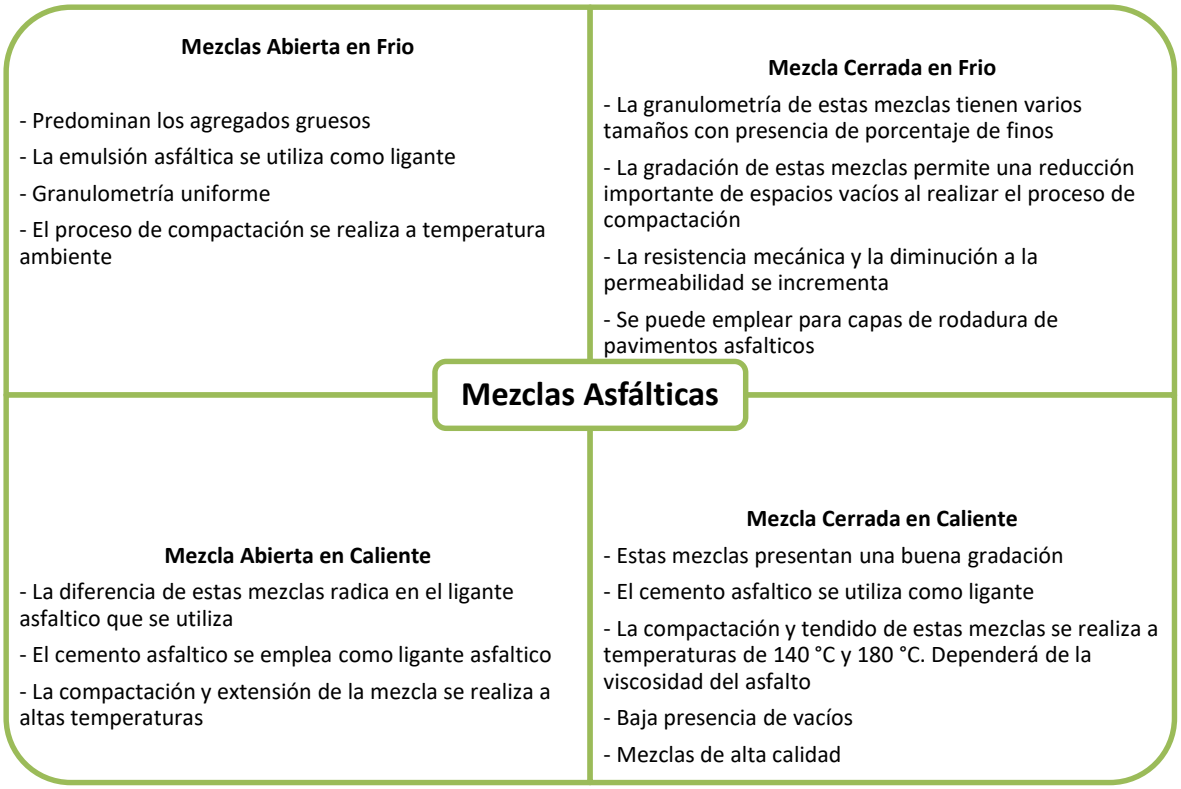
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR				
FACULTAD DE INGENIERIA				
ESCUELA DE CIVIL				
RESUMEN DE RESULTADOS				
EMULSION ASFALTICA CSS-1h				
ENSAYO	**ESPECIFICACION**	**RESULTADOS**	**UNIDADES**	**ESPECIFICACION**
Carga de partícula	INEN 908	Positiva	-	-
Estabilidad y sedimentación de almacenamiento (24 h)	INEN 910	0.12%	%	Cumple
Estabilidad y sedimentación de almacenamiento (5 días)	INEN 2680	1.20%	%	Cumple
Tamiz N°20	MOP-001-F 2002	0.07%	%	Cumple
Ductilidad sobre el residuo asfaltico	MOP-001-F 2002	42.00	cm	Cumple
Viscosidad Saybolt sobre el residuo asfaltico	MOP-001-F 2002	25.12	seg	Cumple
Penetración sobre el residuo asfaltico	MOP-001-F 2002	51.33	mm	Cumple

8. CAPITULO IX: DISEÑO DE LA MEZCLA ASFALTICA

La combinación optima de los materiales, generalmente agregados pétreos, aglutinantes asfalticos y, en ocasiones, aditivos especiales; se logra a través de un diseño de mezcla adecuado. La calidad de un pavimento asfaltico, será determinado por la calidad de materiales usados en las capas más cercanas a la superficie (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2001c; Jiménez et al., 2009; Thenoux & García, 2011).

La clasificación y características de las mezclas asfálticas se detallan a continuación:

Grafica 8-1 Matriz de clasificación de mezclas asfálticas



Una mezcla correcta de los materiales que conformaran la estructura del pavimento, junto con un espesor optimo proporcionara la capacidad estructural (Modulo de Rigidez) para cada capa. Un adecuado diseño estructural permitirá que la capa superior soporte la presión o estrés causado por los vehículos, mientras que, en las capas inferiores esta presión será distribuida (Sandoval, 2010).

La mezcla asfáltica de diseño que se realizará en la presente investigación será una Mezcla Asfáltica Cerrada (Densa) en Frio (Echeverria, 2016; Rondon & Reyes, 2015b). Las características y origen de los agregados pétreos cumplen con las especificaciones establecidos en el MOP 001 F 2002, Manual Básico de Emulsiones Asfálticas MS N°19 y Manual NEVI-12 Volumen 3 en la Sección 811-5 “Agregados para mezclas asfálticas en frio”.

El Método Marshall Modificado y Método Superpave son los métodos de diseño empleados para las dos mezclas asfálticas en frio que se citan en la presente tesis.

9. CAPITULO X: MEZCLA ASFALTICA EN FRIO

9.1 Resultados Diseño Marshall

El diseño de las briquetas con emulsión asfáltica, pavimento fresado (RAP) y con grano de caucho triturado de llantas (NFU); a través del método Marshall Modificado. Los resultados obtenidos a partir del diseño de 22 briquetas con diferentes porcentajes de emulsión asfáltica y agua de pre envuelta.

Al obtener los valores de gravedad especifica Bulk, estabilidad, flujo y perdida de estabilidad por inmersión se definirá la mejor mezcla asfáltica en frio a utilizarse.

9.1.1 Porcentaje de emulsión asfáltica optimo

El Instituto del Asfalto establece una ecuación para obtener el valor de emulsión asfáltica que se debe incorporar al diseñar la mezcla asfáltica (Montejo, 2008a; Yanez, 2006).

Sin embargo, al utilizar pavimento fresado (RAP) en la mezcla, se debe tomar en cuenta el asfalto residual presente y el tipo de producto asfaltico.

Ecuación 9-1 Porcentaje de emulsión asfáltica

$$Pc = \frac{(0.035xa) + (0.045xb) + (K_c) + (F)}{R}$$

Donde. -

Pc: porcentaje de asfalto presente en la mezcla

a: porcentaje de material mayor al Tamiz N°8

b: porcentaje de material entre el Tamiz N°8 y el Tamiz N°200

c: porcentaje de material menor al Tamiz N°200

k: 0.15 si el factor c esta entre los rangos de 11% y 15%

0.18 si el factor c esta entre los rangos de 6% y 10%

0.20 si el factor c es menor a 5%

F: depende de la absorción del agregado, está en los rangos de 0% y 2%. Se puede adoptar un valor entre 0.7 y 1.0

R: asfalto residual presente en la mezcla. Para asfalto el valor es de 1.0 y para emulsiones asfálticas los valores varían en el rango de 0.60 a 0.65.

Los resultados obtenidos del material fresado (RAP), son los siguientes:

Tabla 9-1 Porcentaje de emulsión asfáltica para mezcla cerrada en frio

	Tamiz	% Retiene	% Pasa	Especificación (Instituto del Asfalto MS-N°19)		
	3/4	0	100	100		
	1/2	7.02	92.98	90-100		
	3/8	12.38	87.62	-		
	N°4	33.49	66.51	45-70		
	N°8	52.53	47.47	25-55		
	N°50	90.68	9.32	5-20		
	N°200	96.85	3.15	2-9		
a	% de agregado que retine el tamiz No.8					52.53
b	% de agregado que pasa el tamiz No.8 y retiene el tamiz No.200					44.32
c	% de agregado que pasa el tamiz No.200					3.15
k	k					0.20
F	Absorción del agregado					0.70
R	% de residuo de asfalto en la emulsión					62.08
	% de asfalto residual					6.50
	%E=	8.317				
	% E ef=	1.817				

El Manual Básico de Emulsiones Asfálticas (MS-N°19) establece que para mezclas asfálticas recicladas que serán utilizadas en proceso de mantenimientos viales, el contenido de emulsión asfáltica que se debe usar debe estar en los rangos de 1% a 2.5% de emulsión por peso del pavimento fresado en seco (Instituto del Asfalto, 2001b).

En el diseño Marshall se moldearon 18 briquetas con porcentajes de emulsión asfáltica que varían en los rangos de 1.5% a 2.5% (Instituto del Asfalto, 2001b). Sin embargo, se decidió moldear 4 briquetas más con rangos de emulsión asfáltica del 3.0% al 4.0%. Esto para determinar el porcentaje de emulsión asfáltica óptimo para la mezcla.

Tabla 9-2 Resultados obtenidos de las briquetas por método Marshall

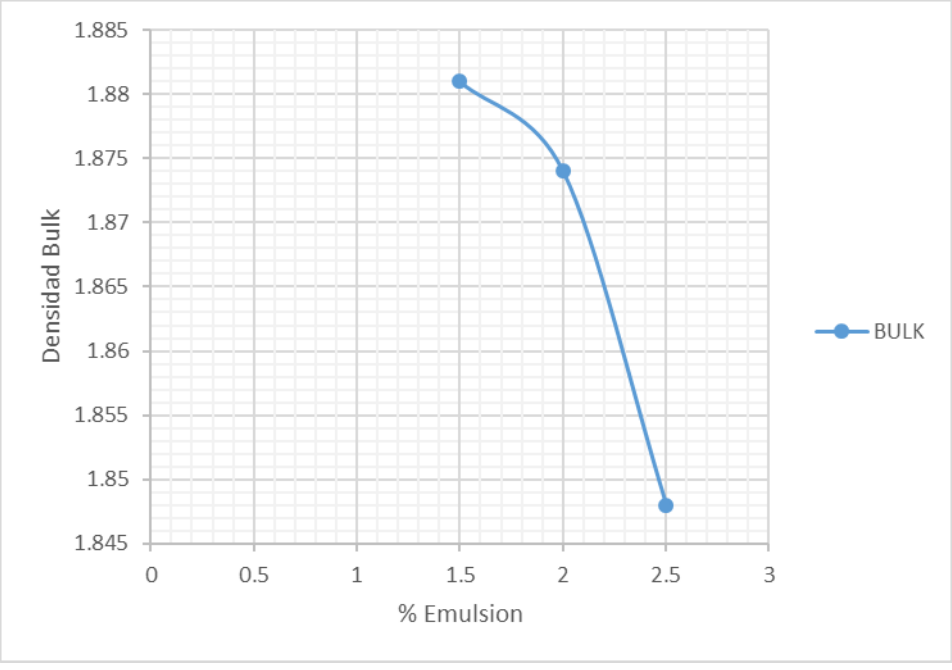
			PESO (gr)					ESTABILIDAD (kg)			
% agua	% asfalto	Forma de ensayo	Briquetas	Seca Aire	En Agua	Volumen	"Bulk"	Medida	Factor de Corrección	Corregida	Flujo
				d	f	v	g	q	r	s	t
			No.			(d-f)	(d/v)				1/100"
4.0	1.5	Seco	1	1015.5	475.42	540.08	1.880	2550	0.93	2372	14
			2	1065.5	499.73	565.77	1.883	2400	0.86	2064	15
			3	1030.3	482.43	547.87	1.881	2560	0.89	2278	16.5
		PROMEDIO =					1.881			2238	15
		Húmedo	4	1043.7	488.86	554.84	1.881	950	0.89	846	17
			5	1050.2	489.02	561.18	1.871	900	0.86	774	17
			6	1070.6	507.35	563.25	1.901	0	0.86	0	0
		PROMEDIO =					1.884			540	11
	PERDIDA DE ESTABILIDAD POR INMERSION (%) =									76	
	2.0	Seco	7	1098.1	511.16	586.94	1.871	2450	0.81	1985	15
			8	1088.3	506.26	582.04	1.870	2250	0.83	1868	15.5
			9	1078.9	502.42	576.48	1.872	2400	0.83	1992	16
		PROMEDIO =					1.871			1948	16
		Húmedo	10	1037.8	481.11	556.69	1.864	1250	0.89	1113	17
			11	1051.7	491.52	560.18	1.877	900	0.78	702	15
			12	1054.4	491.7	562.70	1.874	1100	0.86	946	14.5
		PROMEDIO =					1.872			920	16
	PERDIDA DE ESTABILIDAD POR INMERSION (%) =									53	
	2.5	Seco	13	1053.9	488.57	565.33	1.864	1700	0.86	1462	10.5
			14	1081.3	488.05	593.25	1.823	1300	0.81	1053	12
			15	1083.8	496.4	587.40	1.845	1950	0.81	1580	15
		PROMEDIO =					1.844			1365	13
		Húmedo	16	1031.5	485.19	546.31	1.888	1050	0.93	977	16.5
			17	1059.4	489.32	570.08	1.858	1100	0.86	946	18.5
			18	1029.8	476.22	553.58	1.860	1100	0.89	979	18
		PROMEDIO =					1.869			967	18
	PERDIDA DE ESTABILIDAD POR INMERSION (%) =									29	
3.0	3.0	Seco	19	1038.7	511.4	527.30	1.970	2700	0.96	2592	15
		PROMEDIO =					1.970			2592	15
		Húmedo	20	1096.9	479.5	617.40	1.777	1100	0.76	836	18
		PROMEDIO =					1.777			836	18
	PERDIDA DE ESTABILIDAD POR INMERSION (%) =									68	
	4.0	Seco	21	1104	511.89	592.11	1.865	2600	0.81	2106	14.5
		PROMEDIO =					1.865			2106	15
		Húmedo	22	1103.4	503.23	600.17	1.838	1150	0.78	897	27
		PROMEDIO =					1.838			897	27
	PERDIDA DE ESTABILIDAD POR INMERSION (%) =									57	

Tabla 9-3 Resumen de resultados obtenidos de las briquetas por Método Marshall

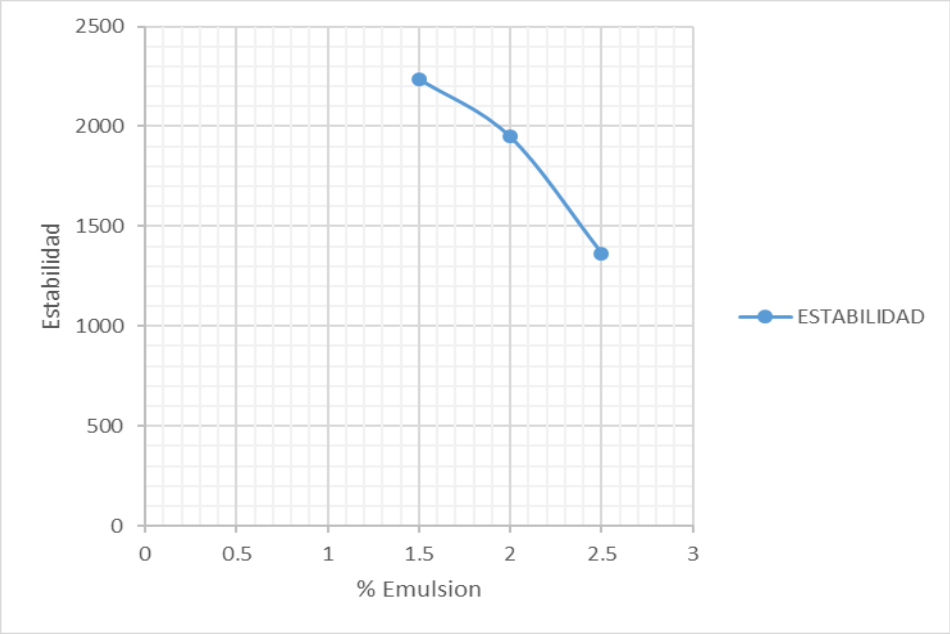
% Agua	% Asfalto	Briquetas	Bulk	BULK	ESTABILIDAD		Flujo		Perdida de Estabilidad (%)
					Seca	Húmeda	Seca	Húmeda	
4.0	1.5	1	1.880	1.881	2238	540	15	11	76
		2	1.883						
		3	1.881						
		4	1.881	1.884					
		5	1.871						
		6	1.901						
	2.0	7	1.871	1.874	1948	920	16	16	53
		8	1.877						
		9	1.874						
		10	1.864	1.869					
		11	1.870						
		12	1.872						
	2.5	13	1.864	1.848	1365	967	13	18	29
		14	1.823						
		15	1.858						
		16	1.888	1.864					
		17	1.845						
		18	1.860						
3.0	3.0	19	1.970	1.970	2592	836	15	18	68
		20	1.777						
	4.0	21	1.865	1.865	2106	897	15	27	57
		22	1.838						

Los resultados obtenidos de las briquetas con lo diferentes valores de agua de pre envuelta y contenido de emulsión asfáltica, serán presentados en las siguientes graficas:

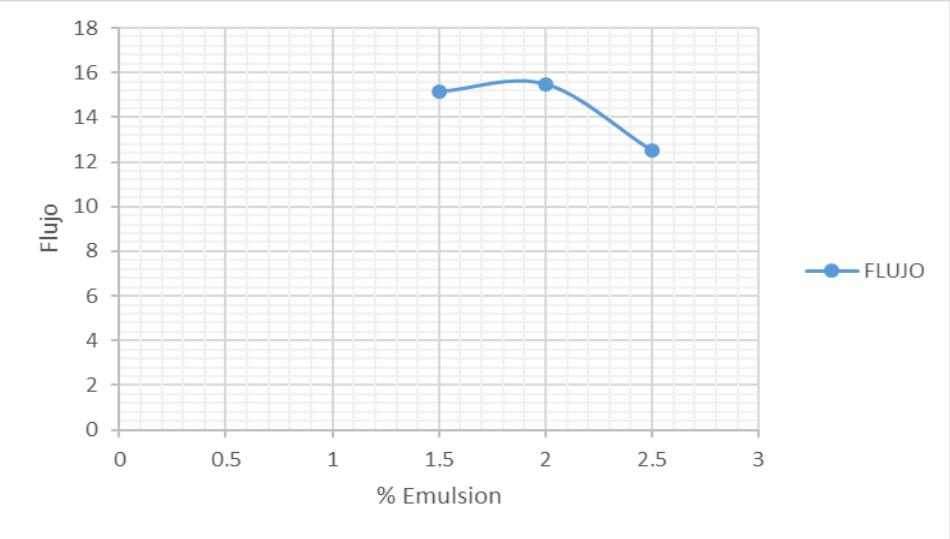
Grafica 9-1 Densidad Bulk con 4% agua



Grafica 9-2 Estabilidad con 4% de agua



Grafica 9-3 Flujo con 4% de agua



Los resultados obtenidos para la mezcla asfáltica optima, fueron los siguientes:

Tabla 9-4 Diseño definitivo con pavimento fresado (RAP)

DISEÑO DEFINITIVO CON PAVIMENTO FRESADO (RAP)

Contenido de agua:	4.0	%
Contenido de emulsión:	2.5	%

Requisito	U	Norma	Especificación		Resultado
			Mínimo	Máximo	
Estabilidad Marshall	lb	ASTM 1559	750	-	1365
Flujo	(1/100")	ASTM 1560	5	18	13
Perdida de estabilidad por inmersión	%	ASTM 1561	-	50	29

9.1.2 Dosificación de la mezcla asfáltica no modificado con grano de caucho

El ensayo de granulometría permite obtener diferentes curvas granulométricas, las cuales se condensarán en una curva granulométrica de diseño. La curva granulométrica de diseño fue realizada con un tamaño nominal del agregado de 1/2".

Tabla 9-5 Porcentaje de mezcla de los agregados

ÁREA DE PAVIMENTOS

INFORME DE ENSAYO

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN FRIO

OBRA : Tesis Pavimento Fresado, con grano de caucho y emulsion
LOCALIZACIÓN : Av. Napo
MUESTRA : 1.00
DESCRIPCIÓN : Tesis

N° DE RECEPCIÓN :
SOLICITADO POR : Belen Morante
FISCALIZACIÓN :
CONTRATISTA :
FECHA :

PORCENTAJE DE MEZCLA DE LOS AGREGADOS

MALLA		2 1/2"	2"	1 1/2"	1"	3/4 "	1/2 "	3/8"	N° 4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200
ABERTURA	(mm)	63	50	37.5	25	19	12.5	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
ESPECIFICACIÓN	MÍN	100	100	100	100	100	90	---	44	28	---	---	5	---	2
	MÁX	100	100	100	100	100	100	---	74	58	---	---	21	---	10
AGREGADO	A	100	100.0	100.0	100.0	100.00	100.00	100.00	99.70	64.94	40.36	23.28	11.29	5.79	2.90
AGREGADO	B	100	100.0	100.0	100.0	100.00	91.88	86.04	63.10	46.32	30.02	18.10	9.38	5.61	3.18
AGREGADO	C	100	100.0	100.0	100.0	100.00	93.33	86.95	61.83	42.77	25.94	14.56	8.11	4.80	3.20
MEZCLA AGREGADOS		100.0	100.0	100.0	100.0	100.00	92.98	87.62	66.51	47.47	30.24	17.91	9.32	5.47	3.15

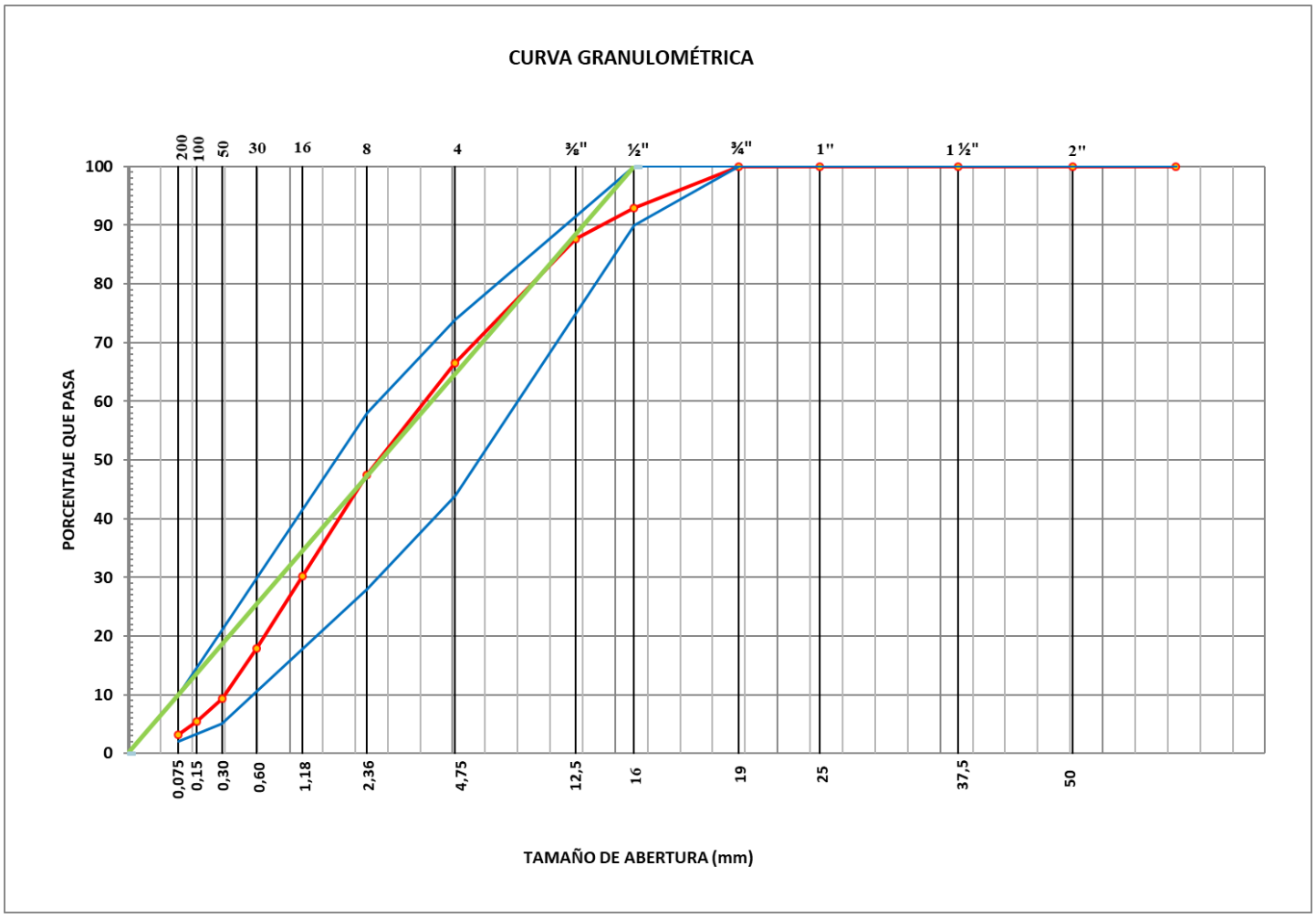
PORCENTAJES DE MEZCLA

Agregado A	10%
Agregado B	70%
Agregado C	20%

Agregado A: Fino
Agregado B: Intermedio
Agregado C: Grueso

Fuente: Diseño de mezcla asfáltica programa, (Ing. Jorge Albuja)

Grafica 9-4 Curva granulométrica de diseño



El diseño correcto de una mezcla asfáltica depende de la línea de curva de la mezcla, la cual debe estar dentro de las especificaciones máximas y mínimas. Se recomienda que la curva de mezcla pase por la mitad de las especificaciones, como se expone en la Grafica 9 (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002; Yanez, 2006).

9.1.3 Resultado obtenidos de la mezcla asfáltica no modificada con grano de caucho

Los resultados obtenidos de las briquetas moldeadas a través del diseño Marshall se presentan a continuación:

Tabla 9-6 Resultados mezcla asfáltica optima (2.5% emulsión + 0% caucho)

			PESO (gr)						ESTABILIDAD (kg)			
% agua	% asfalto	Forma de curado	Briquetas	Seca Aire	En Agua	Superficie Seca Saturada	Volumen	"Bulk"	Medida	Factor de Corrección	Corregida	Flujo
				d	f		v	g	q	r	s	t
			No.				(d-f)	(d/v)				1/100"
4.0	2.5	Seco	1	1054.90	484.06	1067.50	570.84	1.848	2700	0.86	2322	19
			2	1068.54	473.60	1070.70	594.94	1.796	2300	0.81	1863	19
			3	1074.22	460.90	1076.90	613.32	1.751	1800	0.76	1368	20
			4	1032.78	483.84	1039.20	548.94	1.881	2850	0.89	2537	17
			5	1043.22	471.73	1047.00	571.49	1.825	2200	0.86	1892	17
			6	1050.11	470.38	1054.60	579.73	1.811	2500	0.83	2075	17
			PROMEDIO =					1.819			2009	18
		Húmedo	7	1060.40	477.52	1070.80	582.88	1.819	1450	0.83	1204	20
			8	1032.87	479.01	1068.30	553.86	1.865	1400	0.89	1246	17
			9	1030.55	472.46	1049.40	558.09	1.847	1450	0.89	1291	20.5
			10	1029.12	487.90	1058.50	541.22	1.901	1600	0.93	1488	15.5
			11	1059.47	497.31	1084.80	562.16	1.885	1650	0.86	1419	21
			12	1031.85	492.76	1077.50	539.09	1.914	1600	0.93	1488	17
			PROMEDIO =					1.872			1895	18
	PERDIDA DE ESTABILIDAD POR INMERSION (%) =										6	

Tabla 9-7 Resumen de resultados mezcla asfáltica optima (2.5% emulsión + 0% caucho)

% Agua	% Asfalto	Briquetas	Bulk	BULK	Estabilidad	Flujo	Perdida de Estabilidad (%)
4.0	2.5	1	1.848	1.819	2009	18	6
		2	1.796				
		3	1.751				
		4	1.881				
		5	1.825				
		6	1.811				
		7	1.819	1.872	1895	18	
		8	1.865				
		9	1.847				
		10	1.901				
		11	1.885				
		12	1.914				

9.1.4 Dosificación de la mezcla asfáltica modificado con grano de caucho

La incorporación de grano de caucho en porcentajes de 1.0%, 1.5% y 2.0% por peso del agregado seco de la mezcla de la briqueta de 1100 gr, permitió evaluar la estabilidad y flujo de la mezcla modificada.

9.1.3 Resultado obtenidos de la mezcla asfáltica modificada con grano de caucho

Las briquetas con grano de caucho presentaron una pérdida de estabilidad mayor al 50% y se fracturaron durante el tiempo de inmersión en baño María a 60 °C. Es por esta razón, que los valores de estabilidad y flujo no se obtuvieron.

Los resultados de las briquetas que sí cumplieron el proceso del ensayo de perdida por inmersión, serán presentados a continuación:

Tabla 9-8 Resultados obtenidos de las briquetas modificadas con grano de caucho

				PESO (gr)						ESTABILIDAD (kg)			
% agua	% asfalto	% grano de caucho	Forma de curado	Briquetas	Seca Aire	En Agua	Volumen	Saturada superficialmente	"Bulk"	Medida	Factor de Corrección	Corregida	Flujo
					d	f	v		g	q	r	s	t
				No.			(d-f)		(d/v)				1/100"
4.0	2.5	1	Seco	1	1058.45	459.82	598.63	1061.90	1.768	1700	0.81	1377	24.5
				2	1049.14	425.33	623.81	1051.10	1.682	1250	0.76	950	24.5
				3	1029.54	435.07	594.47	1031.70	1.732	1350	0.81	1093.5	24.5
				4	1053.98	428.07	625.91	1055.90	1.684	1450	0.76	1102	27
				5	1094.50	471.26	623.24	1095.50	1.756	1450	0.76	1102	24.5
				6	1052.22	430.07	622.15	1054.70	1.691	1450	0.76	1102	24.5
				PROMEDIO=					**1.719**			**1121**	**25**
			Húmedo	7	1072.33	459.59	612.74	1074.80	1.750	0	0.76	0	23
				8	1051.34	444.40	606.94	1053.50	1.732	0	0.78	0	0
				9	1050.22	424.08	626.14	1052.30	1.677	0	0.76	0	0
				10	1045.47	424.82	620.65	1046.10	1.684	0	0.76	0	0
				11	1037.58	424.30	613.28	1039.50	1.692	0	0.76	0	0
				12	1039.74	428.01	611.73	1041.90	1.700	0	0.76	0	0
				PROMEDIO=					**1.706**			**0**	**4**
		PERDIDA DE ESTABILIDAD POR INMERSION										100	
		1.5	Seco	13	1070.35	455.08	615.27	1074.60	1.740	1050	0.76	798	24.5
				14	1050.54	449.90	600.64	1058.40	1.749	1250	0.78	975	25
				15	1048.66	423.65	625.01	1050.20	1.678	950	0.76	722	26.5
				16	1049.55	441.20	608.35	1053.10	1.725	1400	0.78	1092	23.5
				17	1022.33	414.12	608.21	1026.80	1.681	1175	0.78	916.5	25.5
				18	1028.96	420.15	608.81	1032.30	1.690	1375	0.78	1072.5	27.5
				PROMEDIO=					**1.710**			**929**	**25**
			Húmedo	19	1073.58	449.39	624.19	1074.70	1.720	0	0.76	0	0
				20	1055.65	442.75	612.9	1056.00	1.722	0	0.76	0	0
				21	970.66	421.87	548.79	971.90	1.769	0	0.89	0	0
				22	847.95	347.05	500.9	848.50	1.693	0	1.04	0	0
				23	989.79	400.19	589.6	990.20	1.679	0	0.81	0	0
				24	1030.95	419.24	611.71	1031.60	1.685	0	0.76	0	0
				PROMEDIO=					**1.711**			**0**	**0**
		PERDIDA DE ESTABILIDAD POR INMERSION										100	
		2	Seco	25	1050.15	437.06	613.09	1054.50	1.713	0	0.76	0	0
				26	1042.20	417.58	624.62	1046.10	1.669	1500	0.76	1140	27
				27	1071.22	446.91	624.31	1074.50	1.716	1550	0.76	1178	27.5
				28	1063.82	439.82	624	1064.50	1.705	1750	0.76	1330	28
				29	1055.98	430.52	625.46	1057.00	1.688	1650	0.76	1254	27.5
				30	1045.33	428.03	617.3	1048.30	1.693	1750	0.76	1330	25.5
				PROMEDIO=					**1.697**			**1039**	**23**
			Húmedo	31	1100.25	476.70	623.55	1110.80	1.764	0	0.76	0	0
				32	1052.20	443.85	608.35	1055.90	1.730	0	0.78	0	0
				33	1065.45	440.20	625.25	1069.50	1.704	0	0.76	0	0
				34	1052.15	428.69	623.46	1054.20	1.688	0	0.76	0	0
				35	1022.18	406.44	615.74	1028.30	1.660	0	0.76	0	0
				36	1058.54	433.93	624.61	1060.50	1.695	0	0.76	0	0
				PROMEDIO=					**1.707**			**0**	**0**
		PERDIDA DE ESTABILIDAD POR INMERSION										100	

Tabla 9-9 Resumen de resultados obtenidos de las briquetas modificadas con grano de caucho

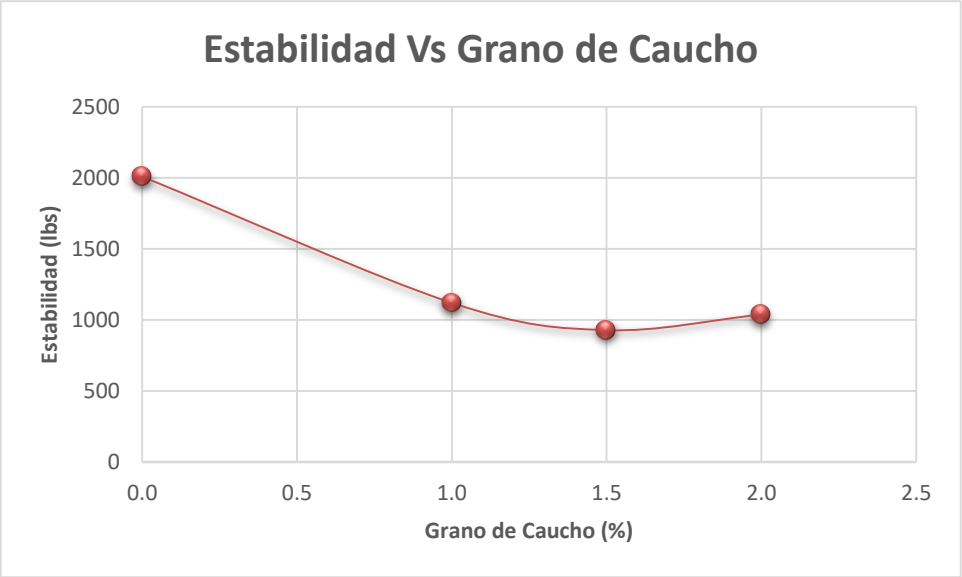
% Agua	% Asfalto	% Grano de Caucho	Briquetas	Bulk	Promedio BULK	Estabilidad		Flujo	Perdida de Estabilidad (%)
						Seca	Húmeda		
4.0	2.5	1.0	1	1.768	1.719	1121	0	25	100
			2	1.682					
			3	1.732					
			4	1.684					
			5	1.756					
			6	1.691					
			7	1.750	1.706			4	
			8	1.732					
			9	1.677					
			10	1.684					
			11	1.692					
			12	1.700					
		1.5	13	1.740	1.710	929	0	25	100
			14	1.749					
			15	1.678					
			16	1.725					
			17	1.681					
			18	1.690					
			19	1.720	1.711			0	
			20	1.722					
			21	1.769					
			22	1.693					
			23	1.679					
			24	1.685					
		2.0	25	1.713	1.697	1039	0	23	100
			26	1.669					
			27	1.716					
			28	1.705					
			29	1.688					
			30	1.693					
			31	1.764	1.707			0	
			32	1.730					
			33	1.704					
			34	1.688					
			35	1.660					
			36	1.695					

Los resultados de estabilidad, perdida de estabilidad y flujo de las briquetas diseñadas con 0%,1.0%,1.5% y 2.0% de grano de caucho fueron cotejados a través de las siguientes graficas:

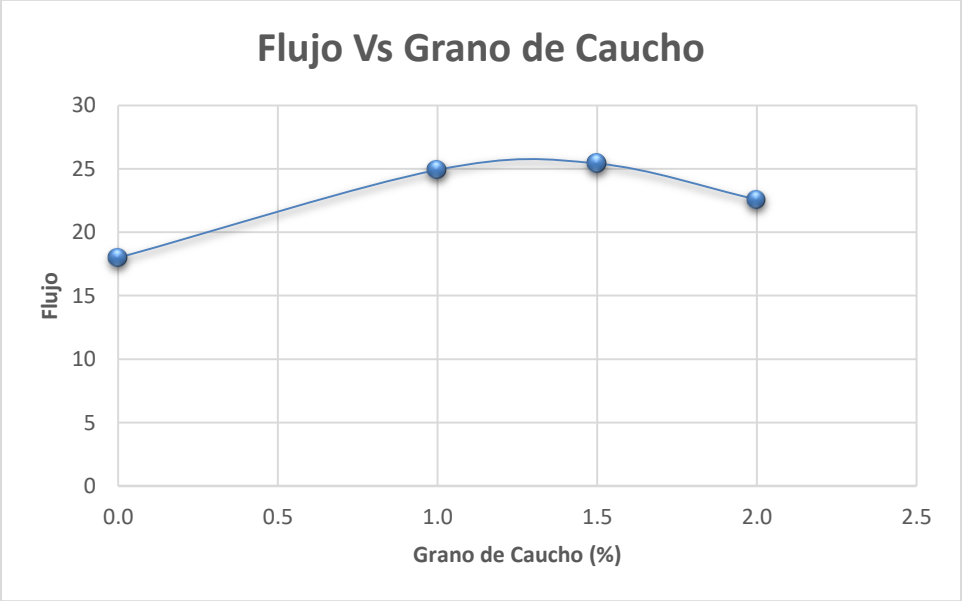
Tabla 9-10 Mezcla asfáltica diseñada con grano de caucho

Agua	Emulsión	Grano de Caucho	Estabilidad	Flujo	Perdida de Estabilidad
(%)	(%)	(%)	(lbs)	(1/100")	-
4.0	2.5	0.0	2009	18	6
		1.0	1121	25	100
		1.5	929	25	100
		2.0	1039	23	100

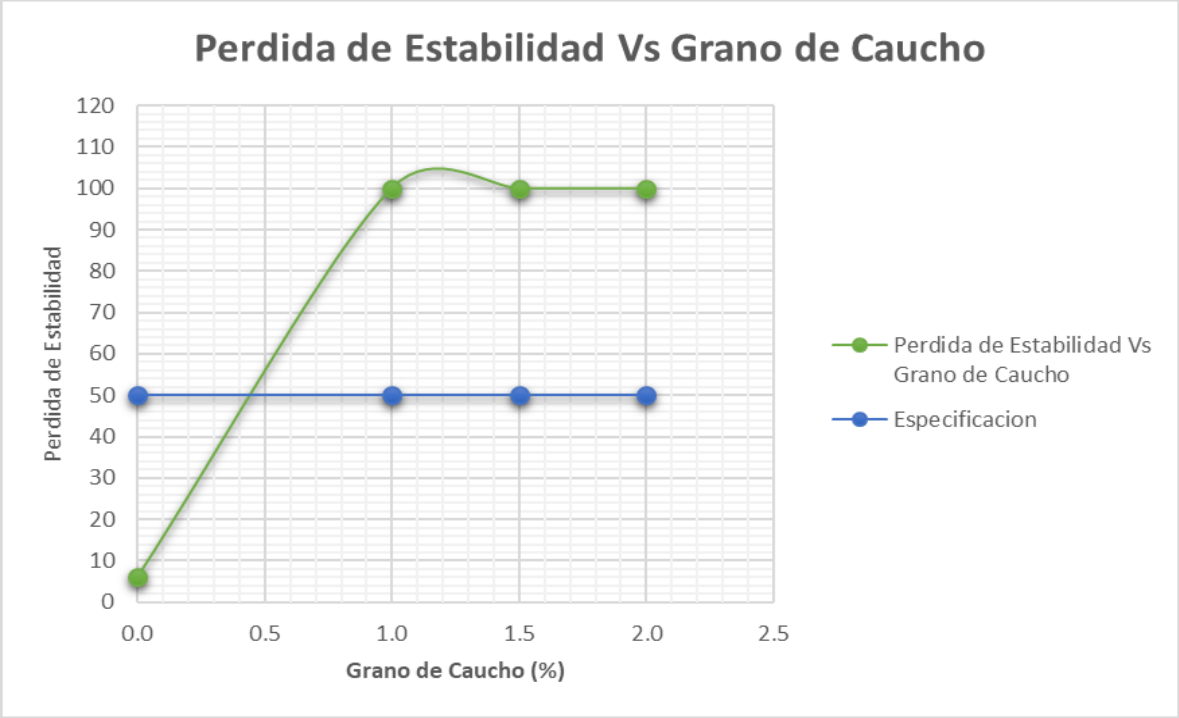
Grafica 9-5 Estabilidad Vs Grano de caucho



Grafica 9-6 Flujo Vs Grano de caucho



Grafica 9-7 Perdida de Estabilidad Vs Grano de Caucho



9.2 Resultados obtenidos Diseño Superpave

La metodología Superpave utilizada para moldear 8 briquetas, se basa en las especificaciones del Instituto del Asfalto y de la Normas AASHTO M323-07 y AASHTO R35-04 (AASHTO, 2004, 2007; Bitumix CVV Especialidades Asfalticas, 2015; Instituto del Asfalto, 2001c).

El Instituto del Asfalto ha diseñado mezclas en caliente con material fresado (RAP); sin embargo, la mezcla asfáltica planteada en la siguiente investigación utilizara como ligante asfaltico la emulsión asfáltica CSS-1h. El diseño de este tipo de mezcla requiere varias especificaciones, entre ellas: granulometría, desgaste a los sulfatos y abrasión.

9.2.1 Granulometría

La granulometría que utiliza el Diseño Superpave utiliza el exponencial 0.45 en la carta granulométrica. Es por tal razón, que la abscisa en escala aritmética, abertura de los tamices (mm), esta elevada al exponencial 0.45. (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013a)

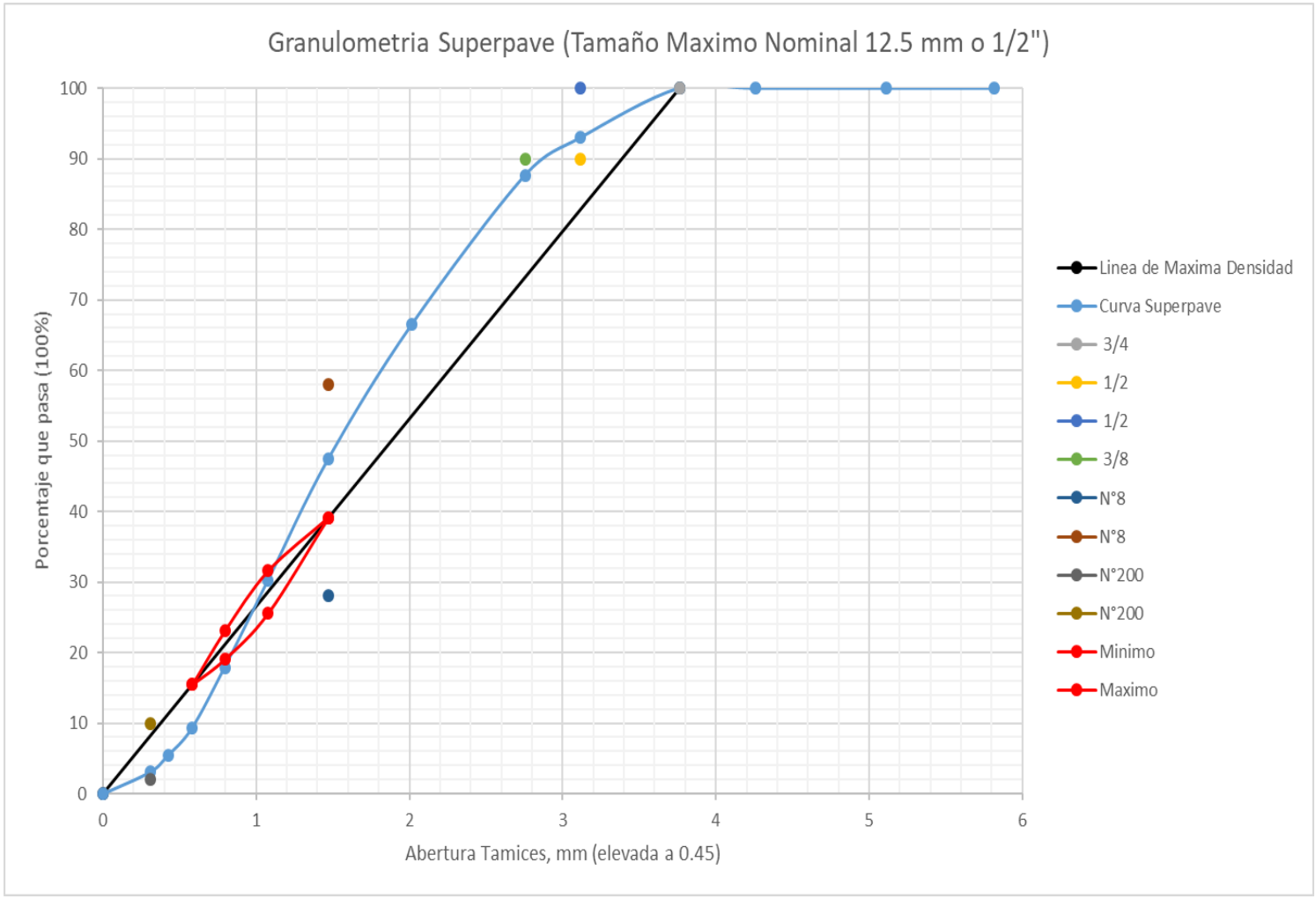
Esta carta granulométrica representa la máxima densidad del agregado como una línea recta que parte desde el origen y finaliza en el tamaño máximo del agregado de la mezcla. Además, se emplean puntos de control y una zona restringida. (Montejo, 2008b)

Los puntos de control son puntos obligados de la curva granulométrica. Los cuales corresponden al tamaño máximo nominal del agregado.(Instituto del Asfalto, 2001c)

La zona restringida se ubica en los tamices N°4 y N°50, la curva granulométrica no debe pasar por esta zona. Aquellas curvas granulométricas que pasen por esta zona serán denominadas curvas graduadas con joroba (“humped graduations”). Estas curvas granulométricas con joroban indican mucha presencia de finos en la mezcla. Por lo que, es una mezcla débil y de difícil compactación. El nivel de serviciabilidad es bajo (AASHTO, 2004; Montejo, 2008b).

El material empleado en el diseño de esta mezcla asfáltica en frio fue evaluada a través de esta carta granulométrica, los resultados se expondrán a continuación:

Grafica 9-8 Carta granulométrica de Superpave



El tamaño máximo nominal del agregado de la mezcla es de ½ (12.5 mm) y el tamaño máximo del agregado es de ¾ (19 mm). Estos resultados están dentro de los parámetros establecidos para el diseño de mezclas Superpave (Montejo, 2008b).

La curva granulométrica obtenida del pavimento fresado (RAP) se denomina como curva granulométrica con joroba (M. Anderson, 2005; McDaniel & Anderson, 2001).

9.2.2 Propiedades de Origen

Las propiedades de origen evaluadas en el pavimento fresado (RAP) fueron durabilidad y tenacidad. El ensayo de partículas deletéreas, caras fracturadas y partículas planas y alargadas no se evaluó debido a que el material empleado no es agregado virgen (B. M. Anderson, Turner, & Peterson, s. f.; Montejo, 2008b).

9.2.2.1 Durabilidad

El ensayo de durabilidad de los agregados sumergidos en sulfatos permite determinar la resistencia del agregado a factores externos (Montejo, 2008b; Yanez, 2006). En el diseño Superpave se establecen rangos de perdida, los cuales fueron cotejados con los resultados obtenidos.

El agregado fino no cumple con los valores de perdida máxima de desgaste, 10% a 20% para 5 ciclos de inmersión. Sin embargo, el agregado fino presente en la mezcla es del 10% por peso total y el porcentaje de mezcla del agregado grueso en conjunto con el agregado intermedio es del 90%; por lo que la mezcla si cumpliría con las especificaciones de Superpave

9.2.2.2 Tenacidad

El ensayo de tenacidad permite determinar la degradación mecánica durante el proceso de construcción del pavimento asfaltico (Montejo, 2008b; Yanez, 2006). El Diseño Superpave establece límites para la perdida máxima de abrasión.

9.2.3 Esfuerzo del compactador giratorio

La fuerza de compactación para la mezcla asfáltica es frio, se ha establecido en base al número de vehículos (ESALs) y en las aplicaciones que la vía tendrá. Los valores de ESALs de diseño para un carril de diseño con un periodo de 20 años se deben determinar adecuadamente para seleccionar el $N_{diseño}$ para la mezcla asfáltica. En la tabla 9.16 se establece los valores de compactación, los cuales son $N_{inicial}$, $N_{diseño}$ y $N_{máx}$ (AASHTO, 2004; Castañeda, Escobar, & Lopez, 2011; Montejo, 2008b).

Tabla 9-11 Parámetros de compactación de Superpave

ESALs de diseño	Parámetros de Compactación			Aplicaciones de la vía
(millones)	N inicial	N diseño	N máximo	Calles de tráfico urbano medio alto. Vías de acceso de 2 carriles.
3 a < 30	8	100	160	Autopistas

Se debe considerar la Nota 10 de la Norma AASHTO R35-04 “Superpave Volumetric Design for Hot Mix Asphalt (HMA)” para niveles de trafico de diseño entre 3 y < 10 millones de ESALs (AASHTO, 2004). Los valores que se establecen para el numero de giros son los siguientes:

- **$N_{inicial}$:** 7
- **$N_{diseño}$:** 75
- **$N_{máx.}$:** 115

9.2.4 Gravedad específica y vacíos del agregado

La determinación de la gravedad especifica teórica máxima, gravedad especifica neta de la mezcla asfáltica compactada y los vacíos del agregado mineral se pueden establecer a través del ensayo Rice. El cual debe tomar dos muestras para poder determinar un promedio de los resultados obtenidos (Yanez, 2006).

9.2.4.1 Gravedad especifica máxima teórica (Gmm)

La gravedad especifica máxima teórica (Gmm) promedio de las dos muestras ensayadas fue de 2.405.

9.2.4.2 Gravedad especifica neta de la mezcla asfáltica moldeada

Este ensayo se realiza a la mezcla asfáltica ya moldeada, ya sea por método Marshall o Superpave.

9.2.4.3 Porcentaje de vacíos

La determinación del porcentaje de vacíos del agregado mineral (VAM), vacíos de aire (Va) permite evaluar si la mezcla está dentro de los parámetros establecidos de diseño (Hernández & Sandoval, 2010)

9.3 Ensayo de módulo de rigidez

La carga vehicular que se transmita a la estructura del pavimento es uno de los parámetros más importantes, es por tal razón que para determinar su comportamiento se debe realizar el ensayo de Módulo de Rigidez (Hernández & Sandoval, 2010; Sandoval, 2010).

Este ensayo nos permite determinar la capacidad de distribución de la carga vehicular y protección de las capas inferiores de la estructura, siendo esta una propiedad dominante en la estructura del pavimento (Hernández & Sandoval, 2010).

Las pruebas para obtener el módulo de rigidez se las realiza en muestras cilíndricas de material bituminoso que se compacta bajo cargas controladas. La duración de la carga y temperatura puede varia, este ensayo nos permite determinar los resultados de la aplicación de la carga de compresión (Sandoval, 2010).

Este método no destructivo de tracción indirecta requiere que las briquetas cilíndricas compactadas a través del diseño Marshall tengan las siguientes dimensiones:

- Diámetro: 102 mm
- Altura: 73 mm

Foto 9-1 Briquetas cilíndricas Diseño Marshall



De la misma forma, las briquetas cilíndricas moldeadas a través del Método Superpave deben tener las siguientes dimensiones:

- Diámetro: 101 mm
- Altura: 65 mm

Foto 9-2 Briquetas cilíndricas Método Superpave



La ejecución del ensayo se lo realizo a través del Equipo NAT (Nottingham Asphalt Tester). La temperatura de ensayo fue de 20°C, bajo una carga de deformación de 5 microns con intervalos de tiempo en los pulsos de carga y finalizando en el pulso máximo de carga, de 0.12 segundos (Vila, 2018).

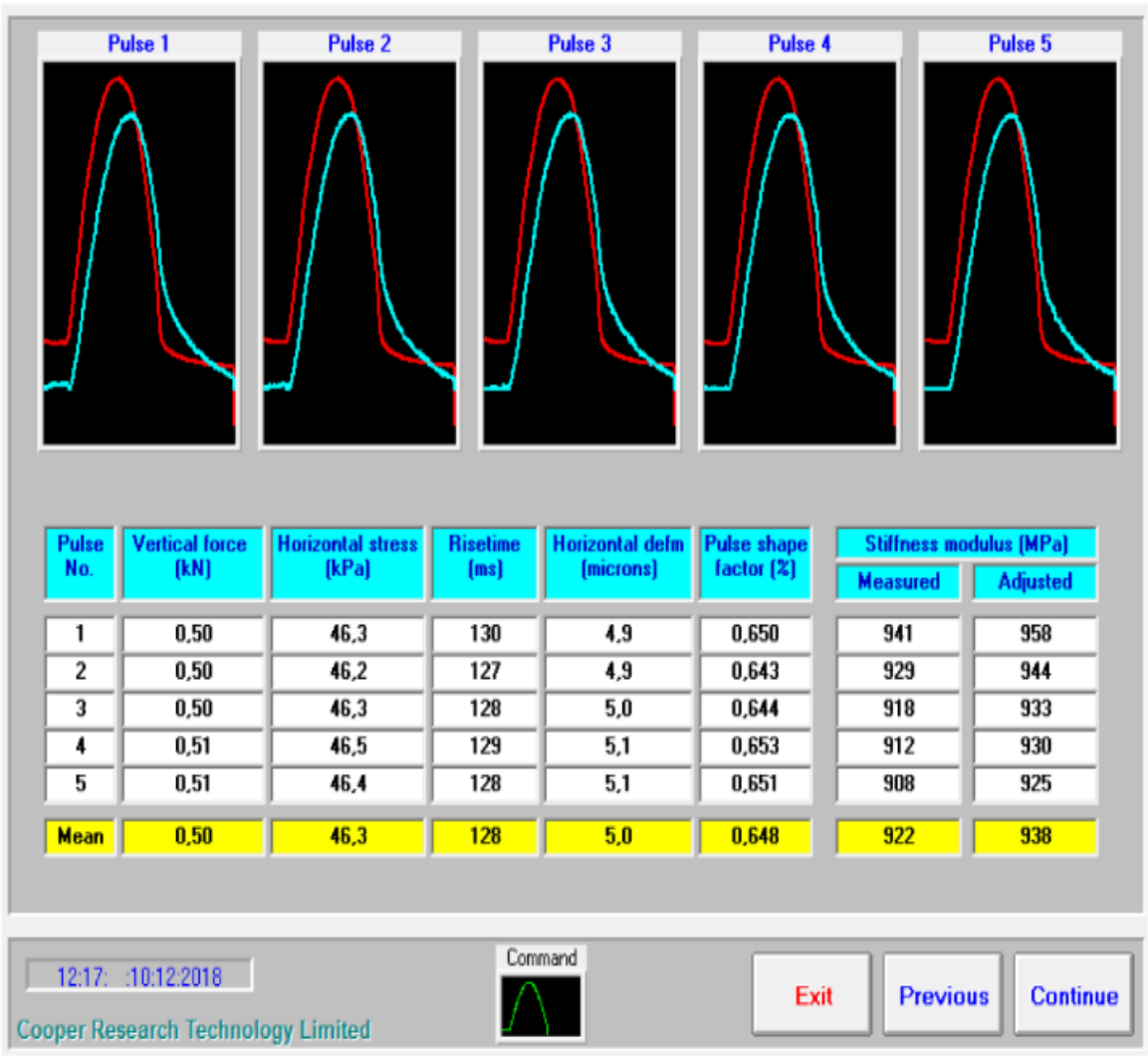
9.3.1 Resultados del Ensayo de Modulo de Rigidez

Tabla 9-12 Módulo de rigidez briquetas Marshall

Marshall

MUESTRAS	MÓDULO DE RIGIDEZ 20 °C (MPa)
1S	938
2S	687
PROMEDIO	813
DES. ESTANDAR	177
COEF. VARIACIÓN	21,8

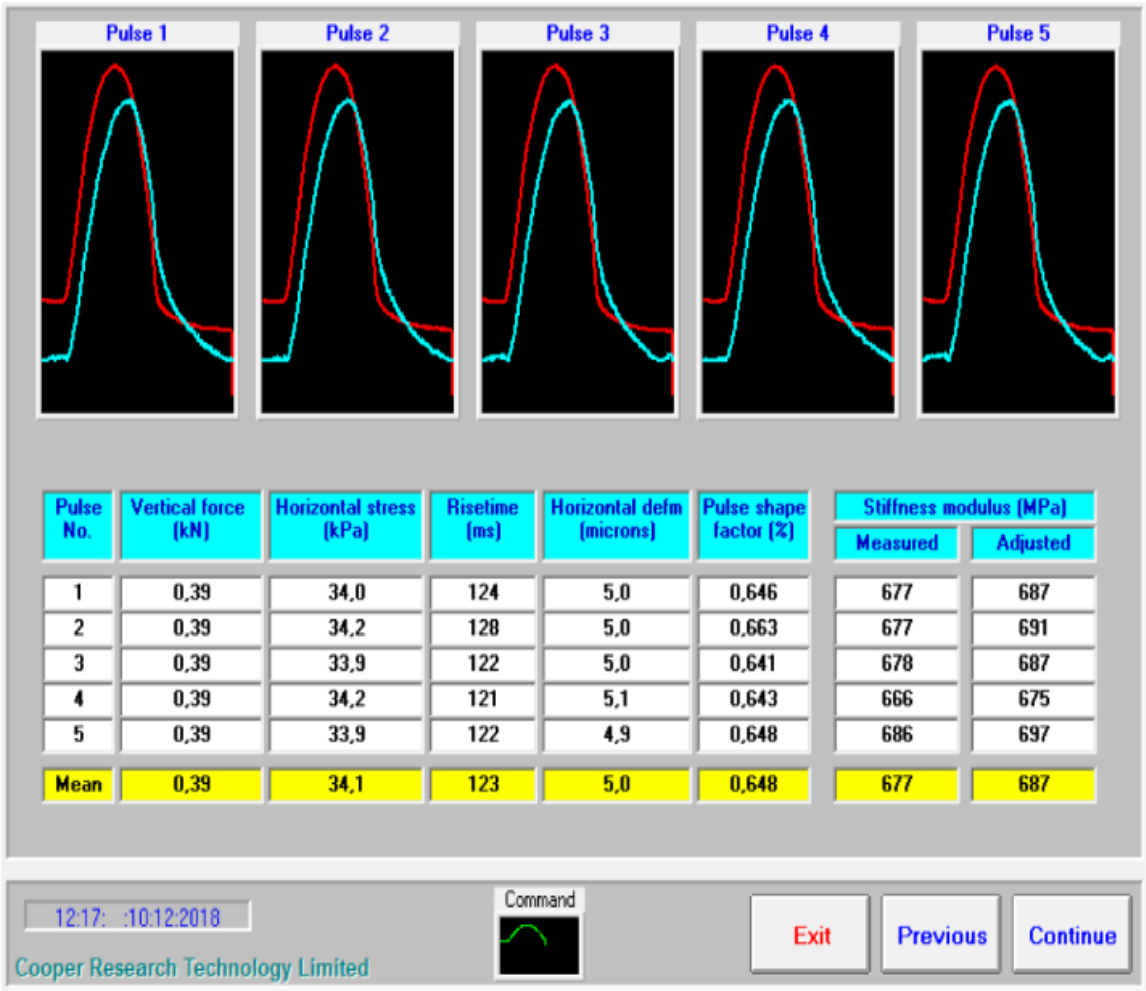
Grafica 9-9 Modulo de rigidez briquetas Marshall (1M)



Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)	
						Measured	Adjusted
1	0,50	46,3	130	4,9	0,650	941	958
2	0,50	46,2	127	4,9	0,643	929	944
3	0,50	46,3	128	5,0	0,644	918	933
4	0,51	46,5	129	5,1	0,653	912	930
5	0,51	46,4	128	5,1	0,651	908	925
Mean	0,50	46,3	128	5,0	0,648	922	938

Módulo de rigidez. Briqueta 1M (Marshall)

Grafica 9-10 Modulo de rigidez briquetas Marshall (2M)



Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)	
						Measured	Adjusted
1	0,39	34,0	124	5,0	0,646	677	687
2	0,39	34,2	128	5,0	0,663	677	691
3	0,39	33,9	122	5,0	0,641	678	687
4	0,39	34,2	121	5,1	0,643	666	675
5	0,39	33,9	122	4,9	0,648	686	697
Mean	0,39	34,1	123	5,0	0,648	677	687

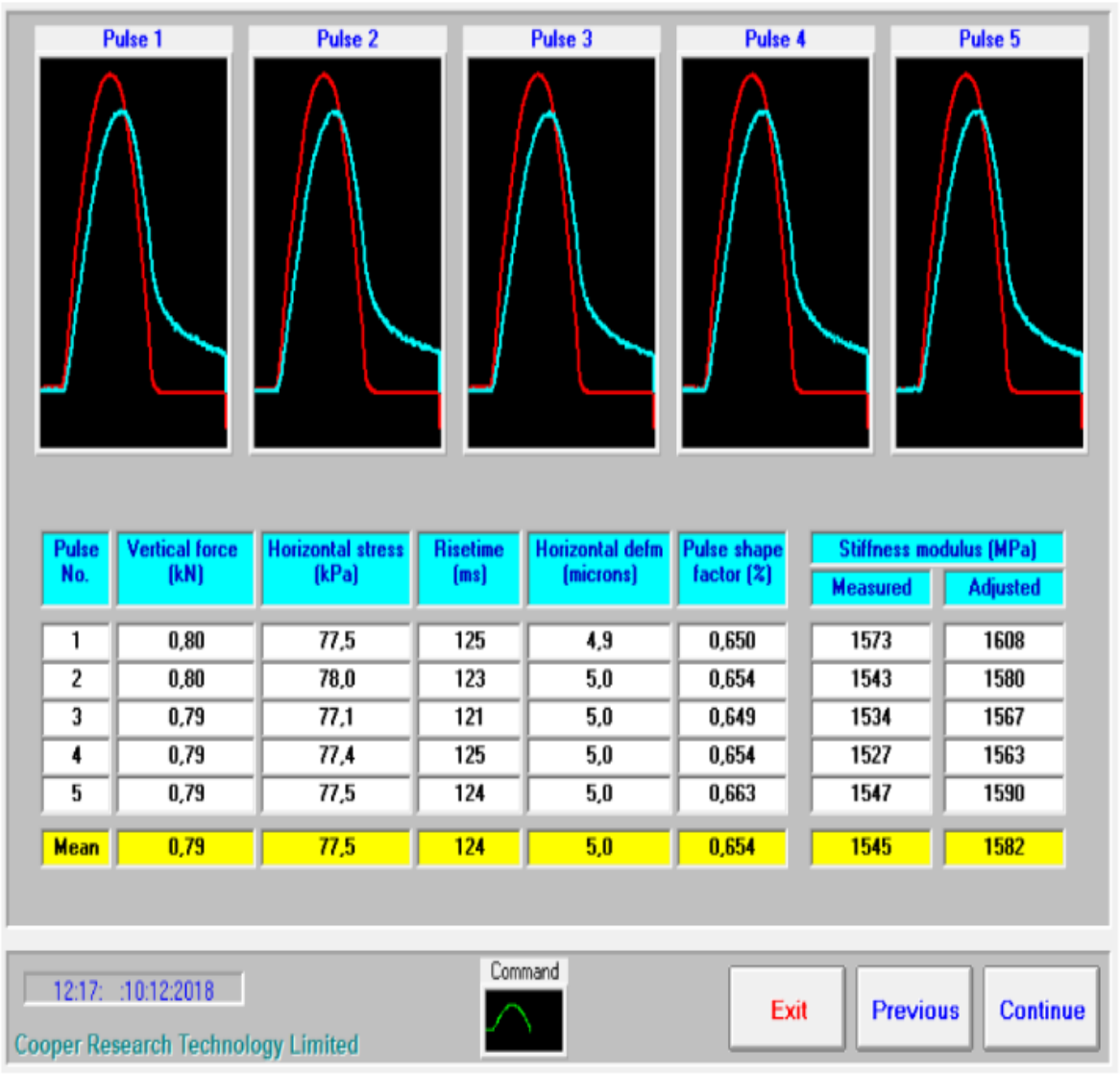
Módulo de rigidez. Briqueta 2M (Marshall)

Tabla 9-13 Módulo de rigidez briquetas Superpave

Superpave

MUESTRAS	MÓDULO DE RIGIDEZ 20 °C (MPa)
1S	1582
2S	1409
PROMEDIO	1496
DES. ESTANDAR	122
COEF. VARIACIÓN	8,2

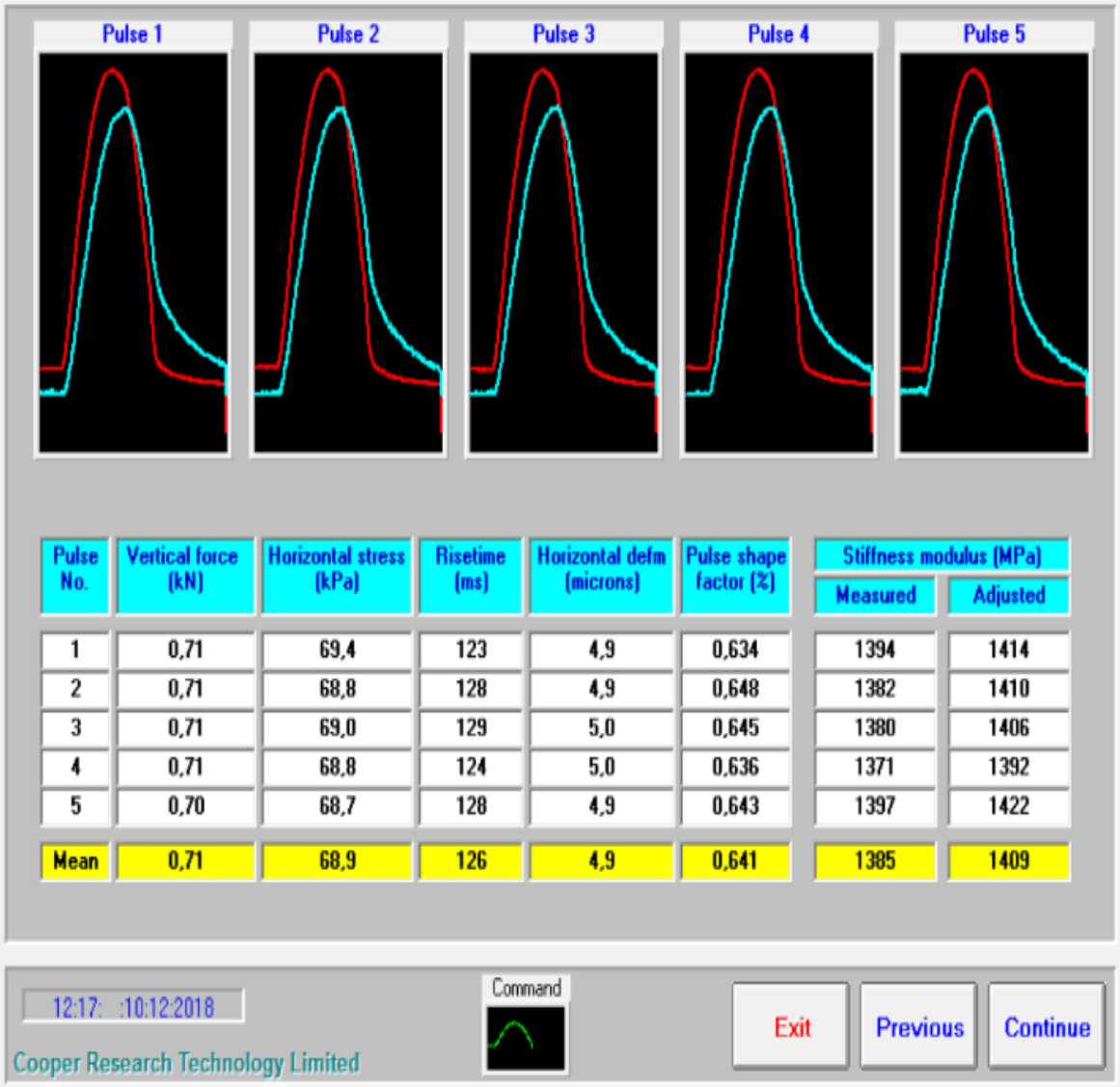
Grafica 9-11 Modulo de rigidez briquetas Superpave (1S)



Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)	
						Measured	Adjusted
1	0,80	77,5	125	4,9	0,650	1573	1608
2	0,80	78,0	123	5,0	0,654	1543	1580
3	0,79	77,1	121	5,0	0,649	1534	1567
4	0,79	77,4	125	5,0	0,654	1527	1563
5	0,79	77,5	124	5,0	0,663	1547	1590
Mean	0,79	77,5	124	5,0	0,654	1545	1582

Módulo de rigidez. Briqueta 1S (Superpave)

Grafica 9-12 Módulo de rigidez briquetas Superpave (2S)



Pulse No.	Vertical force (kN)	Horizontal stress (kPa)	Risetime (ms)	Horizontal defm (microns)	Pulse shape factor (%)	Stiffness modulus (MPa)	
						Measured	Adjusted
1	0,71	69,4	123	4,9	0,634	1394	1414
2	0,71	68,8	128	4,9	0,648	1382	1410
3	0,71	69,0	129	5,0	0,645	1380	1406
4	0,71	68,8	124	5,0	0,636	1371	1392
5	0,70	68,7	128	4,9	0,643	1397	1422
Mean	0,71	68,9	126	4,9	0,641	1385	1409

Módulo de rigidez. Briqueta 2S (Superpave)

9.4 Ensayo de resistencia a la tracción indirecta

El ensayo de tracción indirecta reproduce el estado de tensiones en la fibra inferior de la capa asfáltica o zona de tracción. Es un método practico y sencillo para caracterizar las propiedades de las mezclas bituminosas o evaluar el fallo provocado por tensiones de tracción (Universidad Politecnica de Cataluña, 2019).

Este ensayo tiene el mismo procedimiento de evaluación del Ensayo Marshall, donde se aplica una carga de compresión diametral a lo largo de las caras opuestas de la probeta cilíndrica. Generando

un esfuerzo de tracción en el diámetro del plano de carga vertical, lo que produce una rotura en el plano diametral (Universidad Politecnica de Cataluña, 2019).

Se mide la carga de rotura de las probetas cilíndricas, además se puede estimar el desplazamiento vertical y deformación horizontal de la probeta. Se pueden ensayar briquetas fabricadas en el laboratorio y núcleos tomados in situ (Wahr, Maripangui, Diaz, & Universidad Politecnica de Cataluña, s. f.).

Foto 9-3 Ensayo de resistencia a la tracción indirecta



9.4.1 Resultados obtenidos de las briquetas Marshall y Superpave

Los resultados obtenidos de carga de falla, altura y diámetro permiten determinar el valor de la resistencia a la tracción indirecta. La resistencia a tracción indirecta esta expresada en kg/cm ^{2}.

La ecuación que permite determinar la tracción indirecta es la siguiente:

Ecuación 9-1 Resistencia a la tracción indirecta

$$T = \frac{Q}{H \times D \times \pi}$$

Tabla 9-14 Resistencia a la tracción indirecta (kg/cm2)

Método de Compactación	Briqueta	Carga de falla de la probeta	Altura	Diámetro	Resistencia a la Tracción Indirecta
	-	Q	H	D	T
		(lb)	(mm)	(mm)	(kg/cm²)
Marshall	1	700	71.50	102.28	1.38
	2	550	73.60	102.13	1.06
	3	600	73.30	102.10	1.16
Superpave	1	1150	64.28	100.00	2.59
	2	890	64.85	100.01	1.99
	3	1050	64.45	100.05	2.36

10. CAPITULO X: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

10.1 CONCLUSIONES

- Al realizarse la valoración y ejecución de los ensayos de laboratorio, se concluyó que la mejor opción de material fresado (RAP) fue la muestra obtenida de la Av. Napo y Granada. El porcentaje de asfalto residual obtenido fue de 6.5%, en comparación con la muestra obtenida de las Calles Dr. José Fernández Salvador y Julio Larrea que fue de 10.5%.
- La selección de la emulsión asfáltica para el diseño de mezclas asfálticas en frio, dependerá del tipo de mezcla (en planta o en vía) y de las gradaciones del pavimento fresado RAP (abierta o cerrada). Las especificaciones para este diseño se establecen Manual Básico de Emulsiones Asfálticas MS N°19 (Asphalt Institute). La emulsión asfáltica utilizada en el trabajo de investigación cumple con los parámetros que requiere este diseño.
- La gradación de pavimento fresado (RAP) cumple con las especificaciones del MOP 001 F 2002 Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes, Manual Básico de Emulsiones Asfálticas MS N°19 y Manual NEVI-12 Volumen 3 en la Sección 811-5: “Agregados para mezclas asfálticas en frio”; es de ½” (12.5 mm).
- El diseño de la mezcla asfáltica maestra se realizó usando RAP como agregado único y se utilizó 2.5% de emulsión asfáltica. Los criterios de selección del contenido de emulsión asfáltica se consideraron en base a los resultados obtenidos de estabilidad y flujo. Los resultados cumplen con las especificaciones establecidas MOP 001 F 2002 Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes.
- La mezcla asfáltica modificada con grano de caucho en comparación con la mezcla asfáltica no modificada presento perdida de estabilidad y aumento de flujo. En conclusión, la mezcla asfáltica modificada no cumple con los parámetros de flujo de la Norma ASTM 1560 que establece un valor máximo de 18. Considerando que la adición del grano de caucho se realizó por vía seca, el proceso de digestión no se produce debido a que el grano de caucho fue utilizado como parte de los agregados no como modificador de la emulsión asfáltica CSS-1h.
- La pérdida de estabilidad de las briquetas ensayadas con grano de caucho (1-4 mm), a través del Método Marshall Modificado no pasaron la prueba al ser sumergidas en agua durante 22h a una temperatura de 60 °C. Por lo tanto, se concluyó que el grano de caucho no puede ser utilizado como sustituto del agregado nuevo de acuerdo a lo especificado en el Manual NEVI-12 Volumen 6 Capitulo 6.112.2 “Recuperación de Pavimentos con Emulsiones Asfálticas en Sitio”.
- Después de realizar el ensayo Rice para obtener el porcentaje de vacíos de la mezcla, se determinó que las muestras compactadas por el Método Marshall no cumplen los parámetros establecidos del Diseño Marshall Modificado, Método de Illionois. En conclusión, podemos establecer que el diseño de mezclas asfálticas con pavimento fresado (RAP) con contenido de asfalto residual de 6.51% no es apto para realizarse a través del Diseño Marshall.
- Las briquetas diseñadas con el Método Superpave obtuvieron un porcentaje de vacíos de aire (Va) del 4%. Este valor cumple con las especificaciones establecidas por el Instituto del Asfalto (SP-2) y con la Norma AASHTO R35-04, que establecen para este tipo de mezclas un Va del 4%.
- La durabilidad de la estructura de un pavimento depende de la presencia de contenido de aire, es por esta razón que la mezcla asfáltica diseñada a través del Método Superpave es la mejor

opción. Debido a que una mezcla asfáltica porosa desgastara a las capas inferiores de la estructura del pavimento.

- El ensayo de módulo de rigidez permite determinar la deformación horizontal (µm) de la mezcla asfáltica. El Organismo de Normalización en España a través de la norma UNE-EN 12697:26 2012 Anexo C.2.2.3.4 Nota 2 establece que el valor de la deformación horizontal es de 5±2 (µm); en base a esta especificación los resultados obtenidos de las briquetas compactadas por el método Marshall están dentro del límite de deformación horizontal. El valor de la deformación horizontal para la briqueta 1M es de 5 µm y de la briqueta 2M es de 5 µm.
- Las briquetas diseñadas con la metodología Superpave si cumplen con los valores de deformación horizontal especificados en la norma UNE-EN 12697:26 2012 Anexo C.2.2.3.4 Nota 2 que establece un valor de deformación horizontal de 5±2 (µm). El valor de la deformación horizontal para la briqueta 1S es de 5 µm y de la briqueta 2S es de 4.90 µm.
- El módulo de rigidez evaluado a la temperatura de 20°C y con una deformación controla de 5 micrones con intervalos de tiempo entre el inicio de pulso de carga y la carga máxima de 0.12 segundos disminuye su valor para briquetas diseñadas con la Metodología Marshall. El valor promedio de módulo de rigidez a una temperatura de 20°C es de 813 MPa, este valor no cumple con las especificaciones de la Norma MOP 001 F 2002 Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes, que estipula para capas de rodadura un módulo de rigidez satisfactorio de 3000 MPa a 4000 MPa y para mezclas asfálticas tolerables de 2500 MPa a 3000 Mpa y 4000 MPa a 5000 MPa.
- Se realizó el mismo análisis de módulo de rigidez para briquetas moldeadas a través de la Metodología Superpave, obteniendo un valor de módulo de rigidez promedio de 1496 MPa. Este valor no cumple con los valores tolerables especificados en la Norma MOP 001 F 2002 Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes.
- Al comparar los valores de módulo de rigidez obtenidos de la Metodología Marshall y Metodologia Superpave se observó un incremento de 683 MPa para aquellas briquetas diseñadas con el método Superpave. Basados en estos resultados, el método de diseño Superpave es la mejor opción para el diseño de mezclas asfálticas con material fresado (RAP) y emulsión asfáltica.

10.2 RECOMENDACIONES

- Al utilizarse grano de caucho triturado de neumáticos fuera de uso (NFU) en una mezcla asfáltica con RAP y emulsión, se recomienda que la cantidad a utilizarse este en el rango de 1% al 3% del peso de los agregados de la briqueta de diseño (1100 gr). Al sobrepasarse estos rangos se produce una compactación superficial de la briqueta y perdida de material.
- El Método del Instituto del Asfalto para Mezclas Asfálticas Recicladas en Frio con gradación cerrada para ser mezcladas en vía, recomienda que la emulsión asfáltica que debe emplearse tendrá las siguientes características: rotura lenta, asfalto duro y viscosidad baja. La emulsión asfáltica seleccionada para el diseño de la mezcla asfáltica reciclada en frio fue la CSS-1h.
- Es recomendable que el contenido de asfalto residual se obtenga a través del Método de Ignición ASTM D6307-16, ya que este ensayo brinda resultados más certeros; en comparación con el Ensayo de Asfalto Residual por Centrifugación ASTM D2172 M.

- Previo a la ejecución de la caracterización del pavimento fresado (RAP), se recomienda obtener el porcentaje de asfalto residual presente en la muestra. Esto para evitar ejecutar los ensayos que están descritos en el Manual Básico de Emulsiones Asfálticas MS N°19 (Asphalt Institute) Capitulo 9: “Reciclaje de Pavimentos Asfalticos”.
- En el Ensayo de Determinación del contenido de asfalto a través de la extracción cuantitativa de mezclas de pavimento bituminoso (Centrífuga): ASTM D2172 M, no se recomienda la utilización de gasolina. Debido a que, durante el proceso de extracción cuantitativa del asfalto, el equipo de roto vapor no logra separar el asfalto de la gasolina. La muestra que se obtendría, estaría alterada químicamente.
- La incorporación de grano de caucho de la mezcla asfáltica, puede implementarse a través de la vía húmeda. Ya que al modificar la composición de la emulsión asfáltica las propiedades mecánicas del caucho se podrían aprovechar de mejor manera. Esta alternativa se podría corroborar al diseñar briquetas con material fresado (RAP) a través de la metodología Superpave.
- Se recomienda para futuras investigaciones la incorporación de agentes rejuvenecedores, para incrementar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica. Esto permitiría restaurar las propiedades químicas del asfalto residual.
- Se sugiere que para emplear la metodología Marshall se verifique que el equipo de compactación este en óptimas condiciones, ya que la fuerza del martillo puede disminuir y se puede producir rozamiento. Esto afectaría la compactación de las briquetas y disficulates al momento de desmoldar las muestras.

BIBLIOGRAFIA

AASHTO. Superpave Volumetric Design for Hot Mix Asphalt (HMA), Pub. L. No. R35-04, 15 (2004). EEUU. Recuperado de https://www.aashtofree.com/wp-content/uploads/2018/03/PART-1B.pdf

AASHTO. Superpave Volumetric Mix Design, Pub. L. No. M323-07, 11 (2007). EEUU. Recuperado de https://www.aashtofree.com/wp-content/uploads/2018/03/PART-1B.pdf

Anderson, B. M., Turner, P., & Peterson, B. (s. f.). Making Rap Work in Superpave.

Anderson, M. (2005). Using RAP in the Superpave Mix Design System Acknowledgments. *Asphalt Insitute*, 66.

Armas, J. J., & Baño, N. (2013). *Estudio de factibilidad para la fabricacion y comercializacion de productos en caucho, vinil de caucho, etc.) en la cuidad de Quito*. Universidad Politecnica Salesiana Sede Quito.

Arun, M. P., & Ganesh, P. D. (2013). Laboratory E valuation of Usage of Waste Tyre Rubber in Bituminous Concrete. *International Journal of Scientific and Research Publications*, *3*(9), 1-7.

Asphalt Recycling and Reclaiming Association. (2001a). Asphalt recycling methods. En F. Miller (Ed.), *Basic Asphalt Recycling Manual* (First, pp. 4-34). Annapolis: Asphalt Recycling and Reclaiming Association.

Asphalt Recycling and Reclaiming Association. (2001b). *Basic Asphalt Recycling Manual*. (F. Miller, Ed.) (First). Annapolis: NHIO1-022.

Asphalt Recycling and Reclaiming Association. (2001c). Cold Recycling-Detailed Project Analysis. En F. Miller (Ed.), *Basic Asphalt Recycling Manual* (First, pp. 191-202). Annapolis: NHIO1-022.

Asphalt Recycling and Reclaiming Association. (2001d). Cold Recycling-Mix Design. En F. Miller (Ed.), *Basic Asphalt Recycling Manual* (First, pp. 203-214). Annapolis: NHIO1-022.

Asphalt Recycling and Reclaiming Association. (2001e). Project Evaluation. En F. Miller (Ed.), *Basic Asphalt Recycling Manual* (First, pp. 35-53). Annapolis: NHIO1-022.

Asphalt Recycling and Reclaiming Association. (2001f). Rehabilitation Strategies. En F. Miller (Ed.), *Basic Asphalt Recycling Manual* (First, pp. 27-34). Annapolis: NHIO1-022.

ASTM International. Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys (2018). EEUU: ASTM International. Recuperado de http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D6433-18

Bitumix CVV Especialidades Asfalticas. (2015). Metodologia SUPERPAVE para el diseño de mezclas asfalticas. *Journal of Molecular Structure*, (Dpto.Gestion de Calidad y Desarrollo), 15. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2015.02.030

Bukowski, J. (2014). The Use of Recycled Tire Rubber to Modify Asphalt Binder and Mixtures. *TechBrief*, (September), 1-14. https://doi.org/10.1590/S0102-695X2008000400006

Castañeda, C. A., Escobar, G. A., & Lopez, L. A. (2011). *APLICACIÓN DEL MÉTODO MARSHALL Y*

GRANULOMETRÍA SUPERPAVE EN EL DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA TEMPLADA CON EMULSIÓN ASFÁLTICA. Universidad de El Salvador.

Castro, G. (2007). Reutilizacion, reciclado y disposicion final de neumaticos. Argentina: Departamento de Ingenieria Mecanica F.I.U.B.A.

Castro, G. (2008). Materiales y compuestos para la industria del neumatico. Argentina: Departamento de Ingenieria Mecanica F.I.U.B.A.

Centro de Investigaciones Viales. (2008). *Reciclado de pavimentos asfálticos en frío. Una forma de utilizar totalmente el RAP para el mantenimiento y rehabilitación de la red caminera.* Buenos Aires. Recuperado de www.frlp.utn.edu.ar/lemac lemac@frlp.utn.edu.ar Tel:

Chicaiza, M. F. (2013). *REHABILITACIÓN VIAL CON RECICLADO Y EMULSION ASFALTICA CON APLICACIÓN EN LAS VIAS DE LA CIUDAD DE QUITO. (AV. SIMON BOLIVAR)*. *FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL*. Universidad Central del Ecuador. https://doi.org/10.1111/1529-1006.01431

Cloud, J. (2016). Contacto. Recuperado de https://prezi.com/1zhjvztgalwg/contactos/

Diaz, C. M., & Castro, L. C. (2017). *Implementacion del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfalticas y garanatizar pavimentos sostenibles en Bogota*. Universidad Santo Tomas. Recuperado de https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2633/Diazcesar2017.pdf

Echeverria, M. J. (2016). *ESTUDIO DEL PROCEDIMIENTO DE COMPACTACIÓN EN LABORATORIO PARA MEZCLAS RECICLADAS EN FRÍO CON EMULSIÓN BITUMINOSA*. *Universidad de Granada*. Universidad de Granada. https://doi.org/10.1016/j.bmc.2007.05.036

El Telegrafo. (2018, junio 25). Nuevos productos nacen del recilaje de llantas. *Redaccion Economia*, p. 1. Recuperado de http://tinyurl.com/yd74aqe9

El Universo. (2018, junio 3). 2.4 millones de neumaticos se desechan cada año en Ecuador. *Ecologia*, p. 1. Recuperado de https://www.eluniverso.com/vida/2018/06/03/nota/6790121/24-millones-neumaticos-se-desechan-cada-ano-pais

Garnica, P., Delgado, H., & Gomez, J. A. (2004). ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE MÉTODO DE COMPACTACIÓN EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS. Querétaro.

Hernández, P., & Sandoval, G. (2010). *Evaluación del comportamiento mecánico de Mezclas Asfálticas utilizando pavimento reciclado, ligantes hidráulicos y emulsiones asfálticas*. Pontificia Universidad Catolica de Chile. Recuperado de https://repositorio.uc.cl/bitstream/handle/11534/1405/561158.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Holubka, I. M., Salaiová, B., Holubka, M., & Salaiova, B. (2013). The Use of Crushed Rubber in Asphalt Mixtures of Road Pavements, 51-55.

Instituto del Asfalto. (2001a). Metodo de Diseño de Mezclas. En J. Huffman (Ed.), *Asphalt Emulsion Manufactures Association* (pp. 106-112). Lexington.

Instituto del Asfalto. (2001b). Mezclas con agregados. En J. Huffman (Ed.), *Asphalt Emulsion Manufactures Association* (Vol. I, pp. 74-88). Lexington.

Instituto del Asfalto. (2001c). Superpave Mix Design. En Intituto del Asfalto (Ed.), *Superpave Mix Design* (3.ª ed., pp. 45-62). Lexington: Instituto del Asfalto.

Instituto del Asfalto. (2005a). Ensayos. En J. Huffman (Ed.), *Asphalt Emulsion Manufactures Association* (pp. 32-39). Lexington: Instituto del Asfalto.

Instituto del Asfalto. (2005b). Reciclado de pavimentos asfalticos. En Instituto del Asfalto (Ed.), *Asphalt Emulsion Manufactures Association* (pp. 98-99). Lexington: Asphalt Emulsion Manufactures Association.

Instituto del Asfalto. (2018). An Introduction to Asphalt Emulsions. Recuperado de http://asphaltmagazine.com/an-introduction-to-asphalt-emulsions/

Instituto Ecuatoriano de Normalizacion. Productos derivados del petroleo. Asfalto modificado con caucho reciclado. Requisitos e inspeccion (2013). Ecuador.

Instituto Nacional de Vias. (s. f.). Artículo 460-07. Recuperado de ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Especificaciones/Articulo460-07.pdf

Javier, R. T. (2013). *Estudio de materiales reciclados en firmes de carreteras. Escuela Técnica Superior De Ingenieros De Caminos, Canales Y Puertos Área*. Universidad de Cantabria.

Jiménez, M., Sibaja, D., & Molina, D. (2009). Mezclas asfálticas en frío en Costa Rica, conceptos, ensayos y especificaciones. *Infraestructura*, *21*, 18-29.

Jimenez, M., Ulloa, A., & Molina, D. (2010). *Proyecto N° UI-05-09 IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO Y PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO DE LABORATORIO PARA MEZCLAS EN FRÍO PARA LA REPARACIÓN DE BACHES EN COSTA RICA*. San Jose. Recuperado de http://www.lanamme.ucr.ac.cr/sitio-nuevo/images/productos-PITRA/Investigaciones/2009/UI-05-09. IMPLEMENTACION DEL DISENO Y PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO DE LABORATORIo.pdf

Kanta, S. (1999). *Recycling of waste tyres: A possible optio for deriving energy*. *Stem Cells*. Rourkela National Institute of Technology. https://doi.org/10.1002/stem.170357

McDaniel, R. S., & Anderson, M. (2001). *NCHRP Report 452 Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician's Manual*. Washington, D.C. Recuperado de http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_452.pdf

McDaniel, R. S., Soleymani, H., & Shah, A. (2002). *Use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Under Superpave Specifications : A Regional Pooled Fund Project.* West Lafayette. https://doi.org/10.5703/1288284313465.This

Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Manual de Especificaciones MOP – 001 – F 2002 Construccion de Caminos y Puentes del Ministerio de Obras Publicas., Pub. L. No. MOP-001-F 2002, 772 (2002). Quito, Ecuador. Recuperado de http://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/01-07-2013_ConcursoPublico_StoDomingo-

Esmeraldas-Especificaciones-Tecnicas.pdf

Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2013a). Manual Nevi-2012 VOLUMEN Nº 3 ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CAMINOS Y PUENTES (pp. 420-422). Quito, Ecuador.

Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12-MTOP volumen N° 6 conservacion vial, Pub. L. No. NEVI-12, 6 Nevi-12 - MTOP 1 (2013). Quito, Ecuador. Recuperado de http://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/12/01-12-2013_Manual_NEVI-12_VOLUMEN_6.pdf

Ministerio del Ambiente. (2017a). MAE consolida su Plan Nacional de movilización de neumáticos fuera de uso. Recuperado de http://www.ambiente.gob.ec/mae-consolida-su-plan-nacional-de-movilizacion-de-neumaticos-fuera-de-uso/

Ministerio del Ambiente. (2017b). Ministerio del Ambiente promueve Plan Nacional de Movilización de Neumáticos. Recuperado de http://www.ambiente.gob.ec/ministerio-del-ambiente-promueve-el-plan-nacional-de-movilizacion-de-neumaticos/

Miró, R., Centeno, M., Martínez, A., & Pérez, F. (2007). Evaluacion de los metodos de reciclado y rehabilitacion de firmes a partir del analisis de los tramos experimentales del proyecto europeo PARAMIX. *Infraestructura Vial*, *18*(Pavimentos Flexibles), 41-67. Recuperado de http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91117204

Montejo, A. (2008a). Reciclaje de Pavimentos Flexibles. En A. Montejo (Ed.), *Ingenieria de Pavimentos Evaluacion estructural, obras de mejoramiento y nuevas tecnologias* (3.ª ed., pp. 273-290). Bogota, D.C: Universidad Catolica de Colombia.

Montejo, A. (2008b). Superpave. En A. Montejo (Ed.), *Ingenieria de Pavimentos Evaluacion estructural, obras de mejoramiento y nuevas tecnologias* (3.ª ed., pp. 355-400). Bogota, D.C: Universidad Catolica de Colombia.

Oke, O. L. (2010). *A Study on the Development of Guidelines for the Production of Bitumen Emulsion Stabilised Raps for Roads in the Tropics*. *University of Nottingham*. The University of Nottingham. Recuperado de https://www.nottingham.ac.uk/research/groups/ntec/documents/theses/oluseyiphd.pdf

OPONEO.ES. (2015). Estructura de los neumaticos: la funcion de cada uno. Recuperado de https://www.oponeo.es/articulo/estructura-de-los-neumaticos-la-funcion-de-cada-uno

Pennington, D. G. (1996). *Effects of Waste Tires, Waste Tire Facilities, and Waste Tire Projects on The Environment*. Sacramento.

Piggott, M. R., & Woodhams, R. T. (1979). *Recycling of Rubber Tires in Asphalt Paving Materials*. Toronto.

Rondon, H. A., & Reyes, F. A. (2015a). Emulsiones Asfalticas. En ECOE Ediciones (Ed.), *Pavimentos Materiales, construccion y diseño* (1.ª ed., pp. 54-58). Bogota, D.C: Pavimentos Materiales, construccion y diseño.

Rondon, H. A., & Reyes, F. A. (2015b). *Pavimentos Materiales, construccion y diseño*. *ECOE*

Ediciones. Bogota: ECOE Ediciones.

Sandoval, G. (2010). *ESTUDIO DE COMPORTAMIENTO DEL MÓDULO DE RIGIDEZ EN MEZCLAS ASFÁLTICAS, DETERMINADO MEDIANTE ENSAYOS DE LABORATORIO Y OBTENIDOS CON INSTRUMENTACIÓN DE TERRENO*. Pontificia Universidad Catolica de Chile. Recuperado de https://repositorio.uc.cl/bitstream/handle/11534/1405/561158.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Sorgato, V. (2016, junio 5). Llantas, un desecho peligroso y reciclable. *El Comercio*, p. 1. Recuperado de https://www.elcomercio.com/tendencias/llantas-desecho-reciclaje-contaminacion-medioambiente.html

Takallou, M. B., & Takalluo, H. B. (2013). Benefits of Recycling Waste Tires In Rubber Asphalt Paving. *Transportation Research Record 1310*, 87-92.

Thenoux, G., & García, G. (2011). Estudio de Técnicas de Reciclado en Frío. *Revista Ingenieria de Construccion*, *35*(January), 14. https://doi.org/10.7764/ricuc.16.1.199

TxDOT. (2005). Asphalt Emulsions. Construction Division, Texas Department of Transportation., (October), 1-5. Recuperado de http://ftp.dot.state.tx.us/pub/txdot-info/cst/AsphaltEmulsions.pdf

Universidad de las Americas Puebla. (2013). CAPITULO 3 Desarrollo del método de diseño Superpave. Recuperado de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/caceres_m_ca/capitulo3.pdf

Universidad Politecnica de Cataluña. (2019). Capitulo 3 El Ensayo de traccion indirecta. Recuperado de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3252/50777-9.pdf?sequence=9

Vila, R. (2018). *Resultados de pruebas de desempeño a mezclas asfálticas*. Guayaquil.

Viviendo en la Tierra. (2018). GRIN: Gestion y reciclaje integral de llantas. Recuperado de https://verdeporquetequieroverde.files.wordpress.com/2018/02/schermata-2018-02-06-alle-12-18-26.png

Wahr, C., Maripangui, E., Diaz, M., & Universidad Politecnica de Cataluña. (s. f.). Capitulo 3 El Ensayo de traccion indirecta. Recuperado de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3252/50777-9.pdf?sequence=9

Yanez, G. (2006). Manual de practicas. Quito: Pontificia Universidad Catolica del Ecuador.

ANEXOS

Tabla 0-1 Determinación del contenido de ligante asfaltico en el pavimento fresado-muestra 1

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR							
FACULTAD DE INGENIERIA							
ESCUELA DE CIVIL							
AREA DE PAVIMENTOS							
HOJA DE CAMPO							
DETERMINACION DEL CONTENIDO DE LIGANTE ASFALTICO DE MEZCLAS ASFALTICAS ASFALTICAS EN CALIENTE POR EL METODO DE IGNICION							
NORMA:		AASHTO T-308-08					
ID MUESTRA:		Muestra 1					
ORIGEN DE LA MUESTRA:		Pavimento Fresado Av. Napo y Granada					
¿SE DETERMINO CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MUESTRA?					No	**MASA CTE.**	-
CONTENIDO DE HUMEDAD [%]:			-	*Determinación por AASHTO T-329*			
Mb	3382,17	(gr)	Masa del conjunto bandeja (balanza externa)				
Mti	4583,17	(gr)	Masa total inicial (balanza externa)				
Mi	1201	(gr)	Masa de muestra inicial (Mti-Mb)				
Mth	4588	(gr)	Masa total (balanza horno) (Aplica en Método A)				
ΔM	4,83	(gr)	Comprobar si esta dentro de ±5 (Aplica en Método A)				
Mtf	4506,66	(gr)	Masa total final (balanza externa)				
Mf	1124,49	(gr)	Masa de muestra inicial (Mtf-Mb)				
Pb	6,43%	(%)	Porcentaje de perdida (Valor del ticket) [%] (Aplica en Método A)				
P'b	6,37%	(%)	Porcentaje de perdida [%] ([Mi-Mf]/Mi)				
¿CORRECCION INCLUIDA EN EL TICKET?				NO	(Aplica en Método A)		
Pb c		Contenido de ligante corregido [%]					
T		Temperatura de en sayo [°C]					

Tabla 0-2 Determinación del contenido de ligante asfaltico en el pavimento fresado-muestra 2

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR							
FACULTAD DE INGENIERIA							
ESCUELA DE CIVIL							
AREA DE PAVIMENTOS							
HOJA DE CAMPO							
DETERMINACION DEL CONTENIDO DE LIGANTE ASFALTICO DE MEZCLAS ASFALTICAS ASFALTICAS EN CALIENTE POR EL METODO DE IGNICION							
NORMA:		AASHTO T-308-08					
ID MUESTRA:		Muestra 2					
ORIGEN DE LA MUESTRA:		Pavimento Fresado Av. Napo y Granada					
¿SE DETERMINO CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MUESTRA?					No	**MASA CTE.**	-
CONTENIDO DE HUMEDAD [%]:			-		*Determinación por AASHTO T-329*		
Mb	3395,79	(gr)	Masa del conjunto bandeja (balanza externa)				
Mti	4601,06	(gr)	Masa total inicial (balanza externa)				
Mi	1205,27	(gr)	Masa de muestra inicial (Mti-Mb)				
Mth	4606,2	(gr)	Masa total (balanza horno) (Aplica en Método A)				
ΔM	5,14	(gr)	Comprobar si esta dentro de ±5 (Aplica en Método A)				
Mtf	4521,1	(gr)	Masa total final (balanza externa)				
Mf	1125,31	(gr)	Masa de muestra inicial (Mtf-Mb)				
Pb	6,59%	(%)	Porcentaje de perdida (Valor del ticket) [%] (Aplica en Método A)				
P'b	6,63%	(%)	Porcentaje de perdida [%] ([Mi-Mf]/Mi)				
¿CORRECCION INCLUIDA EN EL TICKET?				NO	(Aplica en Método A)		
Pb c		Contenido de ligante corregido [%]					
T		Temperatura de en sayo [°C]					

Tabla 0-3 Promedio del contenido de ligante asfaltico en el pavimento fresado Av. Napo y Granada

Promedio de Asfalto Residual		
Muestra:	Av. Napo y Granada	
Muestra	**Porcentaje de Perdida**	**Promedio de Asfalto Residual**
-	(%)	(%)
1	6,37%	6,50%
2	6,63%	

Tabla 0-4 Determinación del contenido de ligante asfaltico en el pavimento fresado-muestra 3

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR							
FACULTAD DE INGENIERIA							
ESCUELA DE CIVIL							
AREA DE PAVIMENTOS							
HOJA DE CAMPO							
DETERMINACION DEL CONTENIDO DE LIGANTE ASFALTICO DE MEZCLAS ASFALTICAS ASFALTICAS EN CALIENTE POR EL METODO DE IGNICION							
NORMA:		AASHTO T-308-08					
ID MUESTRA:		Muestra 3					
ORIGEN DE LA MUESTRA:		Pavimento Fresado Calles Dr. Jose Fernandez Salvador y Julio Larrea					
¿SE DETERMINO CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MUESTRA?					No	**MASA CTE.**	-
CONTENIDO DE HUMEDAD [%]:		-		*Determinación por AASHTO T-329*			
Mb	3404,00	(gr)	Masa del conjunto bandeja (balanza externa)				
Mti	5503,67	(gr)	Masa total inicial (balanza externa)				
Mi	2099,67	(gr)	Masa de muestra inicial (Mti-Mb)				
Mth	5508,10	(gr)	Masa total (balanza horno) (Aplica en Método A)				
ΔM	4,43	(gr)	Comprobar si esta dentro de ±5 (Aplica en Método A)				
Mtf	5284,48	(gr)	Masa total final (balanza externa)				
Mf	1880,48	(gr)	Masa de muestra inicial (Mtf-Mb)				
Pb	10,39%	(%)	Porcentaje de perdida (Valor del ticket) [%] (Aplica en Método A)				
P'b	10,44%	(%)	Porcentaje de perdida [%] ([Mi-Mf]/Mi)				
¿CORRECCION INCLUIDA EN EL TICKET?				NO	(Aplica en Método A)		
Pb c		Contenido de ligante corregido [%]					
T		Temperatura de ensayo [°C]					

Tabla 0-5 Determinación del contenido de ligante asfaltico en el pavimento fresado-muestra 4

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR							
FACULTAD DE INGENIERIA							
ESCUELA DE CIVIL							
AREA DE PAVIMENTOS							
HOJA DE CAMPO							
DETERMINACION DEL CONTENIDO DE LIGANTE ASFALTICO DE MEZCLAS ASFALTICAS ASFALTICAS EN CALIENTE POR EL METODO DE IGNICION							
NORMA:		AASHTO T-308-08					
ID MUESTRA:		Muestra 4					
ORIGEN DE LA MUESTRA:		Pavimento Fresado Calles Dr. Jose Fernandez Salvador y Julio Larrea					
¿SE DETERMINO CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MUESTRA?					No	**MASA CTE.**	-
CONTENIDO DE HUMEDAD [%]:			-		*Determinación por AASHTO T-329*		
Mb	3384,83	(gr)	Masa del conjunto bandeja (balanza externa)				
Mti	4885,17	(gr)	Masa total inicial (balanza externa)				
Mi	1500,34	(gr)	Masa de muestra inicial (Mti-Mb)				
Mth	4890,50	(gr)	Masa total (balanza horno) (Aplica en Método A)				
ΔM	5,33	(gr)	Comprobar si esta dentro de ±5 (Aplica en Método A)				
Mtf	4730,00	(gr)	Masa total final (balanza externa)				
Mf	1345,17	(gr)	Masa de muestra inicial (Mtf-Mb)				
Pb	10,48%	(%)	Porcentaje de perdida (Valor del ticket) [%] (Aplica en Método A)				
P'b	10,34%	(%)	Porcentaje de perdida [%] ([Mi-Mf]/Mi)				
¿CORRECCION INCLUIDA EN EL TICKET?				NO	(Aplica en Método A)		
Pb c		Contenido de ligante corregido [%]					
T		Temperatura de ensayo [°C]					

Tabla 0-6 Promedio del contenido de ligante asfaltico en el pavimento fresado-Calles Dr. José Fernández Salvador y Julio Larrea

Promedio de Asfalto Residual		
Muestra:	Calles Dr. Jose Fernandez Salvador y Julio Larrea	
Muestra	**Porcentaje de Perdida**	**Promedio de Asfalto Residual**
-	(%)	(%)
3	10,44%	10,39%
4	10,34%	

Tabla 0-7 Granulometría del agregado fino N°4

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR					
FACULTAD DE INGENIERIA					
ESCUELA DE CIVIL					
Laboratorio de Suelos					
Obra:	Fresado de carpeta asfaltica Av.Napo y Granada				
Localizacion:	Av. Napo y Granada (DMQ)				
Muestra N°:	1				
Profundidad:	7,5 cm				
Descripcion:	Pavimento Fresado (RAP)				
Operador:	-				
Fecha:	1/8/2018				
Masa Inicial:	1001	gr			

Tamiz		**Masa Retenida**	**Masa Retenida Acumulada**	**% Retenido Acumulado**	**% Pasa**
(in)	(mm)	(gr)	(gr)		
3/8	9,500	0,00	0,00	0,00	100,00
N°4	4,750	3,00	3,00	0,30	99,70
N°8	2,360	348,00	351,00	35,06	64,94
N°16	1,180	246,00	597,00	59,64	40,36
N°30	0,600	171,00	768,00	76,72	23,28
N°50	0,300	120,00	888,00	88,71	11,29
N°100	0,150	55,00	943,00	94,21	5,79
N°200	0,075	29,00	972,00	97,10	2,90
Pasa N°200		29,00	1001,00	100,00	0,00

Tabla 0-8 Granulometría del agregado intermedio 1/2"

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR					
FACULTAD DE INGENIERIA					
ESCUELA DE CIVIL					
Laboratorio de Suelos					
Obra:	Fresado de carpeta asfaltica Av.Napo y Granada				
Localizacion:	Av. Napo y Granada (DMQ)				
Muestra N°:	1				
Profundidad:	7,5 cm				
Descripcion:	Pavimento Fresado (RAP)				
Operador:	-				
Fecha:	1/8/2018				
Masa inicial:	5000	gr			

Tamiz		Masa Retenida	Masa Retenida Acumulada	% Retenido Acumulado	% Pasa
(in)	(mm)	(gr)	(gr)		
1/2	12,50	406,00	406,00	8,12	91,88
3/8	9,50	292,00	698,00	13,96	86,04
N°4	4,75	1147,00	1845,00	36,90	63,10
N°8	2,36	839,00	2684,00	53,68	46,32
N°16	1,18	815,00	3499,00	69,98	30,02
N°30	0,600	596,20	4095,20	81,90	18,10
N°50	0,300	435,60	4530,80	90,62	9,38
N°100	0,150	188,60	4719,40	94,39	5,61
N°200	0,075	121,80	4841,20	96,82	3,18
Pasa N°200		158,80	5000,00	100,00	0,00

Tabla 0-9 Granulometría del agregado grueso ¾"

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR					
FACULTAD DE INGENIERIA					
ESCUELA DE CIVIL					
Laboratorio de Suelos					
Obra:	Fresado de carpeta asfaltica Av.Napo y Granada				
Localizacion:	Av. Napo y Granada (DMQ)				
Muestra N°:	1				
Profundidad:	7,5 cm				
Descripcion:	Pavimento Fresado (RAP)				
Operador:	-				
Fecha:	1/8/2018				
Masa Inicial:	5026	gr			

Tamiz		Masa Retenida	Masa Retenida Acumulada	% Retenido Acumulado	% Pasa
(in)	(mm)	(gr)	(gr)		
1 1/2	37,50	0,00	0,00	0,00	100,00
1	25,00	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4	19,00	107,00	107,00	2,13	97,87
1/2	12,50	335,00	442,00	8,79	91,21
3/8	9,500	321,00	763,00	15,18	84,82
N°4	4,750	1262,20	2025,20	40,29	59,71
N°8	2,360	958,40	2983,60	59,36	40,64
N°16	1,180	845,60	3829,20	76,19	23,81
N°30	0,600	572,00	4401,20	87,57	12,43
N°50	0,300	324,30	4725,50	94,02	5,98
N°100	0,150	166,10	4891,60	97,33	2,67
N°200	0,075	80,60	4972,20	98,93	1,07
Pasa N°200		53,80	5026,00	100,00	0,00

Tabla 0-10 Gravedad especifica agregado fino N°4

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR							
FACULTAD DE INGENIERIA							
ESCUELA DE CIVIL							
Laboratorio de Suelos							
Obra:	Fresado de carpeta asfaltica Av.Napo y Granada						
Localizacion:	Av. Napo y Granada (DMQ)						
Muestra N°:	1						
Profundidad:	7,5 cm						
Descripcion:	Pavimento Fresado (RAP)						
Operador:	-						
Fecha:	1/8/2018						
	Agregado Fino N°4						
Wm=	Masa del matraz (gr)						
Wsmw=	Masa del picnometro, suelo y agua hasta la marca (gr)						
Ww=	Masa del matraz y agua hasta la marca (gr)						
Ws=	Masa del suelo seco al horno (gr)						
W=	Masa del suelo saturado superficialmente seco(gr)						
Gravedad Especifica (Gs)							
$Gs = \frac{W_s}{W_s + W - W_{smw}}$							
Wm=	156,10	gr					
Wsmw=	936,80	gr					
Ww=	658,10	gr					
Ws=	478	gr					
W=	500	gr					
Gs=	2,16						
Gravedad Especifica corregida basado en la densidad del agua a cierta temperatura (Gs T 20°C)							
$Gs_{T\ 20°C} = K \times Gs$							
K=	1						
Gs T 20°C=	2,16						
Absorcion (%)							
$Absorcion\ (\%) = \frac{(W - Ws)}{Ws} \times 100$							
Absorcion (%) =	4,60%						

Tabla 0-11 Gravedad especifica agregado grueso 1 ½"

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR						
FACULTAD DE INGENIERIA						
ESCUELA DE CIVIL						
Laboratorio de Suelos						
Obra:	Fresado de carpeta asfaltica Av.Napo y Granada					
Localizacion:	Av. Napo y Granada (DMQ)					
Muestra N°:	1					
Profundidad:	7,5 cm					
Descripcion:	Pavimento Fresado (RAP)					
Operador:	-					
Fecha:	1/8/2018					
A=	Masa en el aire de la muestra seca en el horno (gr)					
B=	Masa en el aire de la muestra saturada con superficie seca aparente (gr)					
C=	Masa sumergida en agua con muestra saturada (gr)					
Densidad Relativa (Gravedad Especifica) (SH: Seco al horno)						
$SH = \frac{A}{(B-C)}$						
Agregado Grueso 1 1/2"						
A=	4900	gr				
B=	5038	gr				
C=	2950	gr				
SH=	2.35					
Absorcion (%)						
$Absorcion,\% = \left[\frac{(B-A)}{A}\right] \times 100$						
Agregado Grueso 1 1/2"						
A=	4900	gr				
B=	5038	gr				
Absorcion (%)=	2.82%					
Densidad Relativa (Gravedad Especifica) (SSS:Saturada Superficialmente Seca)						
$SSS = \frac{B}{(B-C)}$						
Agregado Grueso 1 1/2"						
B=	5038					
C=	2950					
SSS=	2.41					
Densidad Relativa Aparente (Gravedad Especifica Aparente) (SSS:Saturada Superficialmente Seca)						
$SSS = \frac{A}{(A-C)}$						
Agregado Grueso 1 1/2"						
A=	4900	gr				
C=	2950	gr				
SSS=	2.51					

Tabla 0-12 Ensayo de abrasión (Maquina de Los Ángeles)

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR					
FACULTAD DE INGENIERIA					
ESCUELA DE CIVIL					
Laboratorio de Suelos					
Obra:	Fresado de carpeta asfáltica Av. Napo y Granada				
Localización:	Av. Napo y Granada (DMQ)				
Muestra N°:	1				
Profundidad:	7,5 cm				
Descripción:	Pavimento Fresado (RAP)				
Operador:	-				
Fecha:	1/8/2018				
	Tamaño del Agregado:	Tamiz N°4			
C=	masa inicial de la muestra (gr)				
Y=	masa final de la muestra, retenida en el Tamiz N°12 (gr)				
Ensayo de Abrasión					
$Porcentaje\ Perdido\ (\%) = \left[\frac{(C-Y)}{C}\right] \times 100$					
C=	5000	gr			
Y=	3760	gr			
(%) Perdido=	24,80%				
a=	masa de la muestra antes de la prueba (gr)				
c=	masa de la muestra que pasa el Tamiz N°12				
$\%\ Desgaste = \frac{c}{a} \times 100$					
a=	5000	gr			
c=	1222	gr			
(%) Desgaste=	24,44%				
ESPECIFICACION		**LIMITE**	**RESULTADO**		
NEVI-12 Volumen 3		≤40%	24,44%	Cumple	
MOP-001-F 2002		≤40%	24,44%	Cumple	

Tabla 0-13 Ensayo de desgaste a los sulfatos (agregado grueso ¾")

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR					
FACULTAD DE INGENIERIA					
ESCUELA DE CIVIL					
Laboratorio de Suelos					
Obra:	Fresado de carpeta asfaltica Av.Napo y Granada				
Localizacion:	Av. Napo y Granada (DMQ)				
Muestra N°:	1				
Profundidad:	7,5 cm				
Descripcion:	Pavimento Fresado (RAP)				
Operador:	-				
Fecha:	7/8/2018				
Muestra 1:	Agregado Grueso 3/4				

Tamiz N°	**Peso Inicial (gr)**	**Peso Final (gr)**	**Desgaste (%)**
Retiene 3/4	501	468,60	6,47%
Retiene 1/2	670	656,50	2,01%
Retiene 3/8	330	327,20	0,85%
Retiene N°4	301	292,50	2,82%
	Promedio de Desgaste		3,04%

ESPECIFICACION	**LIMITE**	**RESULTADO**	
NEVI-12 Volumen 3	≤12%	3,04%	Cumple
MOP-001-F 2002	≤12%	3,04%	Cumple

Tabla 0-14 Ensayo de desgaste a los sulfatos (agregado fino N°4)

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE CIVIL

Laboratorio de Suelos

Obra:	Fresado de carpeta asfaltica Av.Napo y Granada
Localizacion:	Av. Napo y Granada (DMQ)
Muestra N°:	2
Profundidad:	7,5 cm
Descripcion:	Pavimento Fresado (RAP)
Operador:	-
Fecha:	7/8/2018

Muestra 2: Agregado Fino N°8

Tamiz N°	Peso Inicial (gr)	Peso Final (gr)	Desgaste (%)
Retiene N°8	101	86,20	14,65%
Retiene N°16	101	83,20	17,62%
Retiene N°30	101	74,40	26,34%
Retiene N°50	101	74,70	26,04%
	Promedio de Desgaste		21,16%

ESPECIFICACION	LIMITE	RESULTADO	
NEVI-12 Volumen 3	≤15%	21,16%	No Cumple
MOP-001-F 2002	≤15%	21,16%	No Cumple

Tabla 0-15 Densidad Bulk (compacta y suelta) y porcentaje de vacíos (agregado fino N°4)

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE CIVIL

Laboratorio de Suelos

Obra:	Fresado de carpeta asfaltica Av.Napo y Granada
Localizacion:	Av. Napo y Granada (DMQ)
Muestra N°:	1
Profundidad:	7,5 cm
Descripcion:	Pavimento Fresado (RAP)
Operador:	-
Fecha:	30/7/2018

Agregado Fino N°4

Densidad Bulk

$$M = \left(\frac{G - T}{V}\right) \qquad M = (G - T) \times F$$

M=	Densidad Bulk de los agregados (kg/m3)
G=	Masa del agregado suelto mas el molde (kg)
T=	Masa del molde (kg)
V=	Volumen del molde (m3)
F=	Factor de medicion (m-3)

Contenido de Vacios

$$Vacios\ (\%) = \frac{[(S \times M) - Da] \times 100}{(S \times Da)}$$

M=	Masa unitaria de los agregados (kg/m3)
S =	Gravedad especifica (en condicion seca)
Da=	Densidad del agua (kg/m3)

MATERIAL SUELTO

Densidad Bulk

G=	5150	gr	G=	5,15	kg
T=	1655	gr	T=	1,655	kg
V=	2735	cm3	V=	0,002735	m3
M=	1,28	gr/cm3			
M=	1277,88	kg/m3			

Contenido de Vacios

M=	1277,88	kg/m3
S =	2,16	-
Da=	998,00	kg/m3
Vacios (%)=	81,75	

MATERIAL COMPACTO

Densidad Bulk

G=	5475	gr	G=	5,475	kg
T=	1655	gr	T=	1,655	kg
V=	2735	cm3	V=	0,002735	m3
M=	1,40	gr/cm3			
M=	1396,71	kg/m3			

Tabla 0-16 Densidad Bulk (compacta y suelta) y porcentaje de vacíos (agregado grueso 1 ½")

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR						
FACULTAD DE INGENIERIA						
ESCUELA DE CIVIL						
Laboratorio de Suelos						
Obra:	Fresado de carpeta asfaltica Av.Napo y Granada					
Localizacion:	Av. Napo y Granada (DMQ)					
Muestra N°:	1					
Profundidad:	7,5 cm					
Descripcion:	Pavimento Fresado (RAP)					
Operador:	-					
Fecha:	30/7/2018					
	Agregado 1 1/2"					
Densidad Bulk						
$M = \left(\frac{G - T}{V}\right)$	$M = (G - T) \times F$					
M=	Densidad Bulk de los agregados (kg/m3)					
G=	Masa del agregado suelto mas el molde (kg)					
T=	Masa del molde (kg)					
V=	Volumen del molde (m3)					
F=	Factor de medicion (m-3)					
Contenido de Vacios						
$Vacios\ (\%) = \frac{[(S \times M) - Da] \times 100}{(S \times Da)}$						
M=	Masa unitaria de los agregados (kg/m3)					
S =	Gravedad especifica (en condicion seca)					
Da=	Densidad del agua (kg/m3)					
MATERIAL SUELTO						
Densidad Bulk						
G=	12506	gr		G=	12,506	kg
T=	3814	gr		T=	3,814	kg
V=	6878	cm3		V=	0,006878	m3
M=	1,26	gr/cm3				
M=	1263,74	kg/m3				
Contenido de Vacios						
M=	1263,74	kg/m3				
S =	2,35	-				
Da=	998,00	kg/m3				
Vacios (%)=	84,01					
MATERIAL COMPACTO						
Densidad Bulk						
G=	13277	gr		G=	13,277	kg
T=	3814	gr		T=	3,814	kg
V=	6878	cm3		V=	0,006878	m3
M=	1,38	gr/cm3				
M=	1375,84	kg/m3				

Tabla 0-17 Contenido de humedad (%w)

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR					
FACULTAD DE INGENIERIA					
ESCUELA DE CIVIL					
Laboratorio de Suelos					
Obra:	Fresado de carpeta asfaltica Av.Napo y Granada				
Localizacion:	Av. Napo y Granada (DMQ)				
Muestra N°:	1				
Profundidad:	7,5 cm				
Descripcion:	Pavimento Fresado (RAP)				
Operador:	-				
Fecha:	1/8/2018				
	1/2"				
p=	contenido total de humedad evaporado del suelo (%)				
W=	masa inicial del suelo (gr)				
D=	masa seca al horno del suelo (gr)				
Contenido de Humedad (%)					
$p = \left(\frac{W - D}{D}\right) \times 100$					
W=	4000	gr			
D=	3979	gr			
p=	0,53%				

Tabla 0-18 Ensayo de penetración

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE CIVIL

Laboratorio de Pavimentos

Obra:	Fresado de carpeta asfáltica Av. Napo y Granada
Localización:	Av. Napo y Granada (DMQ)
Muestra N°:	1
Profundidad:	7,5 cm
Descripción:	Pavimento Fresado (RAP)
Operador:	-
Fecha:	25/8/2018

ENSAYO DE PENETRACION

Ensayo	Penetración (cm/100)	Tiempo (seg)
1	5	5
2	6	5
3	5	5
PROMEDIO:	5	dmm

$$\pm Tolerancia = \frac{Promedio\ de\ Penetracion}{100} + 1$$

± Tolerancia=	1	CUMPLE

Tabla 0-19 Ensayo de viscosidad rotacional

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE CIVIL

Laboratorio de Pavimentos

Obra:	Fresado de carpeta asfáltica Av. Napo y Granada
Localización:	Av. Napo y Granada (DMQ)
Muestra N°:	1
Profundidad:	7,5 cm
Descripción:	Pavimento Fresado (RAP)
Operador:	-
Fecha:	25/8/2018

ENSAYO DE VISCOSIDAD ROTACIONAL BROOKFIELD DV-II+ Pro

Lectura	Temperatura (T°C)	Viscosidad (cP)	Viscosidad (Ps)	Promedio de Viscosidad (Ps)	Torque (%)	Velocidad (rpm)
1	115	154000	154	151	30,10	0,50
2	115	150000	150			
3	115	148000	148			
4	110	276000	276	269	13,50	0,50
5	110	266000	266			
6	110	264000	264			
7	105	480000	480	479	24,10	0,50
8	105	482000	482			
9	105	476000	476			
10	100	842000	842	843	42,30	0,50
11	100	844000	844			
12	100	842000	842			
13	95	1750000	1750	1637	76,20	0,50
14	95	1660000	1660			
15	95	1500000	1500			

Tabla 0-20 Contenido de humedad del grano de caucho

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Laboratorio de Pavimentos

ENSAYOS SOBRE POLVO DE CAUCHO MODIFICADOR DE CAUCHO

INEN 2680:2013

OBRA:	Tesis Pav.Fresado, con caucho triturado y emulsion asfaltica
LOCALIZACION:	Grano de caucho molido (RUBBERACTION)
FECHA:	31/8/2018
MUESTRA:	Grano de caucho molido de 1-4 (mm)
DESCRIPCION:	Grano de caucho molido de 1-4 (mm)

1. Contenido de Humedad

Muestra	M1 (gr)
Masa del contenedor:	306,40
Masa original de la muestra y contenedor:	806,40
Masa del contenedor y la muestra secados:	805,80
Porcentaje de Humedad (%):	0,074%
Porcentaje maximo permitido (%) INEN 2680:2013	0,75%
M1	Cumple

Tabla 0-21 Contenido de partículas ferrosas

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Laboratorio de Pavimentos

ENSAYOS SOBRE POLVO DE CAUCHO MODIFICADOR DE CAUCHO

INEN 2680:2013

OBRA:	Tesis Pav.Fresado, con caucho triturado y emulsion asfaltica
LOCALIZACION:	Grano de caucho molido (RUBBERACTION)
FECHA:	31/8/2018
MUESTRA:	Grano de caucho molido de 1-4 (mm)
DESCRIPCION:	Grano de caucho molido de 1-4 (mm)

2. Particulas Ferrosas

Muestra	M1 (gr)	M2 (gr)	M3 (gr)
Masa de la muestra	50	50	50
Masa de particulas capturadas por el iman:	0,035	0,027	0,021
Porcentaje de particulas capturadas por el iman (%):	0,070%	0,054%	0,042%
PROMEDIO	0,055%		

Porcentaje maximo permitido (%) INEN 2680:2013	0,010%

M1	No Cumple
M2	No Cumple
M3	No Cumple

Tabla 0-22 Granulometría del grano de caucho

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Laboratorio de Pavimentos

ENSAYOS SOBRE POLVO DE CAUCHO MODIFICADOR DE CAUCHO

INEN 2680:2013

OBRA:	Tesis Pav.Fresado, con caucho triturado y emulsion asfaltica
LOCALIZACION:	Grano de caucho molido (RUBBERACTION)
FECHA:	31/8/2018
MUESTRA:	Grano de caucho molido de 1-4 (mm)
DESCRIPCION:	Grano de caucho molido de 1-4 (mm)

3. Granulometria

Muestra	Tamiz	M1	Masa Retenida Acumulada	% Retenido Acumulado	Promedio Masa Pasa
	(mm)	(gr)	(gr)	(%)	(%)
Masa seca de la muestra:	-	100,03	100,03	100,03	100,03
Masa de talco añadido:	-	5,00	5,00	5,00	5,00
Retenido Tamiz N°8:	2,360	36,57	36,57	34,82	65,18
Retenido Tamiz N°20:	0,850	50,62	87,19	83,01	16,99
Retenido Tamiz N°30:	0,600	10,33	97,52	92,85	7,15
Retenido Tamiz N°50:	0,300	4,32	101,84	96,96	3,04
Retenido Tamiz N°100:	0,150	0,36	102,20	97,30	2,70
Retenido Tamiz N°200:	0,075	0,060	102,26	97,36	2,64

Muestra	Tamiz	M2	Masa Retenida Acumulada	% Retenido Acumulado	Promedio Masa Pasa
	(mm)	(gr)	(gr)	(%)	(%)
Masa seca de la muestra:	-	100,02	100,02	100,02	100,02
Masa de talco añadido:	-	5,00	5,00	5,00	5,00
Retenido Tamiz N°8:	2,360	29,57	29,57	28,16	71,84
Retenido Tamiz N°20:	0,850	52,78	82,35	78,41	21,59
Retenido Tamiz N°30:	0,600	13,75	96,10	91,51	8,49
Retenido Tamiz N°50:	0,300	6,08	102,18	97,30	2,70
Retenido Tamiz N°100:	0,150	0,28	102,46	97,56	2,44
Retenido Tamiz N°200:	0,075	0,026	102,49	97,59	2,41

Masa maxima que pasa el tamiz N°8 (2,36 mm) INEN 2680:2013		0,00
	M1	No Cumple
	M2	No Cumple

Tabla 0-23 Porcentaje de fibra

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Laboratorio de Pavimentos

ENSAYOS SOBRE POLVO DE CAUCHO MODIFICADOR DE CAUCHO

INEN 2680:2013

OBRA:	Tesis Pav.Fresado, con caucho triturado y emulsion asfaltica
LOCALIZACION:	Grano de caucho molido (RUBBERACTION)
FECHA:	31/8/2018
MUESTRA:	Grano de caucho molido de 1-4 (mm)
DESCRIPCION:	Grano de caucho molido de 1-4 (mm)

4. Porcentaje de Fibra

Muestra	M1 (gr)	M2 (gr)
Masa de la muestra original:	100,02	100,00
Masa luego de la remocion de fibra:	99,30	99,51
Masa de fibras:	0,721	0,493
Porcentaje de fibras (%):	0,72%	0,49%
PROMEDIO	0,61%	

Maxima masa permitida de fibra INEN 2680:2013	0,50%
M1	No Cumple
M2	Cumple

Tabla 0-24 Resultados del ensayo de carga de partícula

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR							
FACULTAD DE INGENIERIA							
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL							
Laboratorio de Pavimentos							
ENSAYO ESTABILIDAD 24 H							
OBRA:	Tesis Pav.Fresado, con caucho triturado y emulsión asfáltica						
LOCALIZACION:	Emulsión asfáltica IMPTEK						
FECHA:	28/8/2018						
MUESTRA:	Emulsión asfáltica IMPTEK						
DESCRIPCION:	Muestra obtenida del residuo de emulsion asfaltica CSS-1h						
		Tipo de Emulsión	**Carga de Partícula**	**Emulsión**			
		CSS-1h	Positiva	Cationica			

Tabla 0-25 Resultados del ensayo de estabilidad 24h

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR							
FACULTAD DE INGENIERIA							
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL							
Laboratorio de Pavimentos							
ENSAYO ESTABILIDAD 24 H							
OBRA:	Tesis Pav.Fresado, con caucho triturado y emulsión asfáltica						
LOCALIZACION:	Emulsión asfáltica IMPTEK						
FECHA:	28/8/2018						
MUESTRA:	Emulsión asfáltica IMPTEK						
DESCRIPCION:	Emulsion Asfaltica CSS-1h						
Vaso de precipitacion+varilla de vidrio (superior):						422,67	(gr)
Vaso de precipitacion+varilla de vidrio (inferior):						293,44	(gr)
Vaso de precipitacion+varilla de vidrio+emulsion asfáltica (superior):						472,66	(gr)
Vaso de precipitacion+varilla de vidrio+emulsion asfáltica (inferior):						343,45	(gr)
Vaso de precipitacion+varilla de vidrio+emulsion asfáltica (superior) (3 horas después a T 165°C):						452,70	(gr)
Vaso de precipitacion+varilla de vidrio+emulsion asfáltica (inferior) (3 horas después a T 165°C):						323,46	(gr)
Residuo de asfalto (superior):						19,96	(gr)
Residuo de asfalto (inferior):						19,99	(gr)
Residuo de asfalto (superior) **(A)**:						66,47	%
Residuo de asfalto (inferior) **(B)**:						66,59	%
Asentamiento (24h):						0,12	%
		$Asentamiento\ (24h), \% = B - A$					
					REQUISITO		
NORMATIVA					Min	Max	
Tabla 810-4.2 Requisitos de Emulsiones Asfálticas Catiónicas (MOP-001-F 2002)					-	1	
	Resultado	0,12	Cumple				

Tabla 0-26 Resultados del ensayo de estabilidad 5 días

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR							
FACULTAD DE INGENIERIA							
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL							
Laboratorio de Pavimentos							
ENSAYO ESTABILIDAD 5 DIAS							
OBRA:	Tesis Pav.Fresado, con caucho triturado y emulsión asfáltica						
LOCALIZACION:	Emulsión asfáltica IMPTEK						
FECHA:	31/8/2018						
MUESTRA:	Emulsión asfáltica IMPTEK						
DESCRIPCION:	Emulsion Asfaltica CSS-1h						
Vaso de precipitacion+varilla de vidrio (superior):						424,42	(gr)
Vaso de precipitacion+varilla de vidrio (inferior):						421,42	(gr)
Vaso de precipitacion+varilla de vidrio+emulsion asfáltica (superior):						483,95	(gr)
Vaso de precipitacion+varilla de vidrio+emulsion asfáltica (inferior):						493,70	(gr)
Vaso de precipitacion+varilla de vidrio+emulsion asfáltica (superior) (3 horas después a T 165°C):						460,70	(gr)
Vaso de precipitacion+varilla de vidrio+emulsion asfáltica (inferior) (3 horas después a T 165°C):						465,15	(gr)
Residuo de asfalto (superior):						23,25	(gr)
Residuo de asfalto (inferior):						28,55	(gr)
Residuo de asfalto (superior) **(A)**:						64,08	%
Residuo de asfalto (inferior) **(B)**:						65,29	%
Asentamiento (5 días):						1,20	%
	$Asentamiento\ (5\ dias), \% = B - A$						
					REQUISITO		
NORMATIVA					Min	Max	
Tabla 810-4.2 Requisitos de Emulsiones Asfálticas Catiónicas (MOP-001-F 2002)					-	5	
	Resultado	1,20	Cumple				

Tabla 0-27 Resultados del ensayo del tamiz N°20

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR							
FACULTAD DE INGENIERIA							
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL							
Laboratorio de Pavimentos							
ENSAYO TAMIZ #20							
OBRA:	Tesis Pav.Fresado, con caucho triturado y emulsión asfáltica						
LOCALIZACION:	Emulsión asfáltica IMPTEK						
FECHA:	27/8/2018						
MUESTRA:	Emulsión asfáltica IMPTEK						
DESCRIPCION:	Emulsión Asfáltica CSS-1h						
Ensayo #	**Peso tamiz+bandeja "a"**	**Peso tamiz+bandeja (después) "b"**	**Ensayo Tamiz #20 "c=b-a"**	**Ensayo Tamiz #20 "d=c/10"**			
	(gr)	**(gr)**	**(gr)**	**(%)**			
1	649.69	650.35	0.66	0.066			
					REQUISITO		
NORMATIVA					Min	Max	
Tabla 810-4.2 Requisitos de Emulsiones Asfálticas Catiónicas (MOP-001-F 2002)					-	0.1	
	Resultado	0.066	Cumple				

Tabla 0-28 Resultados del ensayo sobre el residuo asfáltico

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR			
FACULTAD DE INGENIERIA			
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL			
Laboratorio de Pavimentos			
ENSAYO SOBRE RESIDUO ASFALTICO			
OBRA:	Tesis Pav.Fresado, con caucho triturado y emulsión asfáltica		
LOCALIZACION:	Emulsión asfáltica IMPTEK		
FECHA:	29/8/2018		
MUESTRA:	Residuo asfaltico de emulsión		
DESCRIPCION:	Muestra obtenida del residuo de emulsión asfáltica CSS-1h		
Vaso de precipitacion+varilla de vidrio (Muestra 1):		430.20	(gr)
Vaso de precipitacion+varilla de vidrio (Muestra 2):		416.3	(gr)
Vaso de precipitacion+varilla de vidrio (Muestra 3):		417.51	(gr)
Vaso de precipitacion+varilla de vidrio+emulsion asfáltica (Muestra1):		480.13	(gr)
Vaso de precipitacion+varilla de vidrio+emulsion asfáltica (Muestra 2):		466.35	(gr)
Vaso de precipitacion+varilla de vidrio+emulsion asfáltica (Muestra 3):		467.54	(gr)
Vaso de precipitacion+varilla de vidrio+emulsion asfáltica (M1) (3 horas después a T 165°C):		461.62	(gr)
Vaso de precipitacion+varilla de vidrio+emulsion asfáltica (M2) (3 horas después a T 165°C):		447.88	(gr)
Vaso de precipitacion+varilla de vidrio+emulsion asfáltica (M3) (3 horas después a T 165°C):		447.63	(gr)
Residuo de asfalto (Muestra 1):		18.51	(gr)
Residuo de asfalto (Muestra 2):		18.47	(gr)
Residuo de asfalto (Muestra 3):		19.91	(gr)

DATOS	M1	M2	M3
Masa del vaso, varilla y residuo de asfalto **(A)**, gr	461.62	447.88	447.63
Masa del vaso y varilla **(B)**, gr	430.20	416.3	417.51
Porcentaje de residuo asfaltico (%)	62.84	63.16	60.24
PROMEDIO DE RESIDUO ASFALTICO		**62.08**	

Tabla 0-29 Resultados del ensayo de ductilidad sobre el residuo asfáltico

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Laboratorio de Pavimentos

ENSAYO DE DUCTILIDAD

OBRA:	Tesis Pav.Fresado, con caucho triturado y emulsión asfáltica
LOCALIZACION:	Emulsión asfáltica IMPTEK
FECHA:	28/8/2018
MUESTRA:	Emulsión asfáltica IMPTEK
DESCRIPCION:	Muestra obtenida del residuo de emulsión asfáltica CSS-1h

Ensayo N°	Distancia de Rotura (cm)
1	41
2	42
PROMEDIO	**42.00**

NORMATIVA	**REQUISITO** Min	Max
Tabla 810-4.2 Requisitos de Emulsiones Asfalticas Cationicas (MOP-001-F 2002)	40	-

Resultado	42.00	Cumple

Tabla 0-30 Resultados del ensayo de viscosidad Saybolt

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Laboratorio de Pavimentos

ENSAYO DE VISCOSIDAD SAYBOLT

OBRA:	Tesis Pav.Fresado, con caucho triturado y emulsión asfáltica
LOCALIZACION:	Emulsión asfáltica IMPTEK
FECHA:	28/8/2018
MUESTRA:	Emulsión asfáltica IMPTEK
DESCRIPCION:	Emulsión Asfáltica CSS-1h

Muestra #	Temperatura (°C)	Tiempo (seg)
1	50	0:21:34
2	50	0:28:10
PROMEDIO		**0:25:12**

NORMATIVA	**REQUISITO** Min	Max
Tabla 810-4.2 Requisitos de Emulsiones Asfálticas Cationicas (MOP-001-F 2002)	20	100

Resultado	25.12	Cumple

Tabla 0-31 Resultados del ensayo de penetración sobre residuo asfáltico

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Laboratorio de Pavimentos

ENSAYO DE PENETRACION SOBRE RESIDUO ASFALTICO

OBRA:	Tesis Pav.Fresado, con caucho triturado y emulsión asfáltica
LOCALIZACION:	Emulsión asfáltica IMPTEK
FECHA:	29/8/2018
MUESTRA:	Residuo asfaltico de emulsión
DESCRIPCION:	Muestra obtenida del residuo de emulsión asfáltica CSS-1h

N° Punto	Penetración (mm)	Tiempo (seg)
1	52	5
2	52	5
3	50	5
PROMEDIO	**51.33**	**mm**

NORMATIVA	**REQUISITO** Min	Max
Tabla 810-4.2 Requisitos de Emulsiones Asfálticas Cationicas (MOP-001-F 2002)	40	90

Resultado	51.33	Cumple

Tabla 0-32 Resultado del ensayo de durabilidad para agregado grueso

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE CIVIL

Laboratorio de Suelos

Obra:	Fresado de carpeta asfáltica Av. Napo y Granada
Localización:	Av. Napo y Granada (DMQ)
Muestra N°:	1
Profundidad:	7,5 cm
Descripción:	Pavimento Fresado (RAP)
Operador:	-
Fecha:	7/8/2018

Muestra 1: Agregado Grueso 1/2

Tamiz N°	Peso Inicial (gr)	Peso Final (gr)	Desgaste (%)
Retiene 3/4	501	468.60	6.47%
Retiene 1/2	670	656.50	2.01%
Retiene 3/8	330	327.20	0.85%
Retiene N°4	301	292.50	2.82%
	Promedio de Desgaste		3.04%

ESPECIFICACION	LIMITE	RESULTADO	
Superpave	≤10 & ≤20%	3.04%	Cumple

Tabla 0-33 Resultado del ensayo de durabilidad para agregado fino

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR					
FACULTAD DE INGENIERIA					
ESCUELA DE CIVIL					
Laboratorio de Suelos					
Obra:	Fresado de carpeta asfáltica Av. Napo y Granada				
Localización:	Av. Napo y Granada (DMQ)				
Muestra N°:	2				
Profundidad:	7,5 cm				
Descripción:	Pavimento Fresado (RAP)				
Operador:	-				
Fecha:	7/8/2018				
Muestra 2:	Agregado Fino N°8				
Tamiz N°	**Peso Inicial (gr)**	**Peso Final (gr)**	**Desgaste (%)**		
Retiene N°8	101	86.20	14.65%		
Retiene N°16	101	83.20	17.62%		
Retiene N°30	101	74.40	26.34%		
Retiene N°50	101	74.70	26.04%		
	Promedio de Desgaste		21.16%		
ESPECIFICACION		**LIMITE**	**RESULTADO**		
Superpave		≤10 & ≤20%	21.16%	No Cumple	

Tabla 0-34 Resultado del ensayo de tenacidad para agregado grueso

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR					
FACULTAD DE INGENIERIA					
ESCUELA DE CIVIL					
Laboratorio de Suelos					
Obra:	Fresado de carpeta asfáltica Av. Napo y Granada				
Localización:	Av. Napo y Granada (DMQ)				
Muestra N°:	1				
Profundidad:	7,5 cm				
Descripción:	Pavimento Fresado (RAP)				
Operador:	-				
Fecha:	1/8/2018				
	Tamaño del Agregado:	Tamiz N°4			
C=	masa inicial de la muestra (gr)				
Y=	masa final de la muestra, retenida en el Tamiz N°12 (gr)				
Ensayo de Abrasión					
$Porcentaje\ Perdido\ (\%) = \left[\frac{(C-Y)}{C}\right] \times 100$					
C=	5000	gr			
Y=	3760	gr			
(%) Perdido=	24.80%				
a=	masa de la muestra antes de la prueba (gr)				
c=	masa de la muestra que pasa el Tamiz N°12				
$\%\ Desgaste = \frac{c}{a} \times 100$					
a=	5000	gr			
c=	1222	gr			
(%) Desgaste=	24.44%				
ESPECIFICACION		**LIMITE**	**RESULTADO**		
Superpave		≤35%	24.44%	Cumple	
Superpave		≤45%	24.44%	Cumple	

Tabla 0-35 Gravedad especifica máxima teórica muestra 1 (Gmm)

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR	
FACULTAD DE INGENIERIA	
ESCUELA DE CIVIL	
Área de Pavimentos	
Gravedad Especifica Máxima Teórica	
Obra:	Mezcla asfáltica en frio con 2.5% de emulsión asfáltica
Norma:	ASTM D2041
Muestra N°:	1
Descripción:	Mezcla asfáltica en frio con 2.5% de emulsión asfáltica
Fecha:	7/8/2018
Información General	
Numero de Muestras	2
Tipo de Contenedor	**Metálico**
Tipo de Procedimiento	**En aire**
Información de las muestras	
Masa de la muestra seca en aire, A (gr)	1969.8
Masa de la tapa y contenedor con agua a 25°C, D (gr)	7413.0
Masa de la muestra, tapa y contenedor con agua a 25°C, E (gr)	8563.3
Procedimiento Suplementario	**NO**
$Gmm = \frac{A}{A + (D - E)}$	
Gravedad especifica máxima teórica (Gmm)	2.404

Tabla 0-36 Gravedad especifica máxima teórica muestra 2 (Gmm)

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR	
FACULTAD DE INGENIERIA	
ESCUELA DE CIVIL	
Área de Pavimentos	
Gravedad Especifica Máxima Teórica	
Obra:	Mezcla asfáltica en frio con 2.5% de emulsión asfáltica
Norma:	ASTM D2041
Muestra N°:	2
Descripción:	Mezcla asfáltica en frio con 2.5% de emulsión asfáltica
Fecha:	7/8/2018
Información General	
Numero de Muestras	2
Tipo de Contenedor	**Metálico**
Tipo de Procedimiento	**En aire**
Información de las muestras	
Masa de la muestra seca en aire, A (gr)	1969.7
Masa de la tapa y contenedor con agua a 25°C, D (gr)	7413.0
Masa de la muestra, tapa y contenedor con agua a 25°C, E (gr)	8564.3
Procedimiento Suplementario	**NO**
$Gmm = \frac{A}{A + (D - E)}$	
Gravedad especifica máxima teórica (Gmm)	2.407

Tabla 0-37 Gravedad especifica neta de la mezcla asfáltica modificada (Gmb)

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE CIVIL

Área de Pavimentos

Gravedad especifica neta de la mezcla asfáltica moldeada (Gmb)

Obra:	Mezcla asfáltica en frio con 2.5% de emulsión asfáltica
Norma:	
Muestra N°:	
Descripción:	Mezcla asfáltica en frio con 2.5% de emulsión asfáltica
Fecha:	7/8/2018

Método	Briqueta	Peso en Aire	Peso en Agua	Peso Superficie seca saturada	Gravedad especifica neta
-	-	Wa (gr)	Ww (gr)	Wss (gr)	Gmb -
Marshall	1	1060.2	498.48	1061.01	1.885
	2	1054.04	483.6	1053.82	1.848
	3	1034.65	476.92	1034.11	1.857
Superpave	1	984.61	490.67	924.12	2.272
	2	987.48	491.84	918.87	2.312
	3	998.54	492.87	919.02	2.343

$$Gmb = \frac{W_a}{W_{ss} - W_w}$$

Gravedad especifica neta de la mezcla asfáltica moldeada (Gmb)	1.863	Marshall
Gravedad especifica neta de la mezcla asfáltica moldeada (Gmb)	2.309	Superpave

Tabla 0-38 Porcentaje de vacíos de aire (%)

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE CIVIL

Área de Pavimentos

Porcentaje de vacíos de aire (Va)

Obra:	Mezcla asfáltica en frio con 2.5% de emulsión asfáltica
Norma:	
Muestra N°:	
Descripción:	Mezcla asfáltica en frio con 2.5% de emulsión asfáltica
Fecha:	7/8/2018

Método	Briqueta	Gravedad especifica teórica máxima	Gravedad especifica neta	Vacíos de aire
-	-	Gmm	Gmb	Va
		-	-	%
Marshall	1	2.405	1.885	21.64
	2		1.848	23.15
	3		1.857	22.80
Superpave	1	2.405	2.272	5.56
	2		2.312	3.86
	3		2.343	2.58

$$V_a = 100 \times \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right)$$

Porcentaje de vacíos de aire (Va)	22.53	Marshall
Porcentaje de vacíos de aire (Va)	4.00	Superpave

ESPECIFICACION	LIMITE	RESULTADO	
Marshall Modificado , Metodo Illinois	≥3% & ≤18%	22.53	No Cumple
Superpave	≤4%	4.00	Cumple