



Pavimento flexible con cemento asfáltico modificado utilizando polvo de caucho

Pavimento flexible con cemento asfáltico modificado utilizando polvo de caucho

PRIMERA EDICIÓN



Pavimento flexible con cemento asfáltico
modificado utilizando polvo de caucho

Autores

EDUARDO SANTOS BAQUERIZO
CARLOS LUIS VERDEZOTO ALEGRIA
CARLOS MORA CABRERA
FRANCISCO JAVIER CORDOVA RIZO

Primera Edición
Octubre 2017

Libro sometido a revisión de pares académicos.



Edición
Diagramación
Diseño
Publicación

Maquetación.

Grupo Compás

Cámara Ecuatoriana del Libro - ISBN-E: 978-9942-760-99-9

Guayaquil - Ecuador

[REDACTED]

[REDACTED]

Prólogo

Esta investigación busca mejorar el comportamiento de las mezclas asfálticas, dado que se presentan casos en los cuales las características de las mezclas asfálticas obtenidas con ligantes convencionales, no son capaces de resistir la acción conjunta del tránsito y del clima, se hace necesario, entonces, desarrollar mezclas bituminosas más resistentes, mejorando sus propiedades mecánicas, haciendo énfasis en la durabilidad, el ahuellamiento y la fatiga, describiendo el proceso vía húmeda mediante el cual se modificó el ligante.

Se diseñó una mezcla asfáltica tradicional y dos mezclas con 5 y 10% de incorporación de caucho en relación al bitumen, para poder establecer las diferencias del comportamiento mecánico y caracterización dinámica entre la mezcla convencional y la modificada. EL trabajo se estructura de la siguiente manera:

En su primera parte están las generalidades cómo los antecedentes, la introducción, los objetivos, delimitación del tema, planteamiento del problema, justificación y ubicación de la fuente de materiales a utilizarse.

El capítulo contiene la información teórica científica que respalda ésta investigación, la normativa vigente con la cual deben ser caracterizados mediante ensayos; el cemento asfáltico tradicional, el caucho, el cemento asfáltico modificado, los agregados pétreos y a la mezcla. Éste capítulo a su vez conlleva los instrumentos y técnicas en

las que se precisan los ensayos que se toman en cuenta para el desarrollo de este trabajo.

Elaboración de la mezcla asfalto-caucho y sus condiciones de preparación; porcentaje de caucho mezclado al ligante, temperatura de reacción de la mezcla, y tiempo de reacción y características del estanque mezclador.

Estabilización de las muestras mediante el método Marshall, incluyendo la caracterización de los agregados pétreos con su respectivo análisis granulométrico y mezcla de agregados.

Elaboración de probetas de ensayo, caracterización de la mezcla compactada cómo: densidad Rice, densidad Bulk, porcentaje de vacíos de la mezcla, porcentaje de vacíos de agregado mineral (VAM)., porcentaje de vacíos llenos de Asfalto (VFA), estabilidad, flujo, y pruebas de desempeño de las mezclas asfálticas mediante el equipo Nottingham Asphalt Tester modelo NU-10 (NAT)., que nos determina Módulo de rigidez, fatiga y ahuellamiento, siendo estos últimos los más representativos de la investigación ya que mide las deformaciones de las mezclas a diferentes temperaturas controladas mediante tecnología moderna.

Y análisis comparativo entre la muestra tradicional y la modificada con caucho.

Éste último capítulo contiene conclusiones y recomendaciones en base a los resultados finales encontrados en ésta investigación.

[REDACTED]

[REDACTED]

CAPITULO I

Antecedentes

En diversas ciudades de nuestro país existen vías que se encuentran deterioradas debido a diferentes factores, destacando que en la construcción de las mismas se utilizan mezclas asfálticas convencionales, y a la no utilización de avances tecnológicos o nuevos estudios que se está aplicando a nivel mundial dónde se ha encontrado mejoras en las propiedades físico- mecánicas de las mezclas asfálticas.

El aumento de población ha sido otro detonante al problema de deterioro vial debido a que si aumenta la población aumenta el tipo y cantidad de tráfico, así como también la carga del vehículo, razones por la cual aumentan las exigencias en los pavimentos.

Si bien es cierto el cemento asfáltico ha sido el insumo principal en todas las tecnologías o técnicas de elaboración de mezclas como son en caliente, en frío, o en asfaltos emulsionados, es por esto que nos encontramos en la obligación de aportar con investigaciones que consista en perfeccionar el cemento asfáltico con la finalidad de mejorar el comportamiento elástico, la resistencia a la fisuración por fatiga y la deformación plástica (ahuellamiento).

Actualmente en la localidad se están realizando investigaciones que consiste en modificar al cemento asfáltico adicionando polvo de caucho, para conseguir aplicar este tipo de técnica se dispone de todos los recursos necesarios para su obtención e implementación en los proyectos viales de nuestro país, ya que el caucho proveniente del reciclaje de neumáticos de automotores.

Introducción

La problemática en la infraestructura vial se evidencia visualmente en la capa de rodadura, esto se puede ver reflejado en numerosas carreteras del mundo donde se

presentan gran cantidad de fallas en muchos casos tempranas, esto se debe a que las características de las mezclas asfálticas en los pavimentos no son capaces de resistir la acción conjunta del tránsito y del clima, es por esto que se hace necesario desarrollar investigaciones sobre mezclas bituminosas.

En Diversos países de Europa, América del Norte y América del Sur se emplean hoy en día en las vías de pavimento flexible los elastómeros termoplásticos Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) o más conocido cómo caucho sintético que se encuentran en grandes cantidades en los neumáticos de uso automotriz.

La adición de caucho a las mezclas asfálticas se desarrolló comercialmente en los Estados Unidos por los años 60 con la patente de Charle McDonald en el departamento de transporte de Arizona, su aplicación lo realizó en tratamientos superficiales y bacheos, desde entonces este tipo de material ha sido adoptado alrededor de todo el mundo y hoy en día es conocido cómo pavimento ecológico gracias al uso del caucho triturado de los neumáticos que han sido desechados al final de su vida útil citando el beneficio ambiental que representa tener ésta utilización.

Los beneficios que presenta un asfalto modificado con polvo de caucho se evidencian notablemente en la mejora de las propiedades de durabilidad, el ahuellamiento y el envejecimiento del mismo, obteniendo como resultado un aumento en la vida útil de las vías y disminuyendo los costos de mantenimiento.

Además, mejora la adherencia en superficies mojadas para disminuir su incidencia en accidentes de tránsito, ayuda a reducir el ruido que se transmite a través del pavimento y aumenta el contraste con las marcas viales (superficies de un color más negro y durable).

Las formas más comunes de incorporación de caucho de neumáticos fuera de uso en las mezclas asfálticas, son la vía húmeda y la vía seca. En la vía húmeda el caucho es mezclado directamente con el ligante o cemento asfáltico para en lo posterior

incorporar los agregados pétreos, en el proceso vía seca el caucho es mezclado con los agregados pétreos como un árido más o como sustituto de una pequeña parte del agregado fino antes de la incorporación del ligante.

El grado de aporte está directamente relacionado con varios factores, dentro de los cuales se puede sumar la tecnología de la incorporación, naturaleza del caucho, su granulometría, tamaño de las partículas, porcentaje de adición, temperatura de mezclado y tiempo de reacción.

El método estudiado en este trabajo para la incorporación de polvo de caucho en el cemento asfáltico es el proceso vía húmedo que se enmarca dentro de una iniciativa de investigación que pretende estudiar el porcentaje óptimo y efecto de la incorporación de caucho de neumáticos desechados dentro de mezclas asfálticas a través de ensayos mecánicos y reológicos de laboratorio comparándolas con mezclas asfálticas tradicionales.

Contaminación al medio Ambiente

Los neumáticos fuera de uso constituyen un grave problema al medio ambiente debido a las dificultades que con lleva su adecuada disposición final; su lento proceso de descomposición lo convierten prácticamente en un residuo no degradable, sumando a esto su gran volumen y generación dispersa hace que la mayoría de los neumáticos desechaos se encuentren generando contaminación acumulándose en sitios o siendo quemados a cielo abierto para disminuir el gran espacio que ocupa, sin los cuidados que esto requiere.

El mercado actual de llantas en Ecuador incluyendo las llantas importadas y las producidas en el país alcanza los 5'700.000 unidades. De estas al menos 1'282.500 son desechadas cada año y se estima que tardan 500 y 3000 años en desintegrarse siendo una amenaza grave contra el medio ambiente.

Justificación

En el presente proyecto se desarrolla desde la perspectiva de la reutilización de residuos de neumáticos, del aumento de las propiedades de durabilidad de una carpeta asfáltica y de la reducción de costos por mantenimiento.

Por éstos motivos y aprovechando las nuevas tecnologías en maquinaria de trituración se vio la necesidad de estudiar la incorporación de polvo de caucho de neumáticos que están fuera de uso en los cementos asfálticos siendo una posible solución a los problemas para carpetas de rodaduras, obteniendo una carpeta asfáltica ecológica, amigable al medio ambiente porque estamos cumpliendo con el principio ambiental de jerarquía; reduce, recicla y reutiliza.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

Pavimento flexible

Se denomina pavimento flexible a la superestructura de la carretera, que está construida sobre la subrasante y compuesta por la sub base, base, y carpeta de rodadura, que es el centro de estudio en esta investigación cuya función principal es soportar las cargas rodantes y transmitir los esfuerzos al terreno sin desarrollar deformaciones perjudiciales, así como dotar de una superficie lisa, segura y resistente.

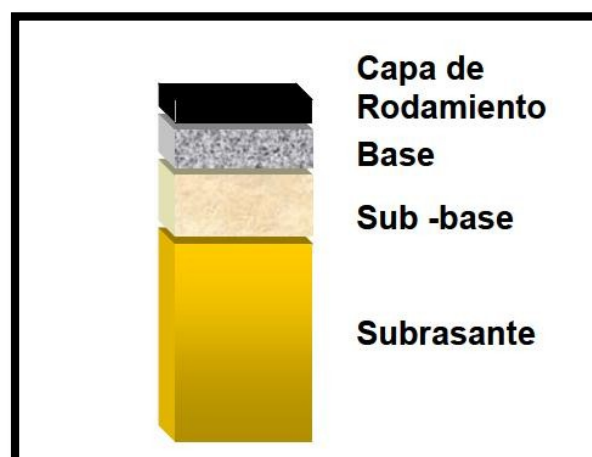


Figura 2-1: Estructura típica de un pavimento flexible.
Fuente:(D.P.A.M, 2006)

Mezclas asfálticas

Una mezcla asfáltica la constituye básicamente una combinación en proporciones preestablecidas de agregados pétreos en diferentes granulometrías, y un material

asfáltico. Dónde todas las partículas de agregado están recubiertas con una película continua y homogénea de cemento asfáltico.

La mezcla asfáltica para pavimentación es sometida a un proceso de compactación, que les permite a los materiales constituyentes trabajar en conjunto, en el cual el material asfáltico actúa como un agente ligante que aglutina las partículas de agregados y forman una masa cohesiva y poco permeable, y el agregado mineral ligado, actúa como un esqueleto pétreo, aportando resistencia y rigidez a la mezcla. (Navarro, 2013, pág. 13). Las cantidades relativas de ligante y áridos determinan las propiedades y características de la mezcla.

Mezclas asfálticas en caliente.

Para lograr que los agregados pétreos se mezclen homogéneamente con el asfalto, ambos componentes se llevan a elevadas temperaturas, sobre los 100°C, para obtener una buena trabajabilidad de la mezcla.

El proceso de mezclado se realiza en una planta Asfáltica y luego se transporta la mezcla al sitio de pavimentación y se coloca por medio de un finisher, una vez extendida se somete a un proceso de compactación, que hace que la mezcla tenga propiedades resistentes al desgaste producido por el paso de los vehículos y a su vez pueda traspasar la sollicitación del peso de ellos hacia las capas más profundas, absorbiendo una parte de ésta sollicitación. (Navarro, 2013, pág. 13)

Propiedades de las mezclas asfálticas en caliente.

Las mezclas asfálticas deben cumplir con propiedades fundamentales cómo:

Durabilidad, propiedad de las mezclas compactadas en los pavimentos capaz de resistir la desintegración debido a la acción conjunta del tránsito y del clima, éste último afecta principalmente a la capa de rodadura por ser superficial y estar en contacto directo con el sol, el aire y el agua, esto hace que la mezcla pierda las propiedades aglutinantes, es decir se oxide, se endurece y envejece, afectando la vida útil del pavimento. (Náyade, 2006, pág. 5)

Estabilidad, es la capacidad de un pavimento asfáltico para resistir las cargas de tránsito sin que se produzcan deformaciones perjudiciales y éstas a su vez sean transmitidas a las capas estructurales internas del pavimento.

La estabilidad depende de la fricción interna y ésta a su vez de la textura superficial, forma de los agregados, densidad de la mezcla, granulometría y cantidad de asfalto, en cambio la cohesión entre agregados es la fuerza aglutinante de la mezcla que depende fundamentalmente de la capacidad que tenga el asfalto de mantener unidas las partículas del agregado, ésta propiedad varía inversamente con la temperatura y aumenta con el contenido de asfalto hasta llegar a un óptimo.. (Náyade, 2006, pág. 6)

La pérdida de estabilidad de un pavimento se traduce en ahuellamiento y ondulaciones.

Resistencia a la fatiga, capacidad del pavimento asfáltico de soportar esfuerzos sin agrietamientos provocados por el paso reiterado de vehículos. Un pavimento con bajo contenido de asfalto o que se ha envejecido considerablemente, tiene menor resistencia a la fatiga. (Navarro, 2013, pág. 32)

Flexibilidad, capacidad de la mezcla de adaptarse a las deformaciones por asentamientos de la base, sub-base y subrasante sin agrietarse. (Náyade, 2006, pág. 6)

Impermeabilidad, las mezclas deben ser en lo posible totalmente impermeables, que el agua superficial sea de lluvias, de riegos, de canales ect., no pueda atravesar hacia las capas inferiores, evitando con ello que éstas puedan perder capacidad de soporte. (Náyade, 2006, pág. 6)

Resistencia al deslizamiento, capacidad del pavimento asfáltico de ofrecer resistencia al resbalamiento o deslizamiento, especialmente cuando está húmedo, ésta capacidad de la mezcla es sumamente importante a nivel de seguridad, ya que no se debe perder adherencia entre el neumático y la superficie de rodamiento. (Navarro, 2013, pág. 31)

Trabajabilidad, se refiere a la facilidad que tenga la mezcla asfáltica de colocarse y compactarse sin que se generen segregaciones. Ésta propiedad está relacionada con el tipo de agregado, granulometría, contenido y viscosidad del asfalto, además de la temperatura de mezclado y compactación. (Laboratorio nacional de vialidad, 2015)

Cemento asfáltico.

El asfalto es un material de color entre negro y pardo oscuro que puede ser encontrado en la naturaleza en yacimientos naturales o a través de la destilación del petróleo. Se caracteriza por permanecer en estado semisólido a temperatura ambiente y líquido a altas temperaturas.

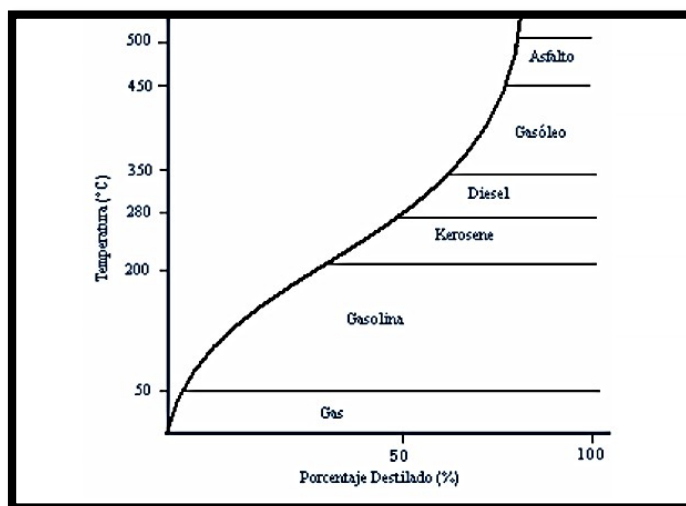


Figura 2-2: Destilación del petróleo

Fuente: Universidad Simón Bolívar, 2008

El asfalto es un material altamente impermeable, adherente y cohesivo, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes.

Propiedades químicas del cemento asfáltico.

El asfalto está compuesto primordialmente por moléculas complejas de hidrocarburos, aunque también contiene átomos de oxígeno, nitrógeno, azufre, sulfuro y otros elementos.

En condiciones normales, los hidrocarburos forman una solución coloidal de dos fases, en la que los hidrocarburos más pesados, denominados asfaltenos, están dispersos en las moléculas de hidrocarburos más ligeros, denominados maltenos. Los asfaltenos por su color negro y similitud con el polvo grueso de grafito, le proporcionan su color y dureza al asfalto. Los maltenos son líquidos viscosos y pegajosos compuestos de resinas y aceites que le proporcionan las propiedades aglutinantes al asfalto (su valor cohesivo). (Navarro, 2013, pág. 16)

La proporción de asfaltenos y maltenos en un ligante varía normalmente debido al proceso de envejecimiento o endurecimiento que sufre el asfalto en el tiempo. El envejecimiento produce cambios considerables en sus propiedades, que lo transforman en un material más rígido y con menor poder aglomerante. El envejecimiento del asfalto se produce por variadas y complejas reacciones de oxidación, volatilización y polimerización, principalmente, cuando este está expuesto a agentes ambientales como las altas temperaturas y el oxígeno. (Navarro, 2013, pág. 16)

Durante la vida del asfalto, se pueden distinguir dos importantes procesos de envejecimiento:

Envejecimiento primario o de corto plazo: Se produce desde la fabricación de la mezcla en planta, hasta el proceso de compactación, se debe a las altas temperaturas que es sometido el asfalto para realizar los trabajos de elaboración de las mezclas asfálticas. La volatilización es su causa principal (evaporación de los constituyentes más livianos del asfalto). (Navarro, 2013, pág. 16)

Envejecimiento secundario o de largo plazo: Es aquel que sufre el asfalto durante la vida de servicio del pavimento. La oxidación es su causa principal (reacción del asfalto con el oxígeno).

Propiedades físicas del cemento asfáltico.

Las propiedades físicas del asfalto de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de caminos son:

Durabilidad: Es la capacidad del asfalto de mantener sus características originales cuando se expone a procesos normales de envejecimiento y degradación.

Adhesión: Es la capacidad de adherencia del asfalto con los agregados en la mezcla, incluso en presencia de agua, tránsito y cambios bruscos de temperatura.

Cohesión: Es la capacidad del asfalto de mantener unidad y firmes en su posición a las partículas de agregado en la mezcla compactada.

Susceptibilidad térmica: Indica la sensibilidad de la consistencia del asfalto a los cambios de temperatura.

Susceptibilidad a la duración de la carga: La viscosidad del asfalto depende también de la duración de los esfuerzos a los que está sometido, de manera similar a lo que sucede con la temperatura. En efecto, a altas temperaturas con cargas estáticas o lentas (camiones a bajas velocidades, intersecciones etc.), el asfalto se comporta como un fluido viscoso que fluye rápidamente y cuya deformación no es recuperable (pavimento propenso a sufrir ahuellamiento). Por el contrario, a bajas temperaturas (climas fríos) con cargas rápidas (camiones a altas velocidades), el asfalto se comporta como un sólido elástico cuya deformación es baja y recuperable (pavimentos muy rígidos propensos a sufrir agrietamiento). (Náyade, 2006, pág. 16)

Ensayos empíricos de consistencia del cemento asfáltico.

Para estudiar la consistencia de los asfaltos se desarrollan ensayos en laboratorio, los cuales determinan si son aptos o no para trabajar en las mezclas asfálticas destinadas a la pavimentación de carreteras. (Pérez, 2014, pág. 9)

Penetración: El ensayo de penetración determina la dureza o consistencia de un asfalto, midiendo la distancia que una aguja penetra verticalmente en una muestra del asfalto en condiciones específicas de temperatura, carga y tiempo. Cuando no se mencionan específicamente otras condiciones, se entiende que la medida de la penetración se hace a 25°C, que la aguja está cargada con 100gr y que la carga se aplica durante 5s. Es evidente que cuando más blando sea el asfalto mayor será la cifra que indique su penetración. (Maila, 2013, pág. 10)

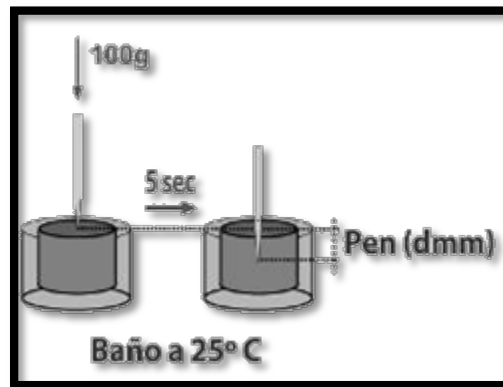


Figura 2-3: Ensayo normal de penetración
Fuente: Asphall Institute

Los asfaltos se clasifican según su dureza o consistencia por medio de la penetración en milésima de milímetros, el instituto de asfalto ha adoptado cuatro grados de asfalto para pavimentación comprendidos dentro de los siguientes rangos.

Tabla 1-0-1: Clasificación de asfaltos según su dureza

ASFALTO PARA PAVIMENTO	
40-50	AC-40
60-70	AC-20
85-100	AC-10
120-150	AC – 5
200-300	AC-2.5

Fuente: Carlos Luis Verdezoto

Punto de ablandamiento, los asfaltos de diferentes tipos se ablandan a diferentes temperaturas. Normalmente éste método se lo realiza mediante el método arbitrario de anillo y bola. Aunque este ensayo no se incluye en las especificaciones para los asfaltos de pavimentos, frecuentemente se usa para caracterizar los materiales más duros que son empleados en otras aplicaciones e indica la

consistencia del asfalto una vez tomada la temperatura necesaria y se ablanda esto puede ser en un rango de 48° a 57°C. (Maila, 2013, pág. 31)

El ensayo consiste en llenar de asfalto dos anillos de latón de dimensiones normalizadas, las muestra separadas una de la otra se suspende de un baño de agua destilada y sobre el centro de la muestra se sitúa una bola de acero de dimensiones y peso especificado, a continuación, se calienta el baño a una velocidad de 5° C por minuto y se anota la temperatura en el momento en que la bola de acero caiga desde una distancia de 25mm. Esta temperatura se llama punto de reblandecimiento del asfalto. Los procedimientos y aparatos necesarios para la realización del ensayo se describen con detalle en el método ASTM D-36. (Maila, 2013, pág. 31)

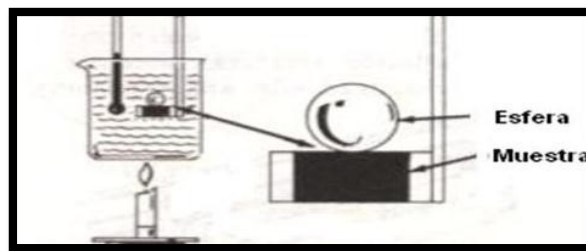


Figura 2-4: Punto de ablandamiento; anillo y bola

Fuente: Asphall Institute

Ductilidad: La ductilidad es una propiedad que tienen algunos elementos que pueden deformarse sin romperse.

Los asfaltos dúctiles tienen normalmente mejores propiedades aglomerantes que aquellos que les falta esta característica. Por otro lado, los asfaltos con una ductilidad muy elevada son usualmente más susceptibles a los cambios de temperatura. (Maila, 2013, pág. 12)

Consiste en colocar una muestra o patrón en un baño de ductilidad a 25°C, para después medir el alargamiento elástico en porcentaje de la deformación con una velocidad de alargamiento de 5cm/min \pm 5%, antes de la ruptura (>100cm); unos asfaltos con ductilidad elevada son susceptibles a los cambios de temperatura. (Maila, 2013, pág. 13)

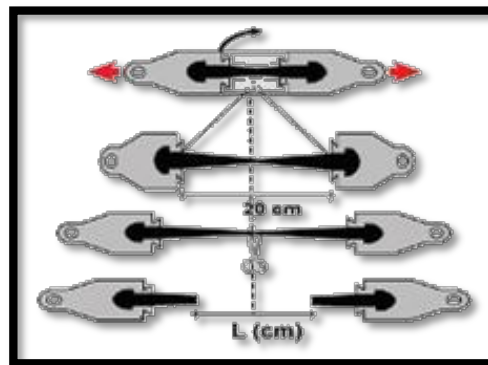


Figura 2-5: Ductilidad de una muestra asfáltica

Fuente: Asphalt Institute

Punto de inflamación: El punto de inflamación de un ligante asfáltico es la temperatura más baja la cual se separan materiales volátiles de la muestra, y crean un “destello” en presencia de una llama abierta. El punto de inflamación no debe ser confundido con el punto de combustión, el cual es la temperatura más baja a la cual el ligante asfáltico se inflama y se quema. El punto de inflamación consiste, tan solo, en la combustión instantánea de las fracciones volátiles que se están separando del asfalto. (Maila, 2013, pág. 15)

El punto de inflamación de un asfalto se mide por el ensayo en vaso abierto Cleveland. Según condición normalizada prescrita en el método ASTM D-92, se trata de un vaso abierto de latón se llena parcialmente con asfalto y se calienta a una velocidad establecida.

Se hace pasar periódicamente sobre la superficie de la muestra una pequeña llama, y se define punto de llama la temperatura a la que se han desprendido vapores suficientes para producir una llamarada repentina. (Maila, 2013, pág. 15)

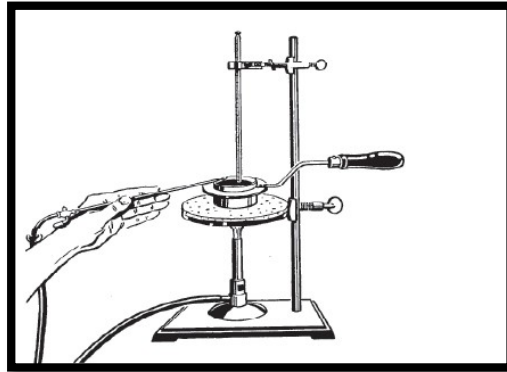


Figura 2-6: Punto de inflamación copa Cleveland

Fuente: Asphall Institute

Peso específico: Es necesario conocer el peso específico del asfalto que se emplea para hacer las correcciones de volumen y se emplea también como factor para la determinación de los huecos en las mezclas asfálticas para pavimentos compactados. (Maila, 2013, pág. 16)

El peso específico es la relación del peso de un volumen determinado del material al peso de igual volumen de agua, estando ambos materiales a temperaturas especificadas. Así, un peso especificado de 1.05 significa que el material pesa 1.05 veces lo que pesa el agua a temperatura fijada. Todos los líquidos y la mayor parte de los sólidos sufren cambios de volumen cuando varía la temperatura. Se expande cuando se calientan y se contraen cuando se enfrían. (Maila, 2013, pág. 16)

En Ecuador PETROECUADOR, produce cementos asfálticos en la refinería de Esmeraldas, que por sus características físicas de penetración (según el MTOP 60-70) es utilizado como un asfalto AC-20. Los resultados de los ensayos antes indicados comparados con sus respectivas especificaciones de la Tabla 2-2, nos lleva a concluir si este asfalto es apto o no para tal uso.

Requisitos del cemento asfáltico.

Tabla 1-0-2: Especificaciones del cemento asfáltico

BETÚN ORIGINAL		
ENSAYOS	60 - 70	
	MÍNIMO	MÁXIMO
Penetración (25°C, 100GR, 5s), mm/10	60	70
Punto de ablandamiento A y B, °C	48	57
Ductilidad (25°C, 5cm/min), %	100	---
Punto de inflamación, Copa de Cleveland °C	232	232

Fuente: MOP-F0012002

Elaboración: Verdezoto Carlos

Se han logrado avances significativos al tratar el cemento asfáltico original con otras sustancias que permiten mejorar su comportamiento cuando es sometido a condiciones más exigentes, por ejemplo, climas extremos, tránsito de vehículos muy pesados, ambientes agresivos, solicitudes concentradas en áreas específicas, etc. (Navarro, 2013, pág. 17)

La modificación del cemento asfáltico consiste en la adición de polímeros a los asfaltos tradicionales con el fin de mejorar sus características reológicas, los polímeros que en muchos países del mundo se están usando son los elastómeros, SBS (Estireno-Butadieno-Estireno) propiedad que tiene el caucho de los neumáticos modificador del cemento asfáltico de ésta investigación. (Navarro, 2013, pág. 17)

El cemento asfáltico modificado con caucho de neumáticos es un ligante hidrocarbonado resultante de la mezcla de cemento asfáltico y grano de caucho, obtenido del reciclaje de llantas de automotores que han sido retiradas al final de su vida útil. (INVIAS , 2012, págs. 413-1)

1.1) Polvo de Caucho

El Grano de caucho reciclado (GCR) corresponde a partículas de caucho obtenidas del reciclaje de llantas.

1.12.1) Caucho reciclado de neumáticos fuera de uso.

Los neumáticos son estructuras muy complejas elaboradas con más de doscientos componentes. El principal componente es el caucho, que es casi la mitad de su peso, y puede ser de dos tipos: natural o sintético. (Navarro, 2013, pág. 18)

El caucho natural normalmente le proporciona elasticidad al neumático, mientras que el sintético lo que aporta es estabilidad térmica.

El caucho natural se obtiene a partir de un fluido lechoso de color blanco, conocido como látex, que corresponde a la savia de varias plantas específicas. La principal fuente comercial de látex son las euforbiáceas del género *Hevea*, que contienen entre un 30% a un 40% de caucho. (Navarro, 2013, pág. 18)

Por otro lado, los cauchos producidos sintéticamente se obtienen por reacciones químicas, conocidas como polimerización, a partir de determinados hidrocarburos insaturados. (Navarro, 2013, pág. 18)

Ambos tipos de cauchos son polímeros elastoméricos, un material con la propiedad mecánica de poder sufrir mucha más deformación elástica bajo tensión

que la mayoría de los materiales y regresar a su tamaño previo sin deformación permanente. (Náyade, 2006, pág. 18)

Durante la fabricación del neumático, los cauchos se someten al proceso de vulcanización consistente en entrelazar las cadenas de polímeros con moléculas de azufre mediante la acción de altas presiones y temperaturas. Los enlaces así formados son muy estables lo que hace que el proceso de desvulcanización sea difícil. Esta es la principal causa por la cual no es posible reciclar neumáticos desechados para la fabricación de neumáticos nuevos. (Navarro, 2013, pág. 18)

Componente de los neumáticos.

Un componente de los neumáticos que entra en proporciones altas, es el negro de carbono, que sirve como carga de refuerzo y para mejorar la resistencia de los cauchos a la oxidación. (Navarro, 2013, pág. 19)

El acero y material textil constituyen un segundo y tercer componente en magnitud del neumático, con la misión de ser el esqueleto del mismo y soportar y transmitir las cargas y esfuerzos que se producen sobre él durante la circulación de los vehículos. El óxido de zinc, el azufre y otra serie de productos químicos, que actúan como catalizadores, plastificantes, adhesivos, etc., terminan de dar la composición al neumático. (Navarro, 2013, pág. 19)

Clasificación de los neumáticos

La clasificación de los neumáticos se hace generalmente según el tipo de vehículos que los utiliza. Se ha estimado que un 80% de los neumáticos desechados proceden de automóviles o camionetas (peso aproximado de 8kg), un 20% de vehículos pesados

(peso aproximado de 65kg), y alrededor del 1% restante son neumáticos especiales para motocicletas, aviones, equipos de construcción u otros. (Navarro, 2013, pág. 19)

Los materiales que se obtienen tras el tratamiento de los residuos de neumáticos, una vez separados los restos aprovechables en la industria, pueden tener varios usos. Una aplicación realmente interesante para caucho es la aplicación como parte de los componentes de las capas asfálticas que se usan en la construcción de carreteras. Las carreteras que usan estos asfaltos son mejores y más seguras.

Obtención del polvo de caucho.

Las técnicas más utilizadas, son la trituración mecánica a temperatura ambiente y la trituración criogénica, a baja temperatura, y se realizan en plantas de reciclaje de neumáticos desechados. (Navarro, 2013, pág. 20)

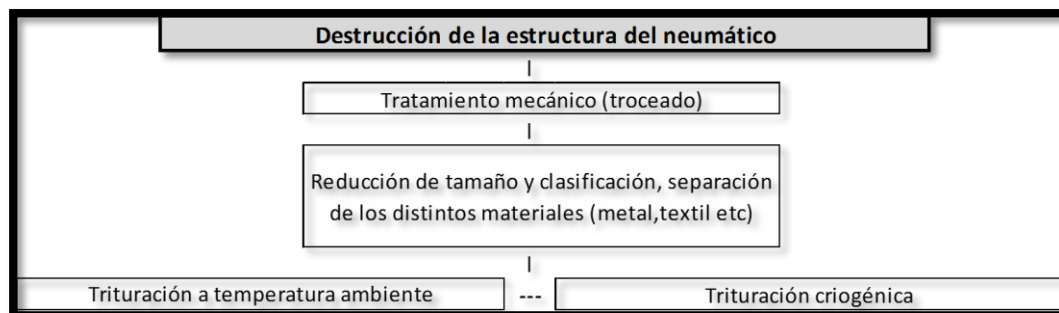


Figura 2-7: Etapas para la obtención de polvo de caucho

Fuente: Carlos Luis Verdezoto

Agregados del concreto asfáltico.

Los agregados que componen una mezcla asfáltica también denominados agregados áridos se clasifican en árido grueso, fino y polvo mineral o filler.

Figura 1-8: Porcentajes que pasa a través de los tamices de malla cuadrada

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través los tamices de malla cuadrada (MOP)		
	A	B	C
2" (50.8 mm.)	100	--	--
1 1/2" (38.1 mm.)	90 - 100	100	--
1" (25.4 mm.)		90 - 100	100
3/4" (19.0 mm.)	56 - 80	--	90 - 100
1/2" (12.5 mm.)	--	56 - 80	--
3/8" (9.5 mm.)	--	--	56 - 80
N° 4 (4.75 mm.)	23 - 53	29 - 59	35 - 65
N° 8 (2.36 mm.)	15 - 41	19 - 45	23 - 49
N° 50 (0.30 mm.)	4 - 16	5 - 17	5 - 19
N° 200 (0.075 mm.)	0 - 6	1 - 7	2 - 8

Fuente: MOP, F 001 2002.

Elaboración: Verdezoto Carlos

Agregado grueso

Porción del material que pasa el tamiz INEN 4.75mm. (N°4). (MOP, 2002)

Agregado fino

Porción del material que pasa el tamiz INEN 4.75mm (N°4) y es retenida en el tamiz INEN 75 micrones (N°200). (MOP, 2002, págs. IV-2)

Para la elaboración de una mezcla asfáltica, los agregados deben ser limpios, durables: libre de materia vegetal y lo más importante deben tener una correcta granulometría de acuerdo al uso de la mezcla en el pavimento. (Navarro, 2013)

Diseño de mezclas asfálticas

En una mezcla asfáltica en caliente de pavimentación, el asfalto y el agregado son combinados en proporciones exactas: Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el desempeño de la misma como pavimento terminado. (Náyade, 2006, pág. 8)

Existen métodos de diseño comúnmente utilizados para determinar las proporciones apropiadas de asfalto y agregado en una mezcla. Ellos son el Marshall, Hveem, Hubbard-Field y Triaxial de Smith.

Estos métodos de diseño son ampliamente usados en el diseño de mezclas asfálticas de pavimentación. La selección y uso de cualquiera de estos métodos de diseño de mezclas es, principalmente, asuntos de gustos en ingeniería, debido a que cada método contiene características y ventajas singulares. Cualquier método puede ser usado con resultados satisfactorios.

En el presente estudio sólo trataremos el método Marshall.

El objetivo principal del diseño mezclas asfálticas de pavimentación, consiste en determinar una combinación y graduación económica de asfalto y agregados (dentro de los límites de las especificaciones del proyecto) que produzcan una mezcla con:

- Suficiente asfalto para proporcionar un pavimento durable.
- Buena estabilidad para satisfacer las demandas de tránsito sin producir deformaciones
- Suficiente trabajabilidad para evitar la segregación al momento de colocación.

- Un contenido de vacíos lo suficientemente alto, para permitir una ligera cantidad de compactación adicional bajo las cargas producidas por el paso de vehículos sin que se produzca exudación.
- El diseño de mezcla adecuado, es generalmente el más económico y que cumple satisfactoriamente los criterios mencionados anteriormente.

Método de diseño Marshall

El concepto de este método fue desarrollado por Bruce Marshall, ingeniero del estado de Mississippi. En su forma actual surgió de una investigación iniciada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos en 1943. Su propósito es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente y establece densidades y contenidos óptimos de vacíos que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento. (Maila, 2013, pág. 18)

El método Marshall solo se aplica a mezclas asfálticas (en caliente), se usa cemento asfáltico calificado por una serie de ensayos que determinan las propiedades físicas de la muestra. La mezcla contiene agregados con tamaño máximo de 25 mm (1 pulgada). (Maila, 2013, pág. 18)

Se deben utilizar probetas 64 × 102 mm de diámetro. Una serie de muestras, cada una con la misma combinación de agregados, pero con diferente contenido de asfalto, preparadas de acuerdo a procedimientos específicos. (Maila, 2013, pág. 18)

Característica y comportamiento de las mezclas.

Una muestra de mezcla de pavimentación preparada en el laboratorio puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento. El análisis está enfocado hacia las características de la mezcla y la influencia que estas puedan tener en el comportamiento.

- Vacíos de aire, vacíos en el agregado mineral, vacíos llenos de asfalto, estabilidad y flujo

Este método nos organiza las proporciones volumétricas para componer una mezcla asfáltica que estén dentro de los rangos y especificaciones adecuadas para asegurar una mezcla asfáltica durable. Pero para poder determinar la estabilidad de un cemento asfáltico y el porcentaje óptimo debemos conocer la intensidad media diaria de vehículos pesados, la cual debe ser evaluadas o proyectada previamente, pero para efectos de ésta investigación sólo se considera el tipo *tráfico pesado* según lo estipulado en la tabla 2-3 por el MTOP.

Requisitos para la dosificación Marshall para la mezcla tradicional.

Tabla 1-0-3: Ensayos de acuerdo al método Marshall

Ensayos de acuerdo al método Marshall	TRAFICO					
	PESADO		MEDIO		LIVIANO	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
	75		50		35	
Estabilidad (Lb)	1800	----	1200	----	750	----
Flujo (Pulg/100)	8	16	8	18	8	20
% Vacíos en la mezcla	3	5	3	5	3	5

Fuente: MOP, F 001 2002.
Elaboración: Verdezoto Carlos

Densidad.

La densidad de la mezcla compactada está definida como su peso unitario (el peso de un volumen específico de la mezcla). La densidad es una característica muy importante debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero. (Maila, 2013, pág. 28)

En las pruebas y el análisis del diseño de mezclas, la densidad de la mezcla compactada se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cúbico. La densidad es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000 kg/m³). La densidad obtenida en el laboratorio se convierte la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es, o no, adecuada. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad del laboratorio. Esto se debe a que rara vez la compactación in situ logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación de laboratorio. (Maila, 2013, pág. 28)

Vacíos de aire, o simplemente vacíos.

Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios adonde pueda fluir el asfalto durante su compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos (en muestras de laboratorio) para capas de base y capas superficiales está entre 3 y 5 por ciento, dependiendo del diseño específico. (Maila, 2013, pág. 29)

La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie. (Maila, 2013, pág. 29) La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa.

Vacíos en el agregado mineral.

Los vacíos en el agregado mineral (VMA) son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto. (Maila, 2013, pág. 29)

El VMA representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde en el agregado) y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. Cuando mayor sea el VMA más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. (Maila, 2013, pág. 29)

Vacíos llenos de asfalto.

Es la fracción de los vacíos entre agregados minerales que contiene ligante asfáltico. Se expresa como porcentaje de los vacíos entre agregados minerales o VAM. Estos representan el volumen de asfalto efectivo presente en la mezcla. (I.N.V.E-799-07, 2012)

Estabilidad.

La estabilidad de un asfalto es su capacidad de resistir desplazamientos y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas, un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican cambios en la mezcla.

Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen del tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficiente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exijan las condiciones de tránsito. Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y, por lo tanto, menos durable que lo deseado. (Diseño de mezclas asfálticas, 2003, pág. 65)

La estabilidad de una mezcla depende de la fricción y la cohesión interna. La fricción interna en las partículas de agregado (fricción entre partículas) está relacionada con características del agregado tales como forma y textura superficial. la cohesión resulta de la capacidad ligante del asfalto.

Un grado propio de fricción y cohesión interna, en la mezcla, previene que las partículas de agregado se desplacen unas respecto a otras debido a las fuerzas ejercidas por el tráfico. (Diseño de mezclas asfálticas, 2003, pág. 65)

Flujo.

Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son

consideradas demasiado plásticas tiene tendencia a deformarse bajo las cargas del tránsito.

Técnicas de incorporación de caucho en mezclas asfálticas.

La incorporación de polvo de caucho proveniente de NFU a una mezcla asfáltica, se puede hacer de dos maneras, denominadas vía húmeda y vía seca. Ambos procedimientos se diferencian, además de la forma de ejecución, en el contenido de polvo de caucho que se utiliza para preparar la mezcla asfáltica. La denominación de los productos resultantes de ambos procesos de incorporación, se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1-0-4: Terminología asociada al polvo de caucho en mezclas asfálticas

PROCESO	PRODUCTO	% DE INCORPORACIÓN DE POLVO DE CAUCHO
Vía Húmeda	Asfalto modificado con polvo de caucho o Asfalto-Caucho	5 - 25% respecto al peso del cemento asfáltico
Vía Seca	Asfalto modificado con polvo de caucho	0.5 - 1.0% respecto al peso del árido

Fuente: Carlos Luis Verdezoto

Elaboración: Verdezoto Carlos

Proceso por vía húmeda.

En este proceso, se unen los granos de caucho con el cemento asfáltico para producir una mezcla modificada llamada asfalto-caucho, que es usada de la misma manera que un ligante modificado. Este proceso se encuentra definido en la norma ASTM D8-88.

La fabricación de asfalto-caucho consiste en la mezcla de los granos de caucho, usualmente de tamaño máximo 0.85 mm, con el cemento asfáltico en un estanque con agitación. Generalmente, el porcentaje de adición de caucho es entre 5-25% con respecto al peso del ligante.

Para promover la unión del asfalto y el caucho, es necesario establecer una temperatura y un tiempo de reacción dentro del estanque. Usualmente, la mezcla es formulada a temperaturas entre 160-190° C por 1 a 4 horas.

Dentro de los requerimientos del proceso húmedo, se establece que el estanque agitador debe estar en terreno, ubicado junto a la planta asfáltica.

Una vez que el asfalto-caucho alcance los parámetros requeridos, especialmente la viscosidad de la mezcla, se incorpora, en un proceso continuo, al mezclador de la planta asfáltica para unirse con los agregados pétreos.

Modificación del ligante.

Los granos de caucho al mezclarse con el cemento asfáltico, reaccionan con éste, hinchándose y ablandándose por la absorción de aceites aromáticos, los cuales son componentes químicos del asfalto que le dan la consistencia para que sea trabajable. Las partículas hinchadas se vuelven pegajosas, desarrollando propiedades adhesivas. Además, a medida que se reducen los aceites aromáticos que lubrican la mezcla, se observa un aumento en la viscosidad.

El proceso de hinchamiento de las partículas de caucho, no es del tipo química, pues las partículas no se funden en el asfalto. El proceso se asimila a lo que sucede con una esponja seca y dura al sumergirla en agua, pues a medida que la esponja absorbe el agua, se hincha y ablanda.

El grado de modificación del ligante depende de ciertos factores entre los cuales se encuentran el tamaño, textura y proporción de los granos de caucho, tipo de cemento asfáltico, tiempo y temperatura de mezclado, grado de agitación mecánica durante la reacción de la mezcla y el componente aromático del cemento asfáltico.

La viscosidad de la mezcla es el principal parámetro usado para supervisar la reacción, es por esto que debe ser chequeada a diferentes intervalos de tiempo durante el mezclado.

Especificaciones para el proceso vía húmeda

a) Requisitos de los materiales

Agregados: La fracción gruesa y fina, y el filler deben cumplir con los requisitos de una mezcla asfáltica en caliente según las especificaciones del MTOP.

Mezcla de agregados: Los áridos combinados deberán cumplir con la banda granulométrica convencional especificada por el MTOP que se indica en la tabla 2-8 de ésta investigación.

Ligante asfalto-caucho

Este ligante se compone de asfalto base y caucho de neumático triturado.

Asfalto base: Este material debe cumplir los requisitos de la tabla 2-2 de esta investigación.

Caucho triturado: Deberá provenir de la trituración de los neumáticos de vehículos corrientes usando el método ambiental o criogénico, o una combinación de ambos.

Características que debe cumplir el caucho.

El polvo de caucho debe cumplir con las características establecidas por el INVIAS 2012.

Tabla 1-0-5: Características del grano de caucho reciclado.

CARACTERÍSTICA	REQUISITO
Humedad	El GCR debe fluir libremente
Contenido de metal ferroso	Máximo 0.01%
Contenido de fibra	Máximo 0.5%
Contenido de polvo mineral (cómo talco): se suele usar para prevenir que los granos no se peguen.	Máximo 4%
Contenido total de otros elementos extraños; incluye: *Vidrio, arena y madera.	Máximo 0.25%

Fuente: INVÍAS 2012

Elaboración: Verdezoto Carlos

Granulometría del caucho.

El polvo de caucho debe cumplir con la granulometría colombiana establecida por el INVIAS 2012.

Tabla 1-0-6: Distribución de tamaños de granos de caucho reciclado.

TAMIZ (mm/U.S. Standard)						
TIPO DE GRADACIÓN	2.38	2.00	1.19	0.39	0.30	0.075
	N°8	N°10	N°16	N°30	N°50	N°200
% PASA						
TIPO A	100	95-100	0-10			
TIPO B	---	100	65-100	20-100	0-45	0-5

Fuente: INVÍAS 2012

Elaboración: Verdezoto Carlos

Mezcla Asfalto – Caucho.

Condiciones de preparación del ligante asfalto-caucho.

Tabla 1-7: Condiciones de preparación del ligante asfalto-caucho.

Porcentaje de caucho en masa al ligante total:	5-25%
Temperatura de reacción de la mezcla:	160-210°C
Tiempo de reacción (a la temperatura de reacción):	1-4 horas

Elaboración: Verdezoto Carlos

Características del estanque mezclador.

El estanque deberá tener un sistema de calentamiento que permita mantener temperaturas entre 160°C y 210°C, con agitadores tipo aspas para mantener en permanente agitación la mezcla asfalto-caucho durante el periodo de reacción.

Requisitos del ligante asfalto-caucho.

Tabla 1-0-7: Especificaciones del asfalto modificado con caucho

BETÚN MODIFICADO CON CAUCHO			NORMA IRAM
ENSAYOS	60 – 70		
	MÍNIMO	MÁXIMO	
Penetración (25°C, 100GR, 5s), mm/10	40	60	6576
Punto de ablandamiento A y B, °C	58	---	6841
Ductilidad (25°C, 5cm/min), %	10	---	6579
Punto de inflamación, Copa de Cleveland °C	235		6555

Fuente: LEMAC Centro de investigaciones viales

Elaboración: Verdezoto Carlos

Requisitos para la dosificación Marshall para la mezcla modificada.

Tabla 1-0-8: Requisitos para la mezcla modificada con caucho

Ensayos de acuerdo al método Marshall	Mínimo	Máximo
Estabilidad (Lb)	1800	----
Flujo (0.25 mm)	8	16
% Vacíos en la mezcla	3	6
% Vacíos en el agregado mineral (VAM)	14	----
Vacíos llenos con ligante	75	----

Fuente: Navarro Dupré, 2013

Elaboración: Verdezoto Carlos

Ventajas al usar polvo de caucho en las mezclas asfálticas.

Ventajas a las usas agentes modificadores en el cemento asfáltico es lograr propiedades reológicas no obtenidas en los asfaltos producidos con técnicas convencionales de refinación, principalmente las que tienen que ver con la sensibilidad térmica.

Los beneficios que se puede obtener al modificar el asfalto son:

- Aumentar la durabilidad del pavimento

*Disminuir la susceptibilidad térmica, de modo que se aumente la rigidez a altas temperaturas de servicio, mejorando la resistencia de las mezclas a la deformación permanente y, por otro lado, se reduzca la fragilidad del asfalto expuesto a bajas temperaturas, previniendo la fisuración térmica.

- Aumentar la resistencia a la fatiga de las mezclas

*Reducir el envejecimiento en servicio, ampliando la vida útil de las mezclas asfálticas, ya que se mantienen las ventajas iniciales.

En general, la incorporación de polvo de caucho en las mezclas asfálticas ha permitido mejorar sus propiedades, como disminución de la deformabilidad y mayor resistencia a las sollicitaciones del tránsito, los polímeros son sustancias orgánicas de alto peso molecular que logran hidratarse e hincharse al interactuar con el betún asfáltico.

Propiedades más relevantes de una mezcla asfáltica.

Módulos

A la magnitud del módulo complejo de una muestra asfáltica se le denomina Módulo Dinámico. Este depende tanto del tiempo como de la temperatura, por tal razón, es una de las propiedades más importantes de una mezcla asfáltica.

El módulo dinámico proporciona información de cuanto se deforma el material bajo la acción de una carga específica, y está relacionado al fisuramiento por fatiga, a la deformación permanente y a la propagación de una carga en una capa asfáltica.

Un material con un tiempo de carga corto, puede responder elásticamente recuperándose casi en su totalidad de la deformación a la que fue inducida; por otro lado, si es sometida a un tiempo de carga muy prolongado, la muestra presentará un comportamiento viscoso, y la recuperación de la deformación será mínima.

1.16) Fatiga.

El fenómeno de fatiga se puede definir como el proceso permanente, progresivo y localizado de cambio de las condiciones estructurales de un material sometido a

tensiones repetidas y consecuentemente deformaciones inducidas, y que en el caso de las muestras asfálticas culmina con la aparición de fisuras y grietas que conducen a la rotura total después de un número suficiente de repeticiones.

En una estructura de pavimento flexible, la aplicación repetida o ciclos de carga producen deformaciones transitorias a todas las capas que constituyen la estructura del pavimento y que pueden a la vez depender de la magnitud de la carga y la temperatura.

Cuando la estructura sufre deformaciones superiores a las admisibles en un lapso corto de tiempo, ésta comienza a acumularlas hasta el punto de producirse fracturamientos, fisuras, agrietamientos en bloque, piel de cocodrilo, baches o depresiones que son la manifestación visual del fenómeno de la fatiga en la superficie del pavimento.

1.17) Ahuellamiento

Este es un efecto causado por el movimiento progresivo de los materiales de las capas asfálticas de rodadura o bases asfálticas bajo cargas repetidas. Esto ocurre por consolidación o flujo plástico.

La consolidación es la compactación que sufre la capa después de construida debida al tránsito.

Los ahuellamientos también resultan de la deformación permanente por flujo lateral de tipo plástico de la mezcla asfáltica bajo las huellas de las llantas de los vehículos. El uso de un contenido alto de cemento asfáltico es la causa más común de este fenómeno. Mucho contenido de ligante en la mezcla causa la pérdida de

fricción interna entre las partículas de agregados, por lo que el cemento asfáltico va a tomar más carga que la estructura mineral.

1.18) Control de calidad con pruebas reológicas o de desempeño.

La reología es la parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación de los materiales que son capaces de fluir. Uno de los objetivos de utilizar las pruebas reológicas o desempeño en el proceso de calidad de los pavimentos asfálticos es encontrar ecuaciones constitutivas para modelar el comportamiento de los materiales, éstos ensayos son los más representativos dentro de ésta investigación.

En el laboratorio de la UCSG se cuenta con el equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT) modelo NU-10, el cual aplica las cargas mediante un sistema neumático con servo-control, midiendo la fuerza aplicada por el transductor de la celda de carga. Este equipo utiliza una computadora y sensores junto a programas que permiten desarrollar las distintas pruebas y procesar la información a través de ellos.

En general, se realizaron 3 tipos de pruebas dinámicas que se detallan a continuación:

- Módulo de rigidez, mediante deformación controlada.
- Fatiga (incluye el módulo de rigidez por carga controlada).
- Deformación permanente por compresión cíclica (Creep dinámico).

1.19) Módulo de rigidez mediante deformación controlada.

Vale recordar que el propósito de obtener un valor de rigidez es proveer información sobre las propiedades de un material, de manera que las respuestas tenso-deformacionales formando parte de un pavimento, bajo las cargas aplicadas, pueda ser determinada. Debido a que la rigidez no es una medida de la resistencia, una mezcla asfáltica con un alto valor de rigidez no necesariamente tendrá una alta resistencia. Un alto valor de rigidez indica que bajo un esfuerzo aplicado dado existirá una baja deformación en la mezcla, pero eso aún no significa una alta resistencia. Por ejemplo, un material frágil puede tener un alto valor de rigidez pero baja resistencia y un material muy flexible puede tener una baja rigidez pero mayor resistencia.

Mezclas muy rígidas en la capa asfáltica reducirán los esfuerzos en las capas inferiores que conforman el pavimento y el nivel de deformación en la parte inferior de la capa asfáltica, pero también incrementarán la sensibilidad de la mezcla a fatigarse.

Por otra parte, el ahuellamiento o deformación permanente en las mezclas asfálticas es afectada por su rigidez, sin embargo, no puede ser estimada solamente a partir de la misma, habiéndose demostrado la necesidad de pruebas especiales como las ruedas cargadas, etc. En general, las pruebas para determinar la rigidez, como el módulo resiliente o el módulo dinámico, emplean niveles bajos de carga o deformación, que no movilizan la estructura del agregado en la mezcla, lo cual es necesario para un análisis serio del ahuellamiento.

1. Se recomienda como un primer paso hacia el establecimiento de exigencias sobre mezclas recién producidas en planta, considerando los módulos de rigidez

bajo deformación controlada a 20°C evaluados con el equipo NAT, el siguiente criterio:

Mezclas satisfactorias: 3.000 a 4.000 MPa

Mezclas tolerables: 2.500 a 3.000 MPa y 4.000 a 5.000 MPa

Mezclas inadecuadas: menores a 2.500 MPa ó mayores a 5.000 MPa

Tanto este ensayo de módulo de rigidez como el ensayo de fatiga se realizaron empleando un cabezal de carga de tracción indirecta.

El módulo de rigidez se ensayó a una temperatura de 20°C, empleando un nivel de deformación controlada de 5 micrones y cargas haversine con intervalo de tiempo entre el inicio del pulso de carga y el punto en el que la carga es máxima (tiempo de aplicación de carga) de 0,12 segundos. Ver Figura 2-9.

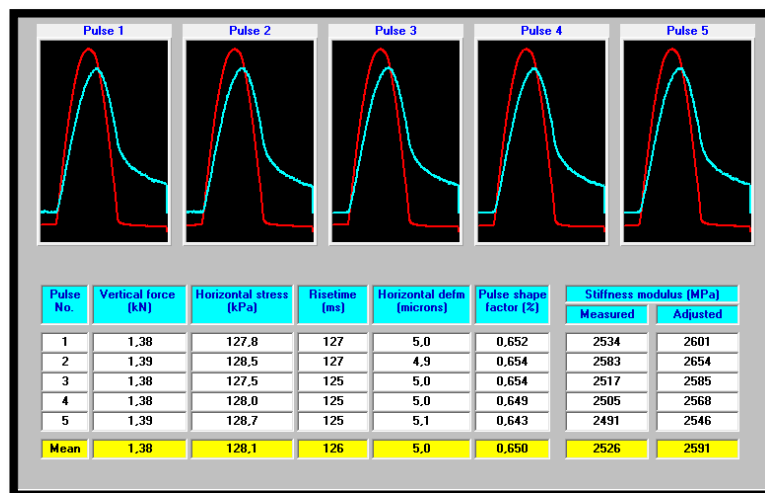


Figura 2-9: Salida de resultados en una prueba de módulo de rigidez

Fuente: Laboratorio U.C.S.G.

1.20) Ensayo de Fatiga

El ensayo de fatiga se realiza empleando tensiones controladas en general entre 100 y 500 KPa, determinándose el número de pulsos requeridos para alcanzar para

que la muestra falle por agrietamiento o en su defecto alcance una deformación vertical máxima de 5 mm. Estos pulsos también poseen un tiempo de aplicación de carga de 0,12 segundos. La temperatura empleada para estos ensayos fue constante y de 20°C, valor usual. Ver Figura 2-10.

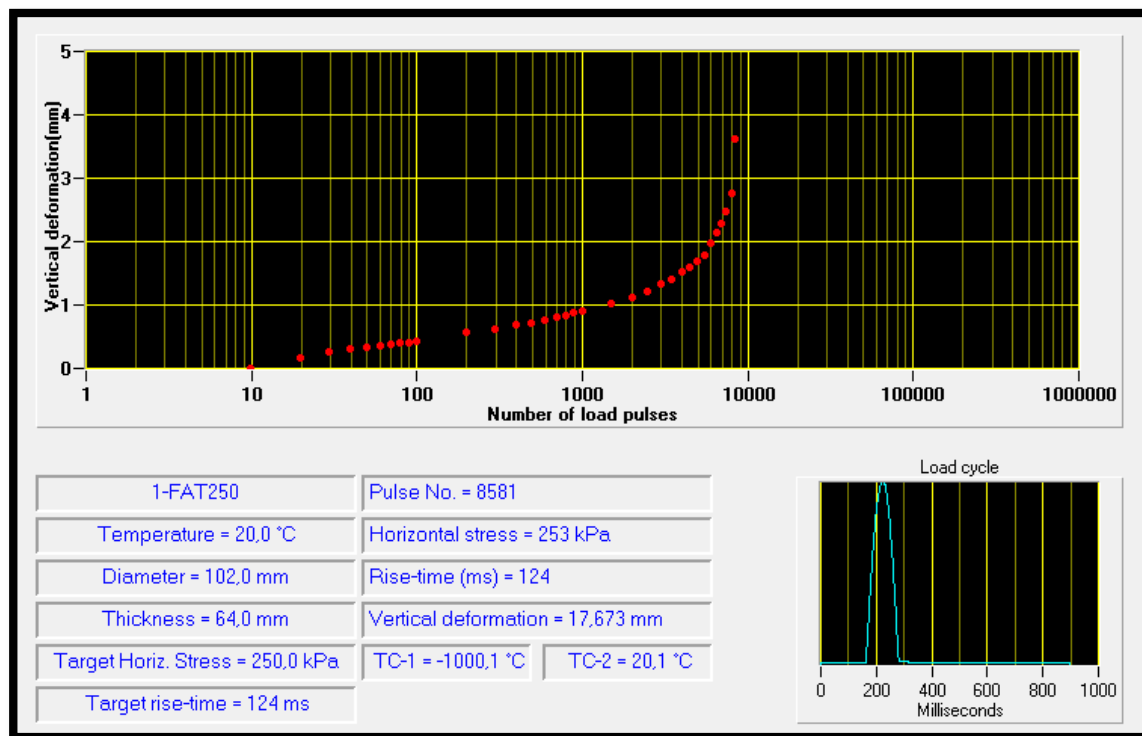


Figura 2-10: Salida de resultados en una prueba de fatiga

Fuente: Laboratorio U.C.S.G

1. Existe la necesidad de realizar para vías de tráfico pesado un control de la mezcla para evaluar su posible desempeño a la fatiga, si bien este comportamiento también está relacionado con la rigidez de la capa que soporta dicha mezcla.

2. Se recomienda como un primer paso hacia el establecimiento de exigencias respecto a la fatiga mediante pruebas con el NAT, especialmente para los controles de calidad sobre mezclas recién producidas en planta:

- a) Ejecutar pruebas de fatiga sobre 3 ó más briquetas en valores de esfuerzo que correspondan con una deformación unitaria inicial determinada por el módulo bajo esfuerzo controlado.
- b) Si los puntos para la mezcla en particular analizada caen por debajo de la línea del percentil, el comportamiento estimado será MALO. Si los puntos se ubican por arriba de la línea del promedio, el comportamiento estimado será BUENO. Entre ambas líneas el comportamiento no puede garantizarse como bueno, aunque puede considerarse como tolerable mientras se desarrollan más estudios que aporten a la reducción de este umbral.

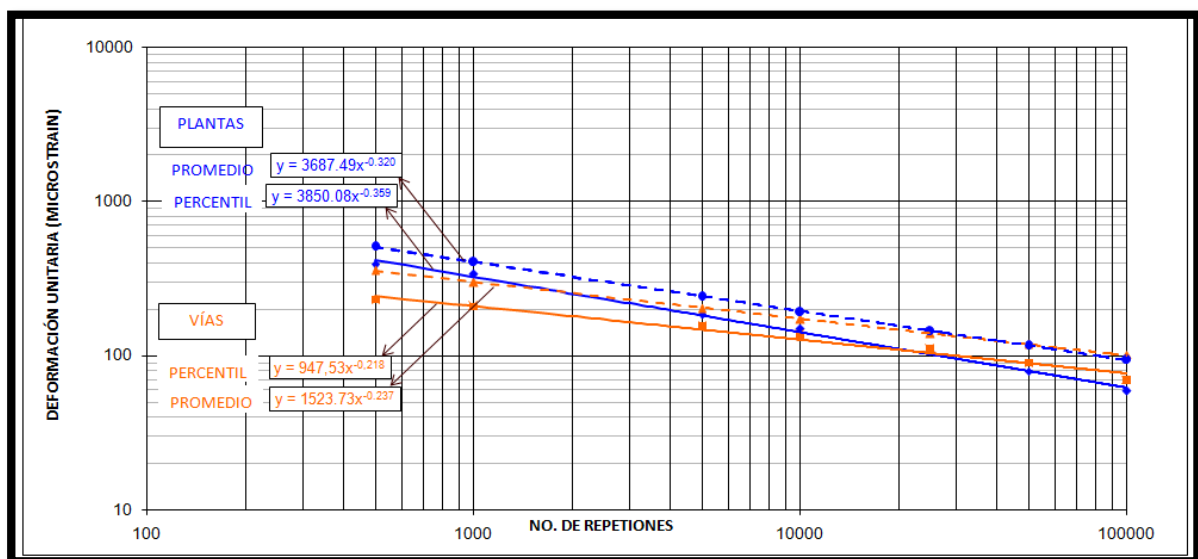


Figura 2-11: Promedios y percentiles de vías y plantas
Fuente: Laboratorio de investigaciones de la U.C.S.G

Esta prueba se está aplicando de manera introductoria en controles a briquetas y núcleos en nuestro laboratorio. Consta de los siguientes pasos:

1. Obtención inicial del módulo rigidez bajo deformación controlada.

2. Cálculo del esfuerzo (σ en kPa) considerando un valor de deformación unitaria (ϵ) igual a 150 μ strain y un coeficiente de Poisson (μ) igual a 0.35.

$$\sigma(KPa) = \frac{Sm(KPa) \epsilon}{(1 + 3\mu)}$$

3. Aproximar el esfuerzo calculado a los permitidos por el NAT para los ensayos de módulos bajo carga controlada. Por ejemplo, esfuerzos de 300, 350 ó 400 KPa.

4. Con dicho esfuerzo aproximado realizar una prueba de módulo de rigidez bajo carga controlada, volviéndose a calcular el esfuerzo según el punto 2 y aproximando a los permitidos (punto 3). Este proceso se repite hasta que el esfuerzo calculado se aproxime al de la prueba.

5. Realizar ensayo de fatiga bajo carga controlada en el NAT para determinar el número de repeticiones para el fallo. Si estas superan las 10.000 repeticiones puede considerarse que la mezcla tendrá un comportamiento a la fatiga satisfactorio.

1.21) Deformación permanente (Creep dinámico)

La prueba de deformación permanente o de carga axial repetida, conocida como creep dinámico, se efectuó para estimar el comportamiento ante las deformaciones plásticas. Un ciclo de carga consiste en la aplicación de un esfuerzo durante 1 segundo seguido por 1 segundo de descanso, es decir, se emplearon ondas cuadráticas. El ensayo se realizó a una temperatura de 40 °C, midiendo las deformaciones provocadas por 3600 repeticiones de cargas de 100 kPa. (Ver Figura 2-12).

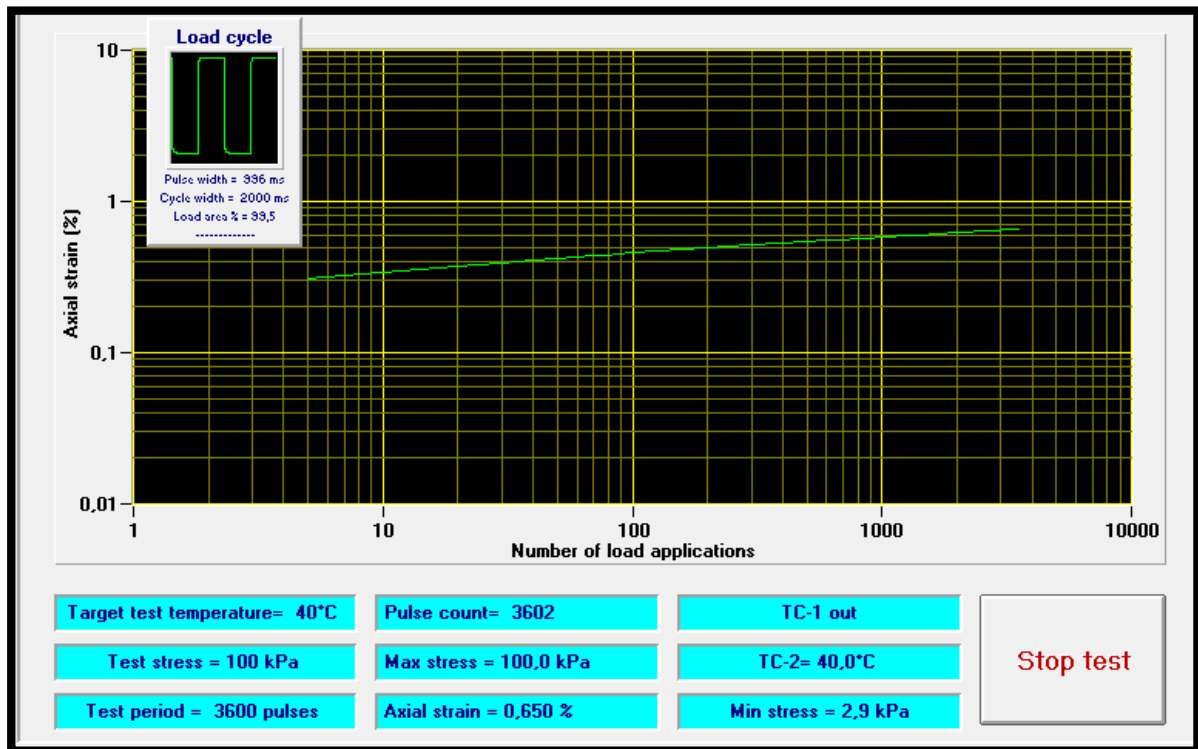


Figura 2-12: Salida de resultados en una prueba de deformación
Fuente: Laboratorio U.C.S.G

Para la realización de todas las pruebas con el NAT se consideraron las metodologías dadas por el fabricante del equipo (Cooper Research Technology), que coinciden en general con las del Comité Europeo de Normalización, CEN 12697, del año 2001.

Se recomienda como un primer paso hacia el establecimiento de exigencias sobre mezclas recién producidas en planta, considerando el porcentaje de deformación determinado mediante la prueba de compresión cíclica uniaxial a 40°C evaluado con el equipo NAT, el siguiente criterio:

Mezclas satisfactorias: valores menores o iguales a 1%

Mezclas inadecuadas: valores mayores 1%

CAPÍTULO III DESARROLLO DE ESTUDIO.

La recopilación de información útil a ésta investigación se pudo acceder a documentos, informes, libros, normas, tesis de grado y experiencias extranjeras en la incorporación de asfalto-caucho con el propósito de recopilar la mayor información posible y usarlas cómo referencia en éste proyecto.

Diseño del desarrollo de estudio

Para llevar a cabo este proyecto se empleará cemento asfáltico y agregados pétreos que provienen de la planta Licosa ubicada en el km 16.5 de la vía Daule, Guayaquil, y polvo de caucho reciclado granular que proviene de la plata Rubberaction ubicada en Quito, barrio Chiche, Av. José Rafael Bustamante.



Figura 1-1: Planta Licosa Ingeniería y construcción.

Fuente: Licosa S.A

Se procederá a realizar los ensayos preliminares al caucho a los agregados y al cemento asfáltico para ver si cumplen las especificaciones requeridas.

Análisis del caucho (INVIAS 2012).

- a) Análisis de las partículas de caucho
- b) Granulometría del caucho

Mezcla asfalto-caucho (condiciones de preparación).

- c) Porcentaje de caucho en masa al ligante total: 5-25%
- d) Temperatura de reacción de la mezcla: 160-190°C
- e) Tiempo de reacción (a la temperatura de reacción): 1-4 horas

Características del estanque mezclador.

El estanque deberá tener un sistema de calentamiento que permita mantener temperaturas entre 160°C y 190°C, con agitadores tipo aspas de alto corte con una velocidad (1500 – 2000 r.p.m) para mantener en constante agitación la mezcla asfalto-caucho durante el periodo de reacción.

Análisis de la calidad del cemento asfáltico.

- f) Penetración AASHTO T49 ASTM D5
- g) Punto de ablandamiento AASHTO T53 ASTM D36
- h) Ductilidad AASHTO T51 ASTM D 113
- i) Punto de inflamación AASHTO T48 ASTM D92
- j) Peso específico AASHTO T229-94 ASTM D71-94

Método de diseño Marshall.

- k) Caracterización de agregados
- l) Análisis granulométrico y mezcla de agregados

Elaboración de probetas de ensayo.

Caracterización de la mezcla compactada

Los datos más importantes del diseño de mezclas del método Marshall son:

Densidades

- m) Porcentaje de vacíos en aire de la mezcla
- n) Porcentaje de vacíos de agregado mineral (VAM)
- o) Porcentaje de vacíos llenos de Asfalto (VFA).
- p) Estabilidad corregida.
- q) Fluencia (flujo).

Pruebas de desempeño de las mesclas asfálticas (NAT- NU-10).

- r) Módulo de rigidez mediante deformación controlada
- s) Fatiga (Incluye el módulo de rigidez por carga controlada)
- t) Deformación permanente por compresión cíclica (Ensayo conocido como Creep dinámico, ahuellamiento o deformación plástica)
- u) Los resultados de los ensayos antes mencionados se verificarán que los materiales si cumplen las exigencias requeridas por la normativa.

Se procederá a realizar diseños tanto en normal como en modificada con 5 y 10 % de polvo de caucho con respecto al peso del ligante en diferentes dosificaciones variando el contenido de asfalto (4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, y 7.0%).

Los 3 diseños se evaluarán independientemente mediante ensayos ya antes mencionados que determinen su comportamiento y desempeño para

poder realizar un modelo comparativo de los resultados obtenidos en las muestras tradicionales versus las modificadas con polvo caucho.

Finalmente se darán las respectivas conclusiones y recomendaciones las cuales pueden aportar para futuras investigaciones.

Aplicación del desarrollo de estudio.

a.- Análisis de las partículas de caucho.

El grano de caucho reciclado debe presentar las características que se mencionan en la Tabla 3-1.

Tabla 2-0-1: Resultados del análisis de partículas de caucho

CARACTERÍSTICA	REQUISITO	NORMA	RESULTADO
Humedad	El GCR debe fluir libremente	ASTM D6114	Cumple
Contenido de metal ferroso	Máximo 0.01%	ASTM D6114	0.001%
Contenido de fibra	Máximo 0.5%	ASTM D6114	0.5%
Contenido de polvo mineral (cómo talco): se suele usar para prevenir que los granos no se peguen.	Máximo 4%	ASTM D6114	No presenta
Contenido total de otros elementos extraños; incluye *Vidrio, arena y madera.	Máximo 0.25%	ASTM D6114	0.25%

Fuente: INVIAS 2012

Elaboración: Carlos Luis Verdezoto

b.- Granulometría del caucho.

Tabla 2-0-2: Granulometría del caucho según el NEVI 2012

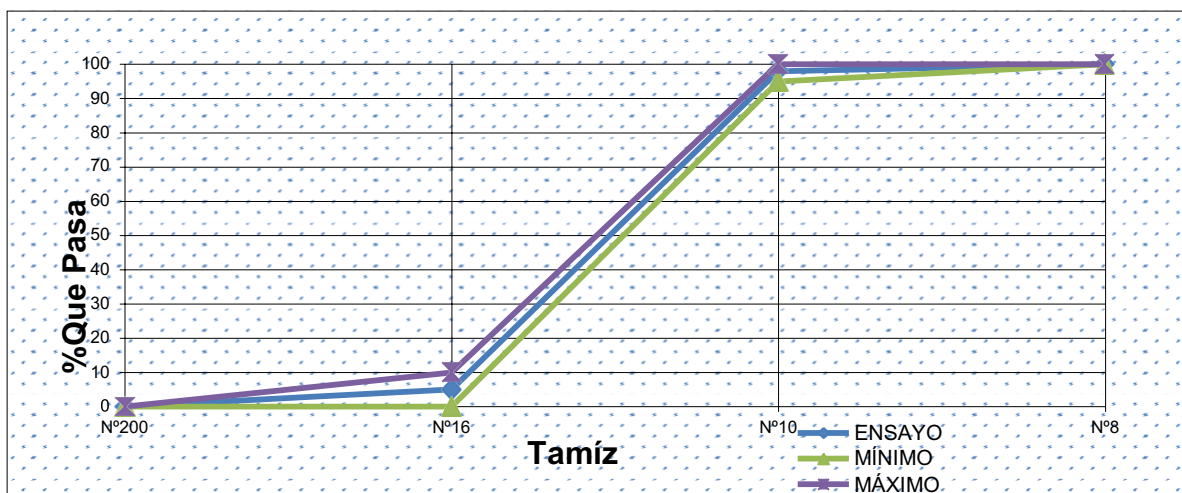
Tamiz	Peso Parcial grs.	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa	Especificación ASTM - C - 33 AF
No. 8	0,0	0,0	0,0	100,00	100
No. 10	56,0	2,0	2,0	98,00	95-100
No. 16	2600,0	93,0	95,0	5,01	0-10
No.200	140,0	5,0	100,0	0,00	----
FONDO	0,0	0,0	100,0	0,0	-----
TOTAL	2796,0	100,0			

Fuente: Laboratorio Ruffilli

Elaboración: Carlos Luis Verdezoto



Tabla 2-0-3: Gráfica de granulometría del caucho (NEVI 2012)



Fuente: Carlos Luis Verdezoto

1.28.1) Mezcla Asfalto – Caucho (condiciones de preparación).

a.- **Porcentaje de caucho en masa al ligante total:** 5-20%

Tabla 2-0-4: Porcentaje de polvo de caucho para la mezcla asfalto-caucho

CANTIDADES DE ASFALTO Y POLVO DE CAUCHO USADAS PARA EVALUAR CUALITATIVAMENTE EL PROCESO DE MEZCLADO				
Muestra	Asfalto	Polvo de caucho		Observación
	(gr)	(%)	(gr)	
A	1600	----	----	(Asfalto sin modificar)
B	1600	5	80	(Asfalto modificado con 5% de caucho)
C	1600	10	160	(Asfalto modificado con 10% de caucho)

Fuente: Carlos Luis Verdezoto



Figura 3-2: Porcentaje de polvo de caucho para la mezcla asfalto-caucho

Fuente: Carlos Luis Verdezoto.

b.- Temperatura de reacción de la mezcla.

El asfalto es pre-mezclado con el caucho a una temperatura (160°C)

c.- Tiempo de reacción.

La mezcla tiene un tiempo de mezclado de 2 horas, 30 minutos por cada porcentaje de caucho.

Características del estanque mezclador.

Para el efecto se utilizó un mecanismo de agitación de alto corte con una velocidad de 1500 r.p.m , ésta mezcla se realizó en condiciones de laboratorio empleando una mezcladora tipo BLAKESLEE con agitador aspas y mediante un mechero se mantuvo la mezcla a 160°C agitándose dentro del recipiente del mezclador controlando la temperatura mediante un termómetro láser FRANCE.



Figura 3-2: Máquina mezcladora de asfalto-caucho

Fuente: Carlos Luis Verdezoto.

Análisis de calidad del cemento asfáltico.

Para determinar las características y calidad del cemento asfáltico se procedió a realizar diversos ensayos tradicionales que tratan de representar el comportamiento a escala real del material, la importancia de los requisitos y exigencias de calidad del cemento asfáltico tanto por parte del productor, comercializador, transportista, contratista y fiscalizador es de carácter necesario ya que está estipulado al procedimiento para la aceptación de un ligante asfáltico en trabajos de pavimentación.

A continuación, se presenta una breve descripción de cada uno de ellos y se enuncia la norma que los rige. Los resultados obtenidos corresponden a las muestras de cemento asfáltico tradicional y modificado con 5 y 10% de caucho, tomando en cuenta las mismas especificaciones, procedimiento y equipos de los ensayos normales de caracterización de las muestras asfálticas.

Penetración AASHTO T49 ASTM D5.

Mediante este ensayo se pudo determinar la consistencia del cemento asfáltico, el resultado obtenido nos demuestra que el cemento asfáltico sin modificar AC-20 cuyo rango de penetración va desde (60-70) dmm., es apto para ser utilizado.



Figura 3-3 : Ensayo de Penetración de las muestras asfálticas

Fuente: Carlos Luis Verdezoto.

Resultados

Tabla 2-0-5: Resultados de ensayos de penetración

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE PENETRACIÓN (dmm)						
Muestra	Penetración N°1	Penetración N°2	Penetración N°3	Promedio	Norma	Observación
A	69	67	68	68	MOP (60-70 dmm)	(Asfalto sin modificar)
B	53	55	52	53	IRAM (40-60dmm)	(Asfalto modificado con 5% de caucho)
C	42	44	42	44	IRAM(40 - 60dmm)	(Asfalto modificado con 10% de caucho)

Fuente: Carlos Luis Verdezoto.

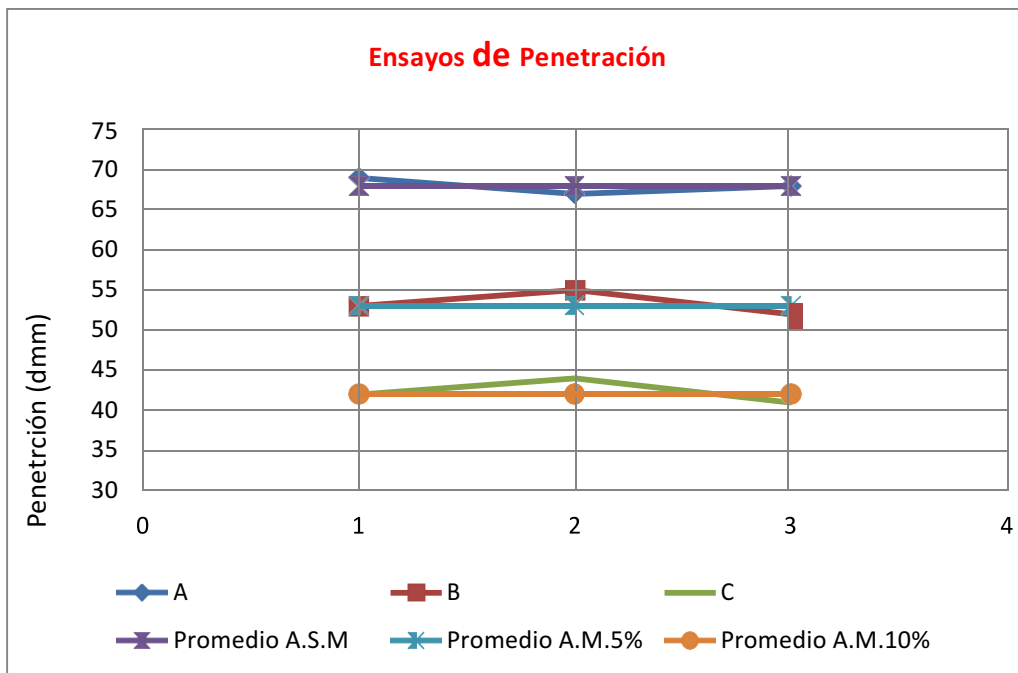


Figura 3-4: Gráfico de ensayo de penetración.

Fuente: Carlos Luis Verdezoto.

Se puede observar en el gráfico que al agregar el caucho al cemento asfáltico éste se va endureciendo, lo que significa que la penetración va a ser menor.

Las normas que tomamos como referencia nos muestran que los ensayos de penetración realizados tanto en asfalto sin modificar cómo en modificado con 5 y 10% de caucho si cumplen con los requerimientos.

Punto de ablandamiento AASHTO T53 ASTM D36.

Éste ensayo se emplea frecuentemente para caracterizar los materiales más duros, debido a que nos indica la consistencia del asfalto donde nos dice cuando el asfalto toma la temperatura necesaria para poder ablandarse.



Figura 3-5: Ensayo de punto de ablandamiento

Fuente: Carlos Luis Verdezoto.

Tabla 2-0-6: Resultados de ensayos de punto de ablandamiento

Muestra	RESULTADOS DE ENSAYOS DE PUNTO DE ABLANDAMIENTO	Norma	Observación
A	50°C	MOP (Mín 48°- Máx 57°C)	(Asfalto sin modificar)
B	59°C	IRAM (Mín 58°C)	(Asfalto modificado con 5% de caucho)
C	60°C	IRAM (Mín 58°C)	(Asfalto modificado con 10% de caucho)

Fuente: Carlos Luis Verdezoto

1.29.1) Ductilidad AASHTO T51 ASTM D 113.

Este ensayo nos permitió determinar distancia en centímetros que las muestras de cemento asfáltico pueden estirarse sin romperse.



Figura 3-6: Ensayo de ductilidad de las muestras asfálticas

Fuente: Carlos Luis Verdezoto.

Tabla 2-0-7: Resultados de ensayos de ductilidad

RESULTADOS DE ENSAYOS DE DUCTILIDAD (cm)						
Muestra	Ductilidad N°1	Ductilidad N°2	Ductilidad N°3	Promedio	Norma	Observación
A	97	105	140	114	MOP (Mín 100cm)	(Asfalto sin modificar)
B	22	25	27	25	IRAM (Mín 10cm)	(Asfalto modificado con 5% de caucho)
C	12	15	10	12	IRAM (Mín 10cm)	(Asfalto modificado con 10% de caucho)

Fuente: Carlos Luis Verdezoto.

Elaboración: Carlos Luis Verdezoto.

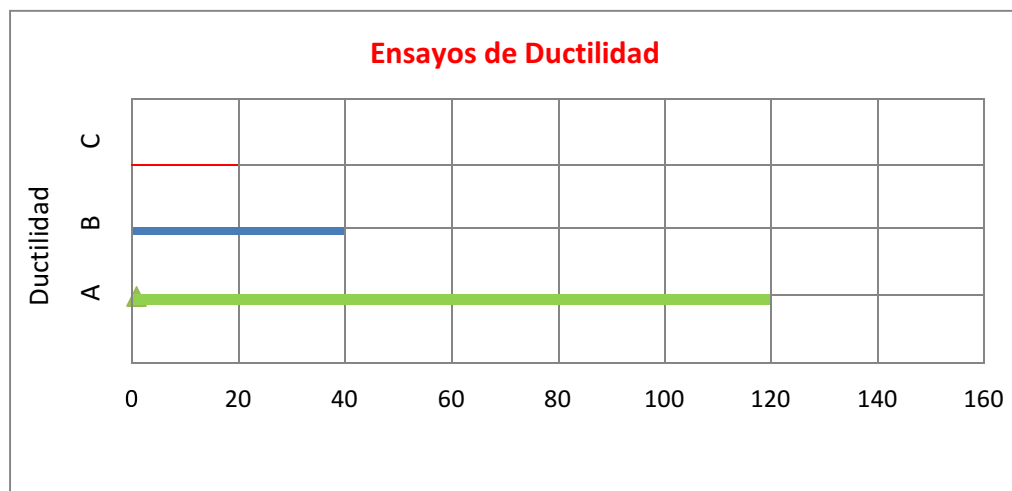


Figura 3-7: Gráfico de ensayos de ductilidad

Fuente: Carlos Luis Verdezoto.

Punto de inflamación AASHTO T48 ASTM D92.

El punto de inflamación nos permite determinar la combustión instantánea de las fracciones volátiles que se están separando del asfalto mediante el procedimiento de la copa de Cleveland.



Figura 3-8: Ensayos de punto de inflamación

Fuente: Carlos Luis Verdezoto.

Tabla 2-0-8: Resultados de los ensayos de punto de Inflamación

Muestra	RESULTADOS DE ENSAYOS DE PUNTO DE INFLAMACIÓN	Norma	Observación
A	250°C	MOP (Mín 232°C)	(Asfalto sin modificar)
B	255°C	IRAM (Mín 235°C)	(Asfalto modificado con 5% de caucho)
C	255°C	IRAM (Mín 235°C)	(Asfalto modificado con 10% de caucho)

Fuente: Carlos Luis Verdezoto
Elaboración: Carlos Luis Verdezoto.

Peso específico AASHTO T229-94 ASTM D71-94.

El peso específico de una sustancia es la proporción peso - volumen de una unidad de esa sustancia comparada con la proporción peso - volumen de una unidad igual de agua. El peso específico de una muestra de agregado es determinado al comparar el peso de un volumen dado de agregado con el peso de un volumen igual de agua, a la misma

Tabla 2-0-9:Resultados de ensayos de peso específico

RESULTADOS DE ENSAYOS DE PESO ESPECÍFICO				
		NORMAL	MODIFICADO 5%	MODIFICADO 10%
Peso del Picnómetro lleno de agua	(b)	69,93	69,93	69,93
Peso del Picnómetro solo	(a)	36,46	36,46	36,46
	(b-a)	33,47	33,47	33,47
Peso del picnómetro + cemento asfáltico	(c)	59,01	59,06	59,09
Peso del picnómetro solo	(a)	36,46	36,46	36,46
	(c-a)	22,55	22,60	22,63
Peso del picnómetro + asfalto + agua para llenar el picnómetro	(d)	70,20	70,31	70,36
Peso del picnómetro + cemento asfáltico	(c)	59,01	59,01	59,01
	(d-c)	11,19	11,3	11,35
	(b-a)-(d-c)	22,28	22,17	22,12
Gravedad Específica= $\frac{(c-a)}{(b-a)-(d-c)}$		1,012	1,019	1,023

Fuente: Carlos Luis Verdezoto

Elaboración: Carlos Luis Verdezoto.



Figura 3-9 : Ensayo de peso específico

Fuente: Carlos Luis Verdezoto

Deducción General

Observamos que todos los ensayos que se realizó al cemento asfáltico para determinar sus parámetros físicos, tanto al cemento asfáltico tradicional, como al cemento asfáltico modificado con 5 y 10% de caucho, cumplen con todas las normas establecidas y que fueron analizadas en este estudio comparativo.

1.1) Método de diseño Marshall (AASHTO T245 o ASTM D1559).

Esta norma describe el procedimiento que debe seguirse para la determinación de la resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas para pavimentación. El procedimiento puede emplearse tanto para el proyecto de mezclas en el laboratorio como para el control en obra de las mismas.

Este método consiste en moldear briquetas con la mezcla de agregados y asfalto en caliente. Estas briquetas dispuestas en serie y cada serie con diferentes porcentajes de asfalto, se las moldea una vez que los materiales (agregados y asfalto) hayan sido aprobados según sus respectivas especificaciones de calidad, tamaño, etc.

Para empezar con el método debemos cumplir con requisitos dispuestos por el método Marshall, seleccionando el tráfico que pasará por la carpeta asfáltica para la cual estamos diseñando, pero cómo ésta investigación se trata de la mejora que podemos brindar a las mezclas asfálticas por medio de la incorporación de caucho, sólo se escogerá un tráfico expuesto en la normativa por el MOP, que recae sobre un tráfico pesado en el cuál para su correspondiente compactación de la mezcla se requiere 75 golpes por cara en cada biqueta.

1.1.1) Caracterización de agregados.

Agregado grueso (Piedra)

Fuente del material	:	<u>LICOSA S.A</u>	
Descrip. del material	:	<u>AGREGADO GRUESO (PIEDRA)</u>	
Fecha	:	<u>SEPTIEMBRE DEL 2016</u>	Muestra: <u>1</u>

Datos:			
A = Peso en el aire de la muestra secada en estufa	=	<u>986,00</u>	gr
B = Peso en el aire de la muestra saturada con superficie seca	=	<u>1.000,00</u>	gr
Peso de la canastilla sumergida + material	=	<u>1.804,00</u>	gr
Peso de la canastilla sumergida	=	<u>1.157</u>	gr
C = Peso de la muestra, sumergida en agua	=	<u>647</u>	gr

<u>GRAVEDAD ESPECIFICA DE MASA SECA (BULK)</u>			
Gravedad específica de masa =	$\frac{A}{B - C} \times 1.000 = \frac{986}{1000 - 647} \times 1.000$		
Gravedad específica de masa =	$\frac{986}{353} \times 1.000$		
Gravedad específica de masa =	<u>2.793</u>	Kg/m ³	

<u>GRAVEDAD ESPECIFICA DE MASA SATURADA CON SUPERFICIE SECA (DSSS)</u>			
Gravedad específica de masa con superficie seca =	$\frac{B}{B - C} \times 1000 = \frac{1.000,00}{1000 - 647} \times 1000$		
Gravedad específica de masa con superficie seca =	$\frac{1.000,00}{353} \times 1000$		
Gravedad específica de masa con superficie	=	<u>2.833</u>	Kg/m ³

<u>GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE</u>			
Gravedad específica de masa con superficie seca =	$\frac{A}{A - C} \times 1.000 = \frac{986}{986 - 647} \times 1000$		
Gravedad específica de masa con superficie seca =	$\frac{986}{339} \times 1.000$		
Gravedad específica de masa con superficie seca =	<u>2.909</u>	Kg/m ³	

<u>PORCENTAJE DE ABSORCIÓN</u>			
Porcentaje de absorc =	$\frac{B - A}{A} \times 100 = \frac{1000 - 986}{986,00} \times 100$		
Porcentaje de absorc =	$\frac{14,00}{986,00} \times 100$		
Porcentaje de abs	=	<u>1,42%</u>	

Agregado fino (Arena).

Fuente del material	:	<u>LICOSA S.A</u>		
Descrip. del material	:	<u>AGREGADO FINO (ARENA)</u>		
Fecha	:	<u>SEPTIEMBRE DEL 2016</u>	Muestra:	1

<u>Datos:</u>				
A = Peso de la muestra (SSS)	=	<u>500,00</u>	gr	500
B = Peso picnómetro + agua	=	<u>500,00</u>	gr	V
C = Peso + agua + arena	=	<u>315,63</u>	gr	W
D = Peso seco en la estufa	=	<u>486,61</u>	gr	A


<u>GRAVEDAD ESPECIFICA DE MASA SECA (BULK)</u>				
Gravedad específica de masa =	$\frac{D}{V - W} \times 1.000 =$	$\frac{486,61}{500 - 315,63} \times 1.000$		
Gravedad específica de masa =	$\frac{486,61}{184} \times 1.000$			
Gravedad específica de masa =	<u>2.639</u>	Kg/m ³		

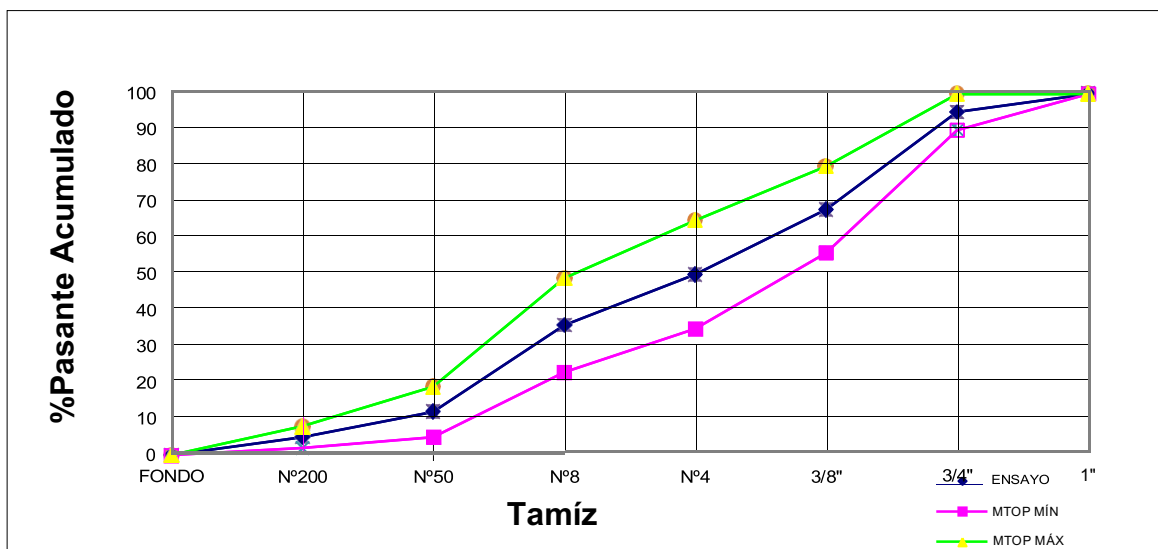
<u>GRAVEDAD ESPECIFICA DE MASA SATURADA CON SUPERFICIE SECA (DSSS)</u>				
Gravedad específica de masa con superficie seca =	$\frac{A}{B + A - C} \times 1000 =$	$\frac{500,00}{500 + 500 - 315,63} \times 1000$		
Gravedad específica de masa con superficie seca =	$\frac{500,00}{684,37} \times 1000$			
Gravedad específica de masa con superficie s	=	<u>731</u>	Kg/m ³	

<u>GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE</u>				
Gravedad específica de masa con superficie seca =	$\frac{A}{A - C} \times 1.000 =$	$\frac{500}{500 - 315,63} \times 1000$		
Gravedad específica de masa con superficie seca =	$\frac{500}{184} \times 1.000$			
Gravedad específica de masa con superficie seca =	<u>2.712</u>	Kg/m ³		

<u>PORCENTAJE DE ABSORCIÓN</u>				
Porcentaje de absorci =	$\frac{A - D}{D} \times 100 =$	$\frac{500 - 486,609}{486,61} \times 100$		
Porcentaje de absorci =	$\frac{13,39}{486,61} \times 100$			
Porcentaje de abso	=	<u>2,75%</u>		

b.- Análisis granulométrico de agregado grueso y fino.

 Universidad de Guayaquil Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas Escuela de Ingeniería Civil					
ENSAYO GRANULOMÉTRICO					
FUENTE DEL MATERIAL:	LICOSA S.A				
UBICACIÓN:	GUAYAQUIL - ECUADOR				
PROYECTO:	ELABORACIÓN DE UNA MEZCLA PARA CARPETA DE RODADURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE CON CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO UTILIZANDO POLVO DE CAUCHO.				
Tamiz	Peso Parcial grs.	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa	Especificación (MTOF-F001 2002)
1"	0,0	0,0	0,0	100,0	100
3/4"	2500,0	5,0	5,0	95,0	90-100
1/2"					
3/8"	13500,0	27,0	32,0	68,0	56-80
1/4"					
No. 4	9000,0	18,0	50,0	50,0	35-65
No. 8	7000,0	14,0	64,0	36,0	23-49
No. 50	12000,0	24,0	88,0	12,0	5-19
No. 80					
No. 100					
No. 200	3500,0	7,0	95,0	5,0	2-8
FONDO	2500,0	5,0	100,0		
TOTAL	50000,0	100,0			



Elaboración de probetas de ensayo.

Para determinar el contenido óptimo de asfalto se prepararán 6 grupos de 3 briquetas cada grupo para cada diseño, es decir 18briquetas para hallar el diseño de la mezcla sin modificar, 18 briquetas para la muestra modificada con 5% de polvo caucho, y 18 briquetas para la muestra modificada con 10% de polvo de caucho, sumando un total de 54 briquetas.

En lo posterior se realizarán gráficos con curvas que representen los resultados de los ensayo, y muestren un valor óptimo bien definido, cada grupo con diferente contenido de asfalto. Este contenido variara con incrementos de 0.5% de un grupo a otro grupo.

· Para fijar el contenido de asfalto a emplear en estos ensayos de laboratorio, primero se debe estimar aproximadamente el contenido teórico óptimo de asfalto, para esto se utiliza la fórmula empírica (Ecuación N°1), del Instituto del Asfalto.

Ecuación N° 1. Determinación de la Cantidad Aproximada de Asfalto.

$$\%A = 0.035a + 0.045b + K.c + F$$

Dónde:

%A= % de asfalto en la mezcla.

a =% Retenido tamiz N°8.

b = % Pasante tamiz N°8.

c= % de agregado que pasa la malla N°200.

K = 0.15 si él % que retiene el tamiz 3/4" está entre 11% y 15%.

0.18 si él % que retiene está entre 6% y 10%.

0.20 si él % que retiene es el 5% o menos.

F= de 0 a 2% que varía según la absorción del material.

Caálculo:

$$\%A = 0.035a+0.045b+K.c+F$$

$$\%A = 0.035(14)+0.045(36)+ (0.2) (5)+ (2.75) \Rightarrow \%A = 5.86 \%$$

Los porcentajes de asfalto con los que se trabajara para los diferentes grupos de briquetas son el 4.5%, 5%, 5.5%, 6%, 6.5% y 7%.

Procedimiento.

Antes de preparar la mezcla, el conjunto del molde y la base de compactación se limpian y calientan a una temperatura entre 100 y 150°C.

Por un lado, se pesan en bandeja separadas las diversas fracciones de áridos calculado para un grupo de briquetas, luego cada bandeja es colocada en una bandeja de calentamiento para calentar su contenido a una temperatura de 90 °C.

Por otro lado, se calienta el cemento asfáltico a una temperatura de 120 a 137°C (ver figura A). Durante su calentamiento, el agregado y sobre todo el asfalto deben ser agitados para evitar sobrecalentamientos locales.

Se pesan luego sobre una bandeja las diversas fracciones de áridos de acuerdo con los pesos acumulativos. Se mezclan perfectamente los agregados y se forma un cráter en la mezcla, se coloca la bandeja sobre la balanza y se vierte sobre los agregados el asfalto caliente (figura B), hasta completar 1100gr de peso total de agregados más asfalto, calculado para un porcentaje de la mezcla total.

Se mezcla el asfalto con los agregados (figura C), hasta tener una mezcla homogénea, la temperatura de la mezcla no debe ser inferior a 107°C ni en ningún caso someterse a recalentamiento (figura D).



Figura 3-10: Preparación de la muestra

Fuente: Carlos Luis Verdezoto

Se compacta la mezcla en un molde abierto por ambos extremos y que tienen 64 mm de alto por 102mm de ancho. La compactación se hace usando un martillo especial compuesto de un disco circular de 3 7/8" de diámetro que se fija sobre la superficie de la mezcla a compactarse; un martillo en forma de cilindro hueco que se desliza a lo largo de una guía y cae sobre el disco, el peso del martillo es de 10 libras y la altura de caída libre es de 18" (Figura 3-11).



Figura 3-11: Compactación de briquetas

Fuente: Carlos Luis Verdezoto

Para el diseño de las mezclas se aplicaron 75 golpes por cada cara en la compactación, proyectada para vías de tráfico pesado y se fabricaron 18 briquetas con asfalto tradicional, 18 briquetas con asfalto modificado con 5% de caucho y 18 briquetas con asfalto modificado con 10% de caucho (Figura 3-12).



Figura 3-12: Briquetas elaboradas

Fuente: Carlos Luis Verdezoto

Se dejó enfriar las muestras a temperatura ambiente durante una noche y luego se extrajo las briquetas de los moldes y se somete cada una a los siguientes ensayos.

Caracterización de la mezcla compactada.

a.- Densidad Bulk

Esta prueba se realiza para estimar el grado de densificación que tendrá la mezcla asfáltica colocada en la estructura del pavimento. Debe tenerse en cuenta que esta densificación es el valor estimado que tendrá la mezcla asfáltica después de un tiempo de haberse colocado en el pavimento. Esto debido a que el pavimento

después de ser colocado, sigue sufriendo densificación debido al paso de los vehículos.

Esta densidad es la relación entre su peso en el aire y su volumen, incluyendo los vacíos permeables. Si la probeta tiene una absorción menor a 2 %, no se necesita parafinar la probeta (ASTM D2726), su peso específico (G_{mb}) se determina de manera sencilla, mediante la expresión:

$$G_{mb} = \frac{W_a}{W_{ss} - W_w}$$

Dónde:

W_a = masa de la probeta en el aire

W_w = masa de la probeta en el agua

W_{ss} = masa en el aire de la probeta saturada y superficialmente seca

a.- Densidad Rice

La determinación de la gravedad teórica máxima de la mezcla asfáltica, es posiblemente la prueba de laboratorio más importante para definir las características volumétricas de la mezcla asfáltica, debido a que el cálculo del volumen de vacíos es la proporción que existe entre el G_{mb} y el G_{mm} .

Se realiza en la mezcla asfáltica en forma suelta y consiste en saturar de agua el picnómetro y aplicar vacío, con el fin de extraer todo el aire que contiene la mezcla. se utiliza un picnómetro de vacío según la Norma ASTM D2041 (Imagen 3-9).

Para calcular la gravedad teórica máxima de la mezcla asfáltica, se utiliza la fórmula siguiente:

$$G_{mm} = \frac{A}{A + B - C}$$

Dónde:

Gmm = gravedad específica máxima de la muestra

A = masas de la muestra seca, g

B = masa del picnómetro con agua a 25°C, g

C = masa del picnómetro con agua y muestra a 25°C, g



Figura 3-13: Ensayo de la densidad Rice

Fuente: Carlos Luis Verdezoto

b.- Porcentaje de vacíos en la mezcla.

Los vacíos de aire, V_a , en la mezcla asfáltica compactada consiste en los pequeños espacios de aire entre las partículas de agregado. El porcentaje del volumen de vacíos de aire en una mezcla compactada, puede determinarse usando:

$$V_a = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$$

Dónde:

V a = vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total

G mm = gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica

G mb =gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada

c.- Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.

Los vacíos en el agregado mineral, VMA, se definen como el vacío intergranular entre las partículas del agregado en una mezcla asfáltica compactada, que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como un porcentaje del volumen total.

El VMA puede calcularse sobre la base de la gravedad específica neta del agregado y expresado como un porcentaje del volumen mezcla asfáltica compactada. Por lo tanto, el VMA puede estimarse restando el volumen del agregado determinado por su gravedad específica neta, del volumen neto de la mezcla asfáltica compactada.

Si la composición de la mezcla se determina como el porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica:

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} \times \frac{100}{100 + P_b} \times 100$$

Dónde:

VMA = vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto)

G_{sb} = gravedad específica neta del total de agregado

G_{mb} = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada

P_s = contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica.

d.- Porcentaje de vacíos llenos de asfalto.

Los vacíos llenos de asfalto (VFA), se trata del porcentaje de los vacíos en el agregado mineral que son llenados por el asfalto, VFA, no incluyendo el asfalto absorbido, se determina usando:

$$VFA = 100 \times \frac{VMA - V_a}{VMA}$$

Dónde:

VFA = vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VMA

VMA = vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen total

V_a = vacíos de aire en mezclas compactadas, porcentaje del volumen total

e.- Estabilidad y Flujo.

Esta prueba se realiza con el propósito de conocer los valores de cohesión (estabilidad) y fricción (flujo) de la mezcla asfáltica, mediante la aplicación de una carga en kilogramos y cuando la muestra se deforma en milímetros (0.25mm).

Esta prueba es solamente para probetas fabricadas con el martillo Marshall y consiste en sumergir la probeta en baño María a una temperatura de 60 °C de 30 a 40 min, para después ensayarla en la máquina Marshall (Imagen 3-14); los valores obtenidos se utilizan para determinar el contenido óptimo de asfalto.

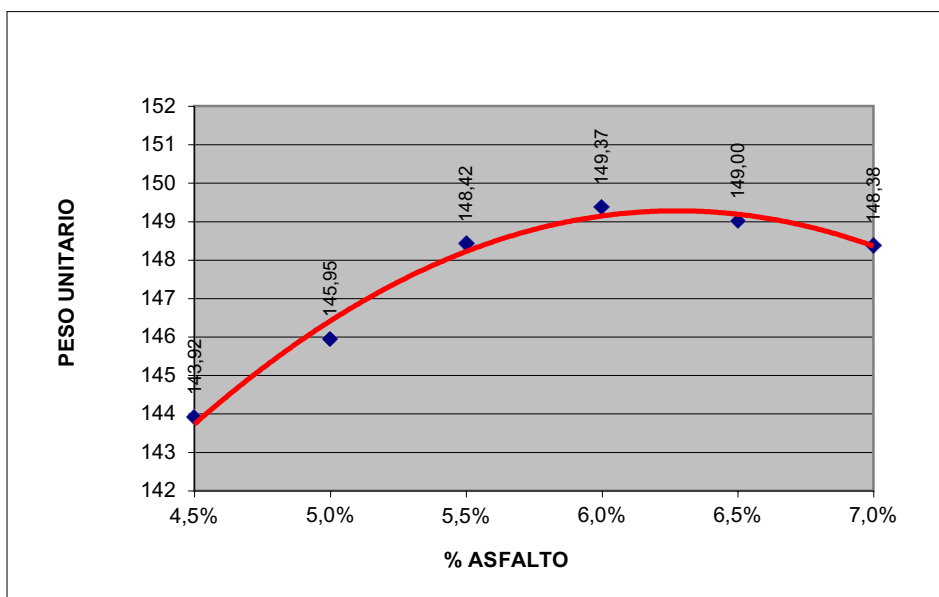
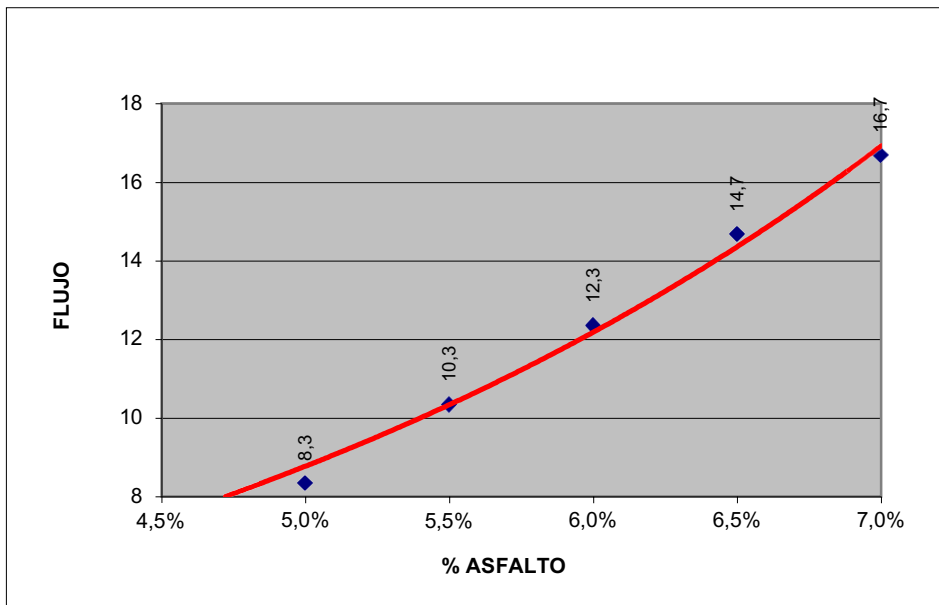
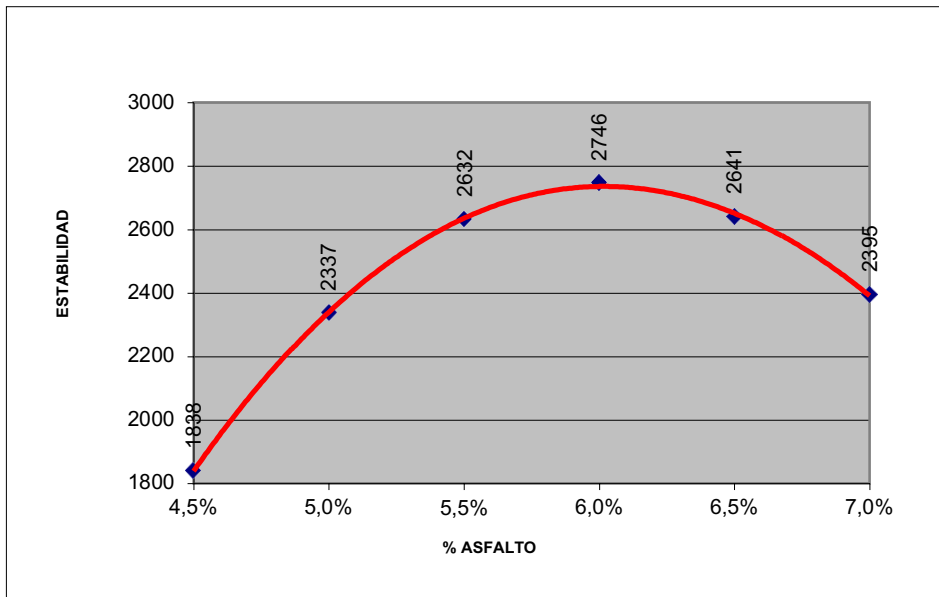


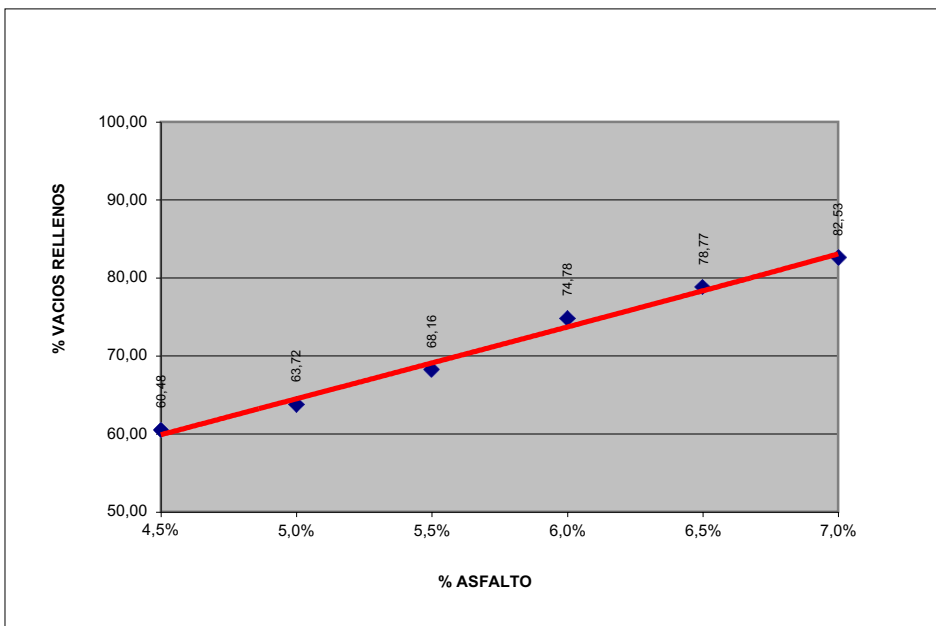
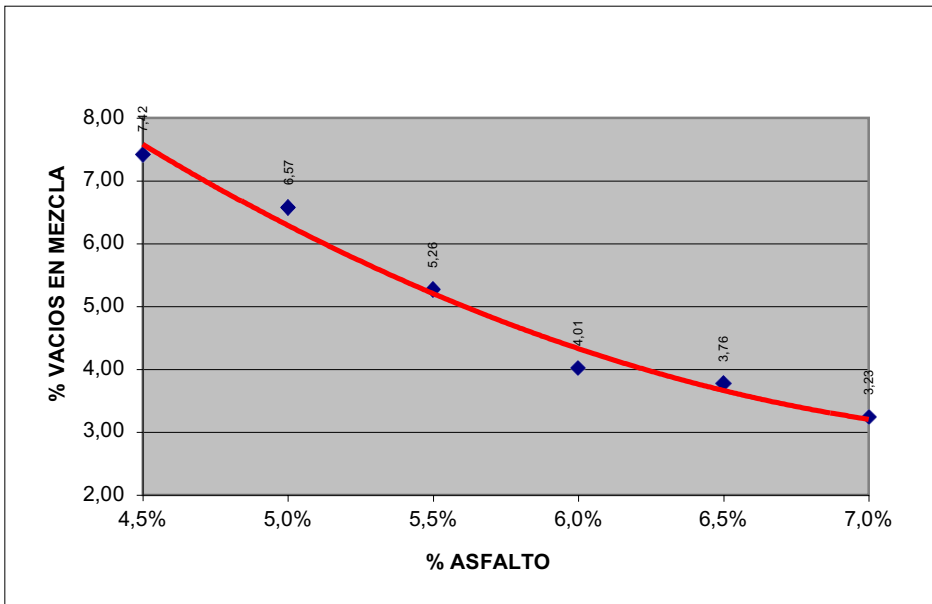
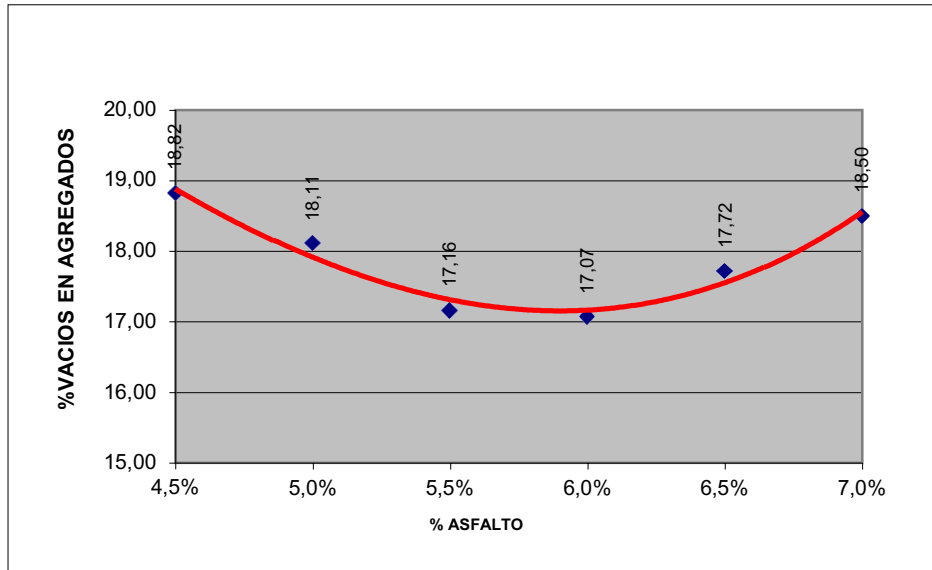
Figura 3-14: Ensayos de estabilidad y flujo

Fuente: Laboratorio Ruffilli

Diseño A (Mezcla tradicional)

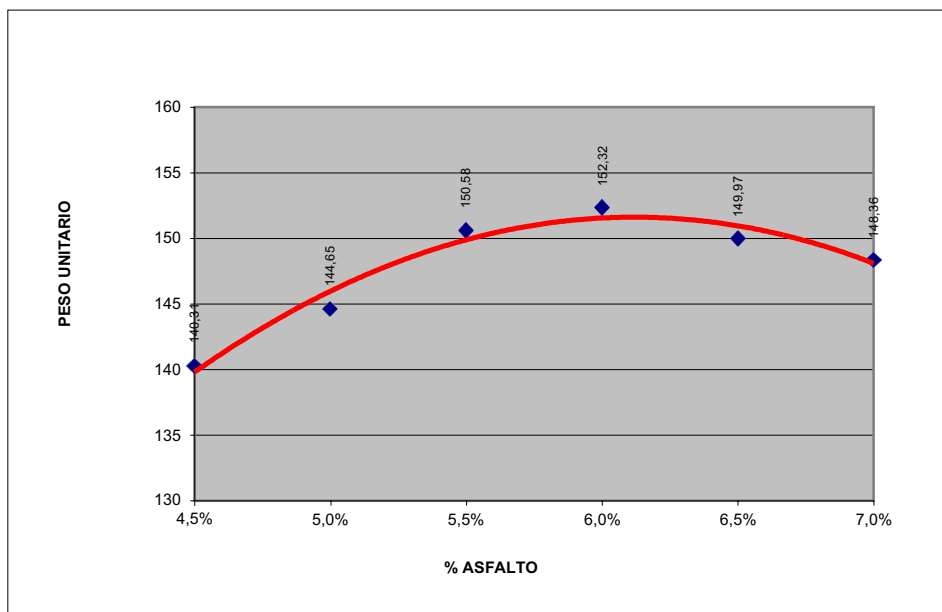
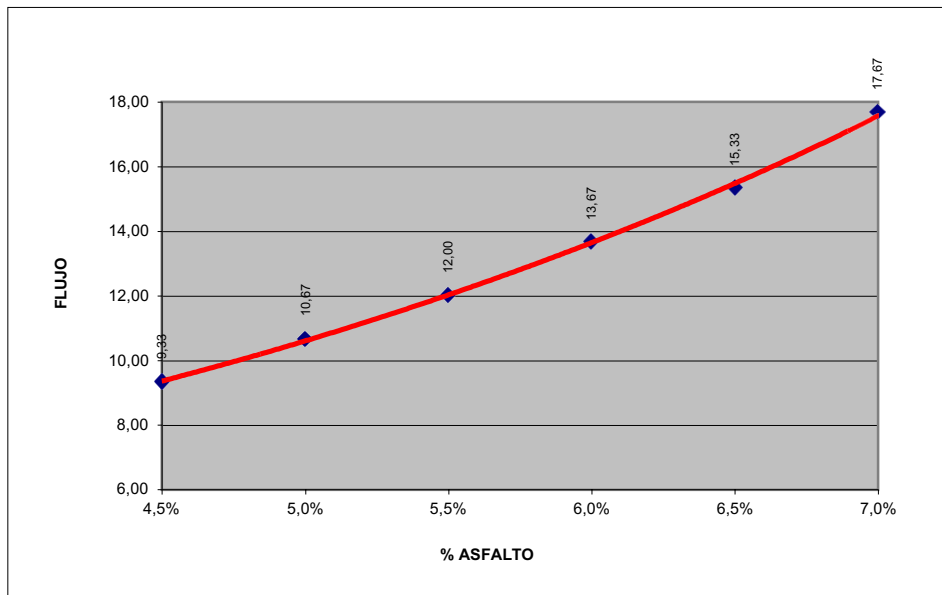
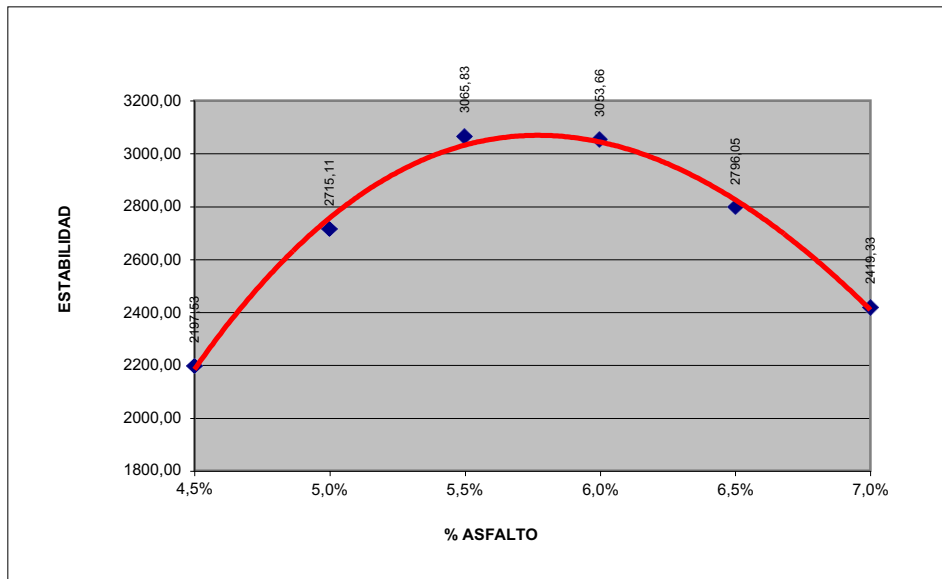
MUESTRA		% C. A.	Factor de Correc.	Peso Muestra (gr.)			Volum. (cm ³).	Densidad Bulk Kg/m ³	Densidad Rice Kg/m ³	% Vacíos	V.A.M. %	V.F.A. %	Peso unitario de la muestra. Libras/pie ³	Estabilidad Lb	ESTABILIDAD (Lbs.)		Flujo 0,01''
				S.S.S.	Aire	Agua									Dial	Correg.	
UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL																	
Laboratorio de Suelos y Materiales Ing. Dr. Arnaldo Ruffilli Avenida Kennedy S/N y Av. Delta - Tel. 2 281037 Cel. 098 282897																	
CONTROL DE CALIDAD EN CAPA DE RODADURA DE CONCRETO ASFALTICO MEZCLADO EN PLANTA																	
PROYECTO: ELABORACIÓN DE UNA MEZCLA PARA CARPETA DE RODADURA DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO UTILIZANDO POLVO DE CAUCHO																	
C. A.: NACIONAL AC-20 SIN MODIFICAR																	
ABSORCION: 0,7575																	
Gravedad Especifica del C.A. 1,012 gr/cm3																	
Gravedad Especifica Bulk Promedio de los ε 2,716 gr/cm3																	
PROPIEDADES DE LA MEZCLA ASFALTICA SIN MODIFICAR																	
H1	4,5	1,14	1115,60	1105,00	638,15	477,45	2314,38	2480,00	7,42	18,62	60,14	144,28	1624,00	170	1851,36	7,00	
H2	4,5	1,19	1085,10	1074,99	625,10	460,00	2336,93			17,83	58,37	145,68	1529,00	160	1819,51	8,00	
H3	4,5	1,19	1054,80	1044,50	595,60	459,20	2274,61			20,02	62,92	141,80	1548,00	162	1842,12	8,00	
SUMATORIA PROMEDIO							2308,64					18,82	60,48	143,92	1567,00		1837,66
H1	5,0	1,14	1132,10	1124,50	650,98	481,12	2337,25	2495,00	6,57	18,25	64,00	145,70	1958,00	205	2232,12	9,00	
H2	5,0	1,25	1060,30	1053,19	609,72	450,58	2337,41			18,24	63,99	145,71	1977,00	207	2471,25	8,00	
H3	5,0	1,19	1095,10	1087,80	631,99	463,11	2348,90			17,84	63,17	146,43	1939,00	203	2307,41	8,00	
SUMATORIA PROMEDIO							2341,19					18,11	63,72	145,95	1958,00		2336,93
H1	5,5	1,25	1079,10	1073,64	650,90	428,20	2507,33	2506,00	5,26	12,76	58,80	156,31	2176,00	228	2720,00	11,00	
H2	5,5	1,19	1075,20	1070,10	611,88	463,32	2309,63			19,64	73,23	143,98	2166,00	227	2577,54	10,00	
H3	5,5	1,19	1093,80	1088,45	625,75	468,05	2325,50			19,09	72,45	144,97	2184,00	229	2598,96	10,00	
SUMATORIA PROMEDIO							2380,82					17,16	68,16	148,42	2175,33		2632,17
H1	6,0	1,19	1129,00	1125,40	652,12	476,88	2359,92	2492,00	4,01	18,32	74,14	147,12	2298,00	241	2734,62	12,00	
H2	6,0	1,19	1131,80	1128,70	668,10	463,70	2434,12			15,76	74,57	151,74	2317,00	243	2757,23	11,00	
H3	6,0	1,19	1116,00	1112,65	651,23	464,77	2393,98			17,15	75,63	149,24	2308,00	242	2746,52	14,00	
SUMATORIA PROMEDIO							2396,01					17,07	74,78	149,37	2307,67		2746,12
H1	6,5	1,19	1121,20	1118,80	652,90	468,30	2389,07	2480,00	3,76	17,75	78,82	148,93	2214,00	232	2634,66	14,00	
H2	6,5	1,19	1102,30	1100,07	644,23	458,07	2401,53			17,33	78,30	149,71	2223,00	234	2645,37	15,00	
H3	6,5	1,19	1103,40	1101,38	640,60	462,80	2379,82			18,07	79,20	148,36	2222,00	233	2644,18	15,00	
SUMATORIA PROMEDIO							2390,14					17,72	78,77	149,00	2219,67		2641,40
H1	7,0	1,19	1119,20	1118,10	645,90	473,30	2362,35	2457,00	3,23	19,11	83,10	147,27	2006,00	210	2387,14	16,00	
H2	7,0	1,19	1091,80	1090,60	637,50	454,30	2400,62			17,80	81,85	149,65	2025,00	212	2409,75	17,00	
H3	7,0	1,19	1096,30	1095,26	635,60	460,70	2377,38			18,59	82,63	148,21	2006,00	210	2387,14	17,00	
SUMATORIA PROMEDIO							2380,12					18,50	82,53	148,38	2012,33		2394,68
Especificaciones:									3 - 5%	Min. 14%	65%-75%			Min. 1800Lb	8 - 16		
CARLOS LUIS VERDEZOTO A.									Ing. Humberto Guerrero								
TESISTA									TUTOR								

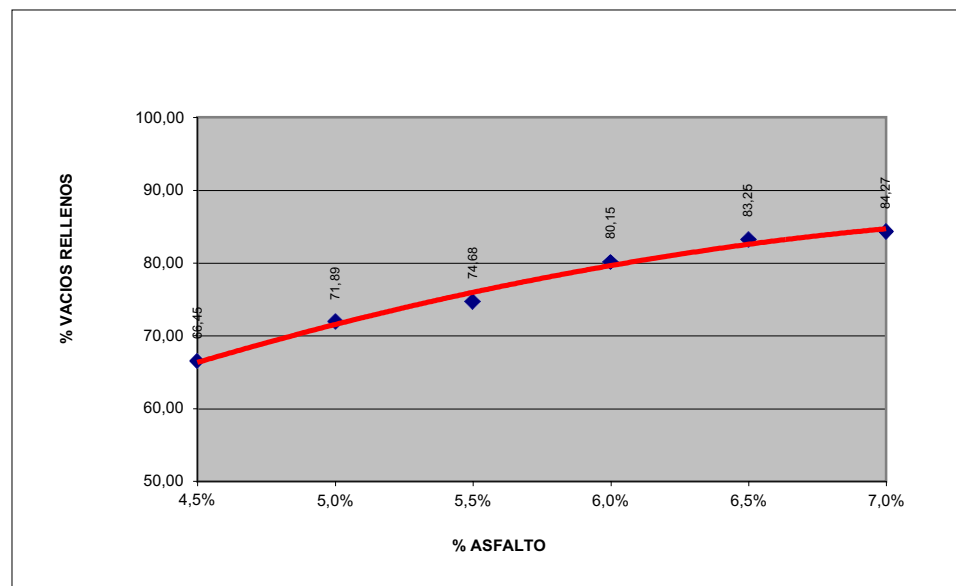
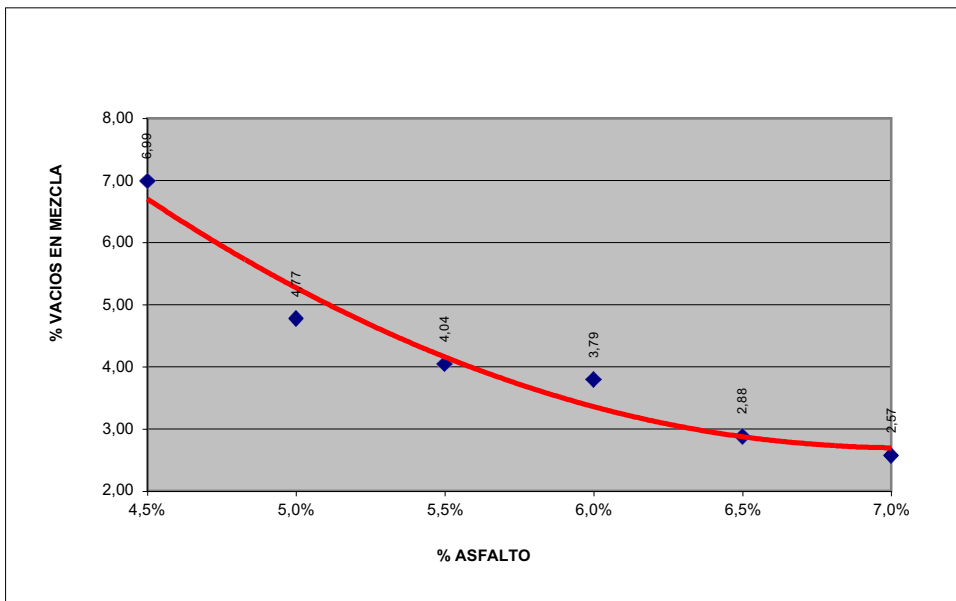
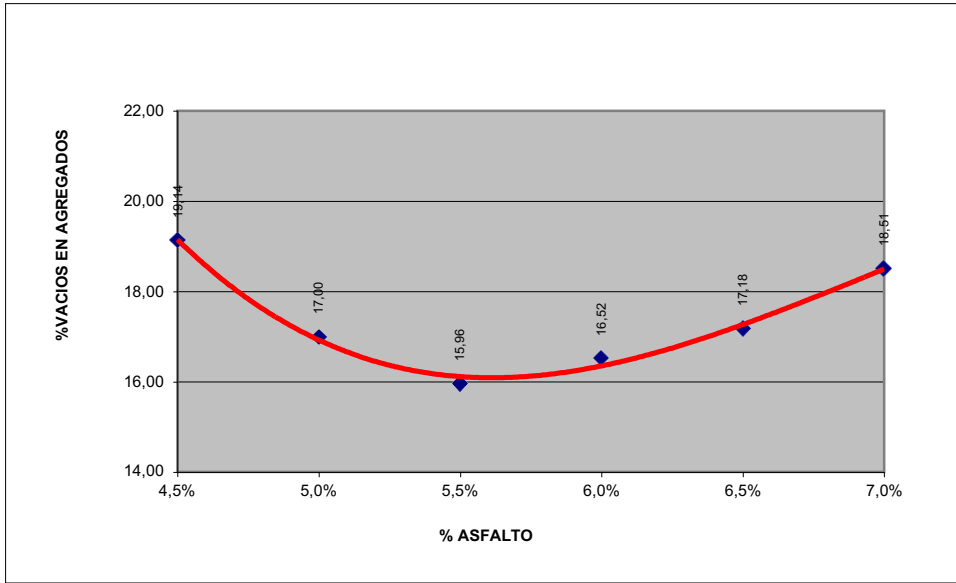






1.1.2) Diseño B (Mezcla modificada con 5% de caucho).

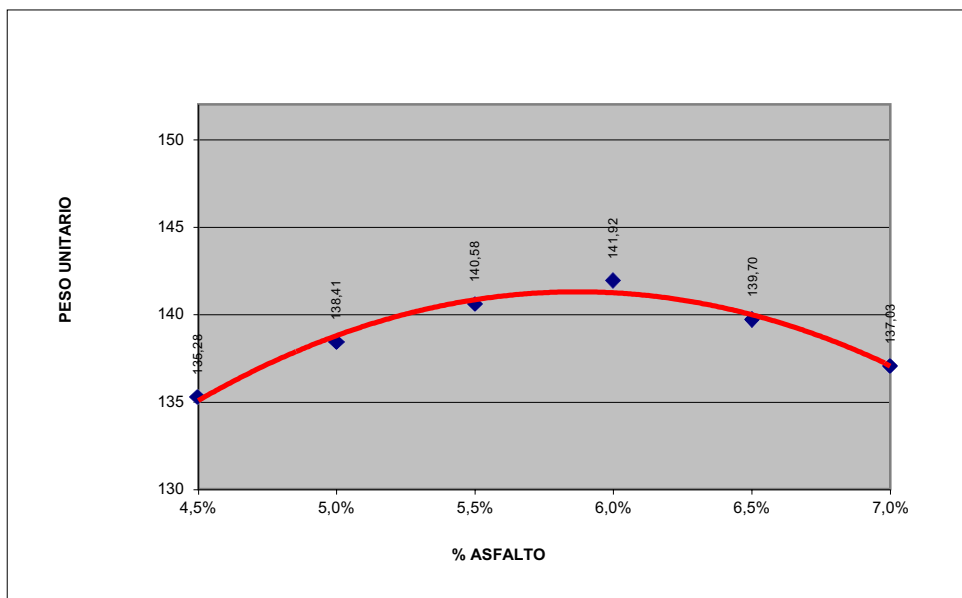
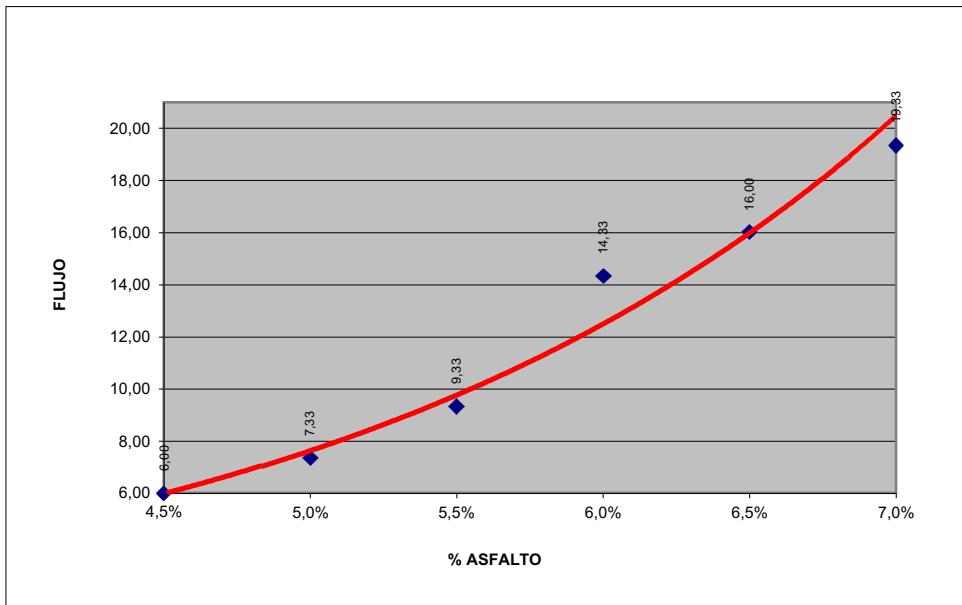
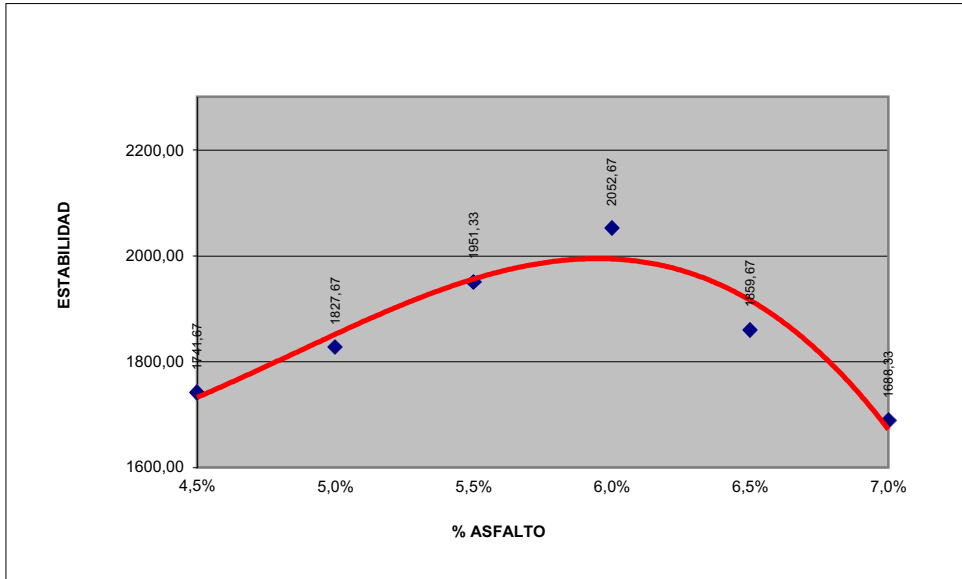
UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL		Laboratorio de Suelos y Materiales Ing. Dr. Arnaldo Ruffilli		Avenida Kennedy S/N y Av. Delta - Tel. 2 281037 Cel. 098 282897		MATEMÁTICAS		CIENCIAS		INGENIERÍA						
CONTROL DE CALIDAD EN CAPA DE RODADURA DE CONCRETO ASFALTICO MEZCLADO EN PLANTA																
PROYECTO: ELABORACIÓN DE UNA MEZCLA PARA CARPETA DE RODADURA DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO UTILIZANDO POLVO DE CAUCHO																
C. A.: NACIONAL AC-20 MODIFICADO CON 5% DE CAUCHO																
ABSORCION : 0,8403																
Gravedad Específica del C.A. 1,019 gr/cm3																
Gravedad Específica Bulk Promedio de los a 2,716 gr/cm3																
PROPIEDADES DE LA MEZCLA ASFALTICA MODIFICADA CON 5% DE CAUCHO																
MUESTRA	% C. A.	Corre c.	Pe so Mue stra (gr.)			(cm ³).	Bulk Kg/m ³	Ríce Kg/m ³	% Vacíos	%	%	de la mue stra.	Lb	ESTABILIDAD		0,01''
			S.S.S.	Aire	Agua									Dial	Corre g.	
H1	4,5	1,25	1044,60	1034,00	588,15	456,45	2265,31	2408,00	6,99	18,94	63,08	141,22	1882,00	197	2352,50	11,00
H2	4,5	1,04	1129,30	1119,19	625,10	504,20	2219,73			18,98	63,17	138,38	2025,00	212	2106,00	9,00
H3	4,5	1,04	1136,30	1126,00	639,60	496,70	2266,96			19,51	64,17	141,32	2052,00	215	2134,08	8,00
SUMATORIA PROMEDIO						2250,67				19,14	63,47	140,31	1986,33		2197,53	9,33
H1	5,0	1,25	1076,80	1069,20	629,13	447,67	2388,37	2431,00	4,77	17,11	72,12	148,89	2327,00	244	2908,75	9,00
H2	5,0	1,19	1090,50	1083,39	629,30	461,20	2349,07			17,83	73,26	146,44	2317,00	243	2757,23	11,00
H3	5,0	1,04	1126,10	1118,80	622,94	503,16	2223,55			16,05	70,28	138,62	2384,00	250	2479,36	12,00
SUMATORIA PROMEDIO						2320,33				17,00	71,89	144,65	2342,67		2715,11	10,67
H1	5,5	1,25	1098,10	1092,64	645,10	453,00	2412,01	2513,00	4,04	16,08	74,86	150,36	2449,00	257	3061,25	11,00
H2	5,5	1,25	1139,30	1134,20	669,88	469,42	2416,17			15,93	74,64	150,62	2460,00	258	3075,00	13,00
H3	5,5	1,25	1105,90	1100,55	650,75	455,15	2417,99			15,87	74,53	150,74	2449,00	257	3061,25	12,00
SUMATORIA PROMEDIO						2415,39				15,96	74,68	150,58	2452,67		3065,83	12,00
H1	6,0	1,14	1112,40	1108,80	642,15	470,25	2357,89	2536,00	3,79	18,39	79,38	146,99	2582,00	271	2943,48	13,00
H2	6,0	1,25	1104,50	1101,40	665,22	439,28	2507,28			16,46	76,95	156,30	2430,00	255	3037,50	14,00
H3	6,0	1,25	1109,80	1106,45	660,89	448,91	2464,75			14,70	75,63	153,65	2544,00	267	3180,00	14,00
SUMATORIA PROMEDIO						2443,31				16,52	77,32	152,32	2518,67		3053,66	13,67
H1	6,5	1,25	1082,60	1080,20	634,15	448,45	2408,74	2475,00	2,88	17,08	83,15	150,16	2298,00	241	2872,50	15,00
H2	6,5	1,19	1110,40	1108,17	649,23	461,17	2402,95			17,28	83,34	149,80	2327,00	244	2769,13	17,00
H3	6,5	1,19	1106,90	1104,88	647,60	459,30	2405,57			17,19	83,25	149,96	2308,00	242	2746,52	14,00
SUMATORIA PROMEDIO						2405,76				17,18	83,25	149,97	2311,00		2796,05	15,33
H1	7,0	1,19	1100,00	1098,90	638,90	461,10	2383,21	2441,00	2,57	18,40	86,02	148,57	1986,00	208	2363,34	19,00
H2	7,0	1,25	1095,50	1094,30	639,50	456,00	2399,78			17,83	85,57	149,60	2006,00	210	2507,50	17,00
H3	7,0	1,19	1092,50	1091,46	629,30	463,20	2356,35			19,32	86,68	146,89	2006,00	210	2387,14	17,00
SUMATORIA PROMEDIO						2379,78				18,51	86,09	148,36	1999,33		2419,33	17,67
Especificaciones: Asphalt Institute										3 - 5%	Mn. 14%	65%-75%			Mn. 1800Lb.	8 - 16
CARLOS LUIS VERDEZOTA A.										Ing. Humberto Guerrero						
TESISTA										TUTOR						

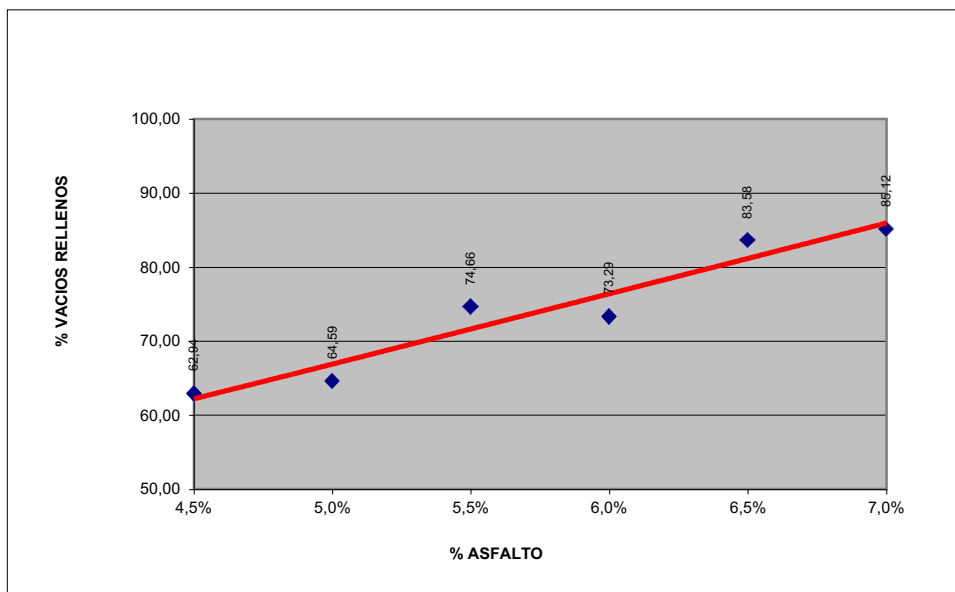
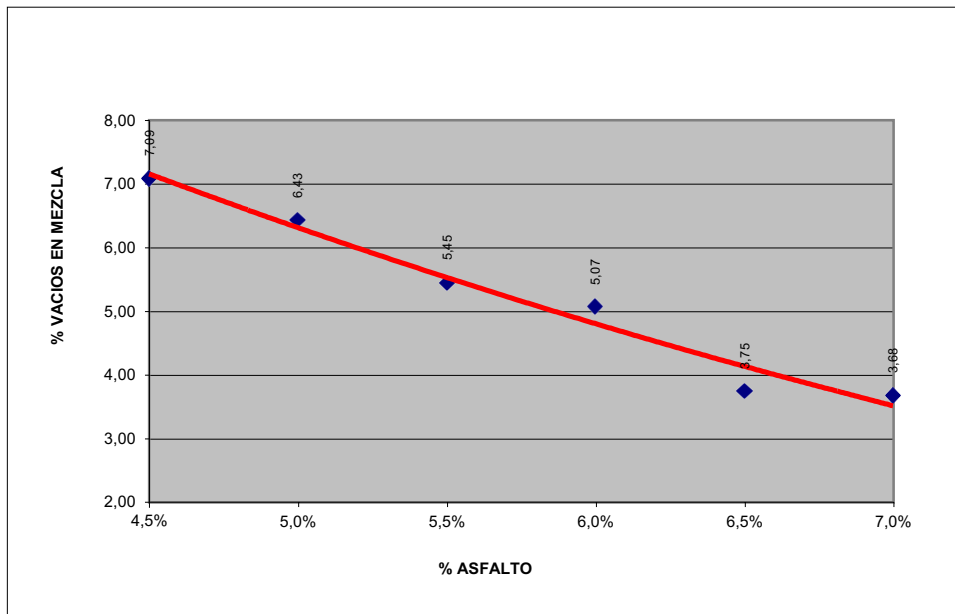
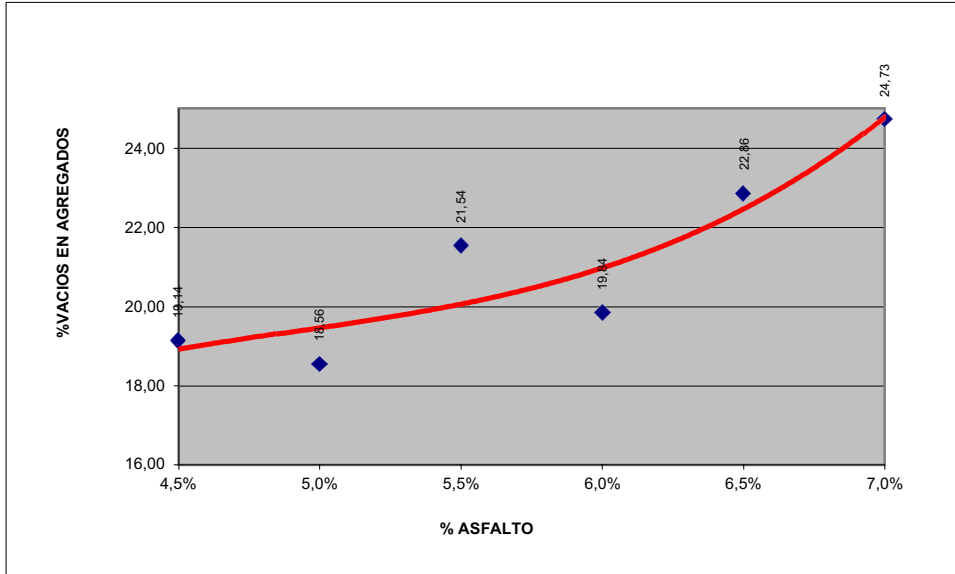




1.1.3) Diseño C (Mezcla modificada con 10% de caucho).

 UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL Laboratorio de Suelos y Materiales Ing. Dr. Arnaldo Ruffilli Avenida Kennedy S/N y Av. Delta - Tel. 2 281037 Cel. 098 282897 CONTROL DE CALIDAD EN CAPA DE RODADURA DE CONCRETO ASFALTICO MEZCLADO EN PLANTA 																
PROYECTO: ELABORACIÓN DE UNA MEZCLA PARA CARPETA DE RODADURA DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO UTILIZANDO POLVO DE CAUCHO																
C. A.: NACIONAL AC-20 MODIFICADO CON 10% DE CAUCHO																
ABSORCION : 0,9874																
Gravedad Específica del C.A. 1,023 gr/cm ³																
Gravedad Específica Bulk Promedio de los a 2,716 gr/cm ³																
PROPIEDADES DE LA MEZCLA ASFALTICA MODIFICADA CON 10% DE CAUCHO																
MUESTRA	%C.A.	Corre c.	Pe so Mue stra (gr.)			(cm ³).	Bulk Kg/m ³	Rice Kg/m ³	% Vacios	%	%	de la mue stra.	Lb	ESTABILIDAD		0,01''
			S.S.S.	Aire	Agua									Dial	Corre g.	
H1	4,5	1,00	1135,10	1124,50	624,11	510,99	2200,63	2324,00	7,09	18,94	62,54	137,19	1738,00	182	1738,00	6,00
H2	4,5	1,00	1141,80	1131,69	625,10	516,70	2190,23			18,98	62,63	136,54	1749,00	183	1749,00	6,00
H3	4,5	0,95	1129,10	1118,80	601,20	527,90	2119,34			19,51	63,64	132,12	1738,00	182	1651,10	6,00
SUMATORIA PROMEDIO						2170,07				19,14	62,94	135,28	1741,67		1712,70	6,00
H1	5,0	1,00	1154,10	1146,50	635,50	518,60	2210,76	2363,00	6,43	17,11	62,41	137,82	1814,00	190	1814,00	8,00
H2	5,0	1,00	1138,90	1131,79	627,91	510,99	2214,90			22,53	71,45	138,08	1825,00	191	1825,00	7,00
H3	5,0	1,04	1126,90	1119,60	625,94	500,96	2234,91			16,05	59,92	139,32	1844,00	193	1917,76	7,00
SUMATORIA PROMEDIO						2220,19				18,56	64,59	138,41	1827,67		1852,25	7,33
H1	5,5	1,09	1111,40	1105,94	627,95	483,45	2287,60	2378,00	5,45	20,41	73,29	142,61	1948,00	204	2123,32	9,00
H2	5,5	1,04	1129,40	1124,30	626,98	502,42	2237,77			22,14	75,39	139,50	1967,00	206	2045,68	9,00
H3	5,5	1,04	1127,90	1122,55	626,75	501,15	2239,95			22,06	75,30	139,64	1939,00	203	2016,56	10,00
SUMATORIA PROMEDIO						2255,11				21,54	74,66	140,58	1951,33		2061,85	9,33
H1	6,0	1,04	1079,30	1075,70	612,12	467,18	2302,54	2392,00	5,07	20,31	75,04	143,54	2044,00	214	2125,76	14,00
H2	6,0	1,04	1145,80	1142,70	648,02	497,78	2295,59			16,46	69,20	143,11	2052,00	215	2134,08	15,00
H3	6,0	1,04	1135,40	1132,05	628,12	507,28	2231,61			22,76	75,63	139,12	2062,00	216	2144,48	14,00
SUMATORIA PROMEDIO						2276,58				19,84	73,29	141,92	2052,67		2134,77	14,33
H1	6,5	1,09	1102,80	1100,40	613,90	488,90	2250,77	2325,00	3,75	22,52	83,33	140,31	1844,00	193	2009,96	17,00
H2	6,5	1,04	1118,60	1116,37	617,12	501,48	2226,15			23,36	83,94	138,78	1882,00	197	1957,28	15,00
H3	6,5	1,09	1107,00	1104,98	614,98	492,02	2245,80			22,69	83,46	140,00	1853,00	194	2019,77	16,00
SUMATORIA PROMEDIO						2240,91				22,86	83,58	139,70	1859,67		1995,67	16,00
H1	7,0	1,00	1135,90	1134,80	619,32	516,58	2196,76	2279,00	3,68	24,78	85,15	136,95	1692,00	177	1692,00	19,00
H2	7,0	1,00	1120,70	1119,50	610,87	509,83	2195,83			24,81	85,17	136,89	1681,00	176	1681,00	20,00
H3	7,0	1,04	1114,80	1113,76	608,96	505,84	2201,80			24,61	85,05	137,26	1692,00	177	1759,68	19,00
SUMATORIA PROMEDIO						2198,13				24,73	85,12	137,03	1688,33		1710,89	19,33
Especificaciones: Asphalt Institute									3 - 5%	Mn. 14%	65% 75%			Mn. 1800lb.	8 - 16	
CARLOS LUIS VERDEZOTO A.										Ing. Humberto Guerrero						
TESISTA										TUTOR						





Análisis de gráficos

- Los valores de estabilidad Marshall aumentan hasta un determinado valor de contenido de asfalto y luego disminuyen cuando el porcentaje de asfalto es mayor.
- Los valores de fluencia aumentan con incrementos de contenido de asfalto.
- El valor de peso unitario de las muestras incrementa hasta un determinado valor y luego disminuye a medida que el porcentaje de asfalto aumenta.
- El porcentaje de vacíos en el agregado mineral (V.A.M), aumenta con incrementos en el contenido de asfalto.
- El porcentaje de vacíos en la mezcla disminuye a medida que aumenta el porcentaje de asfalto.
- El porcentaje de vacíos llenos de asfalto (V.F.A) aumenta a medida que se incrementa el porcentaje de asfalto.

Interpretación General

Los 3 diseños tienen diferentes comportamientos frente a los ensayos realizados en laboratorio, pero claramente se puede apreciar en sus resultados que sólo 2 cumplen con los requerimientos mecánicos establecidos por el MTOP, siendo éstos el 6.0% de asfalto en la muestra sin modificar y el 5.5% de asfalto en la muestra modificada con 5% de caucho.

La mezcla que tiene 10% de caucho no cumple los requerimientos mínimos ya antes mencionados, por tal motivo no se realizará pruebas de desempeño a esta mezcla.

Pruebas de desempeño de las mezclas asfálticas.

El equipo usado es el Nottingham Asphalt Tester UN-10 (NAT). Estas pruebas corresponden a 6 briquetas, correspondientes a mezclas modificadas con 5% de caucho y 6 briquetas correspondiente a mezclas normales con asfalto AC-20; por motivos de cumplimiento de los requerimientos mínimos sólo se consideran las 2 mezclas para realizar las pruebas de desempeño.

Para la realización de estas pruebas se emplearon las metodologías dadas por el fabricante del equipo (Cooper,2002), que coinciden en general con los del Comité Europeo de Normalización (CEN, 2000) respecto a la configuración de cargas y al sistema de medición y control.



Figura 3-15: Equipo de pruebas de desempeño (NAT, NU-10)

Fuente: Laboratorio de Investigación de la U.C.S.G

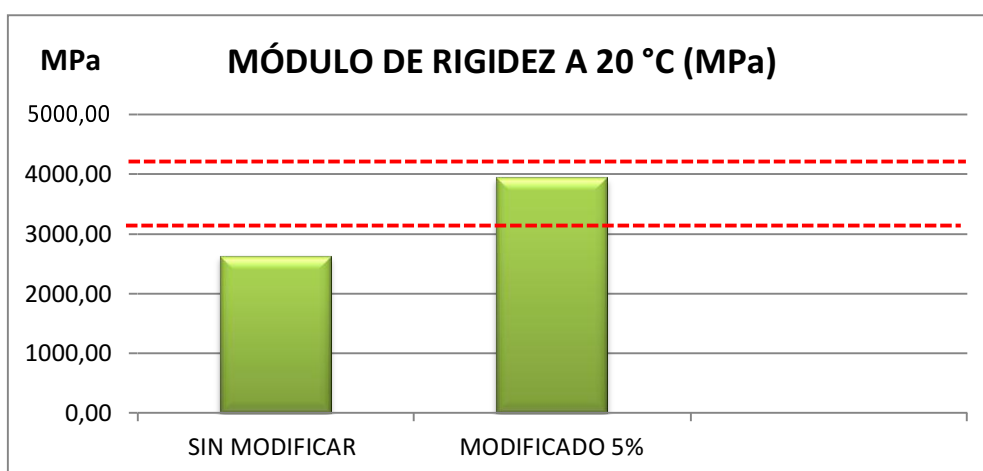
a.- Módulo de rigidez mediante deformación controlada

Indica la capacidad de distribuir la carga y proteger las capas subyacentes por lo que es una propiedad dominante en el comportamiento del pavimento. Su evaluación en el equipo NAT se realizó a la temperatura de 20°C, empleando un nivel de deformación controlada de 5 micrones y ondas haversine con intervalo de tiempo entre el inicio del pulso de carga y el punto en el que la carga es máxima, de 0,12 segundos.

Los resultados obtenidos son:

Tabla 2-0-10: Resultados de ensayos de módulo de rigidez

MUESTRAS SIN CAUCHO	MÓDULO DE RIGIDEZ A 20°C (MPa)	MUESTRAS MODIFICADA CON CAUCHO 5%	MÓDULO DE RIGIDEZ A 20°C (MPa)
1	2682	A	3843
2	2591	B	3961
3	2619	C	4044
Promedio	2631	Promedio	3949
Desv. Estándar	47	Desv. Estándar	101



Fuente: Laboratorio de Investigación de la U.C.S.G

Elaboración: Carlos Luis Verdezoto

De acuerdo a la propuesta de exigencias para pruebas de desempeño con equipo NAT desarrollada por el Laboratorio de Carreteras de la UCSG, y en fase de prueba por parte del MTOP, la calificación de las mezclas asfálticas en función del módulo de rigidez es la siguiente:

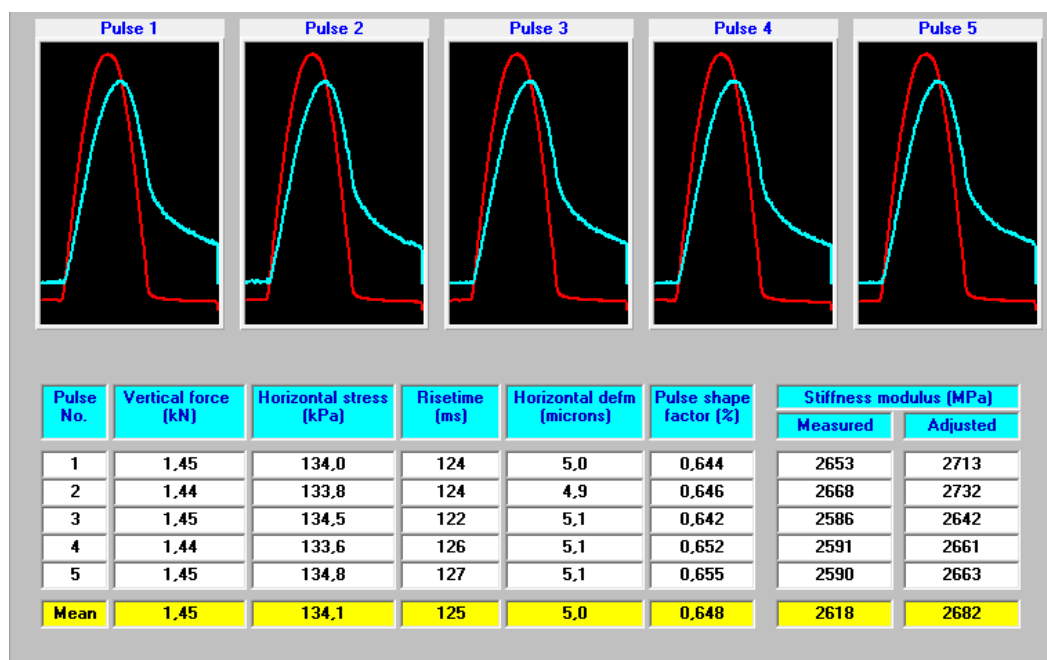
Mezclas satisfactorias: 3.000 a 4.000 MPa

Mezclas tolerables: 2.500 a 3.000 MPa y 4.000 a 5.000 MPa

Mezclas inadecuadas: menores a 2.500 MPa o mayores a 5.000 MPa

Es decir, que a partir del resultado promedio obtenido la mezcla sin caucho es tolerable. Mientras que los resultados promedios de la mezclas con caucho es satisfactorio.

a.- Gráficas de resultados obtenidos



Briquetas sin caucho

Figura 3-16: Módulo de rigidez. Briqueta 1 sin caucho

Fuente: Laboratorio de Investigación de la U.C.S.G

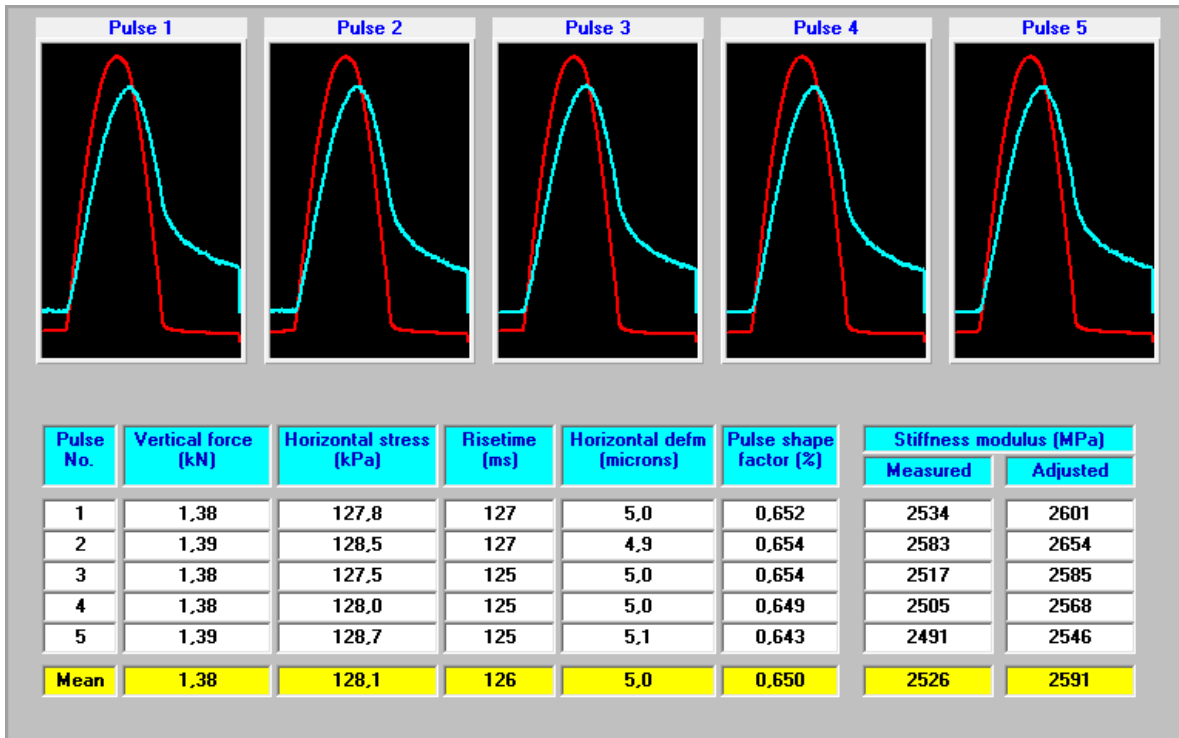


Figura 3-17: Módulo de rigidez. Briqueta 2 sin caucho

Fuente: Laboratorio de Investigación de la U.C.S.G

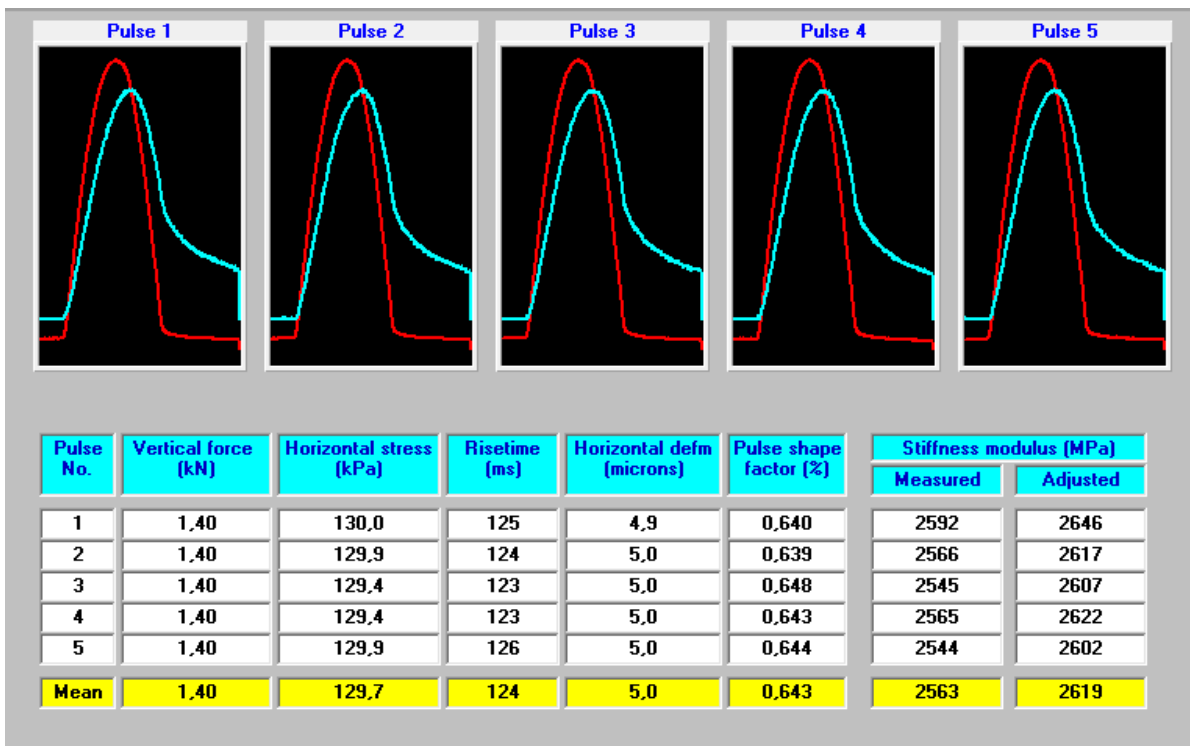


Figura 3-18: Módulo de rigidez. Briqueta 3 sin caucho

Fuente: Laboratorio de Investigación de la U.C.S.G

Briquetas con caucho

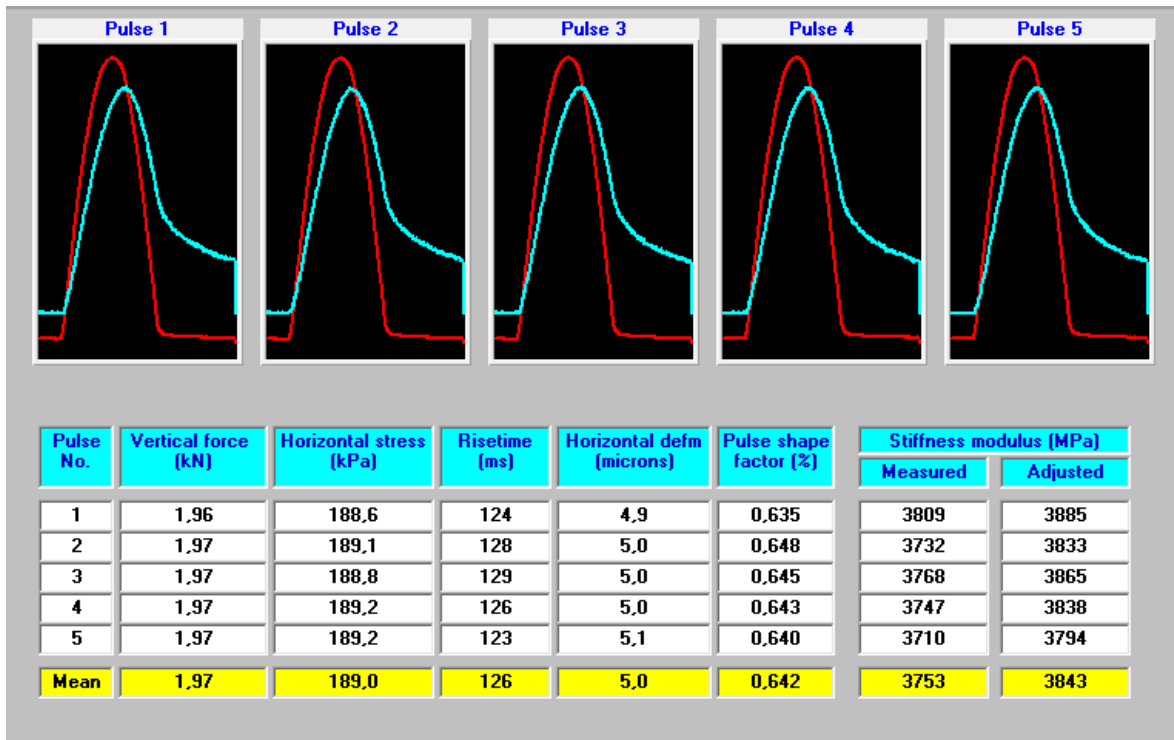


Figura 3-19: Módulo de rigidez. Briqueta A con caucho

Fuente: Laboratorio de Investigación de la U.C.S.G

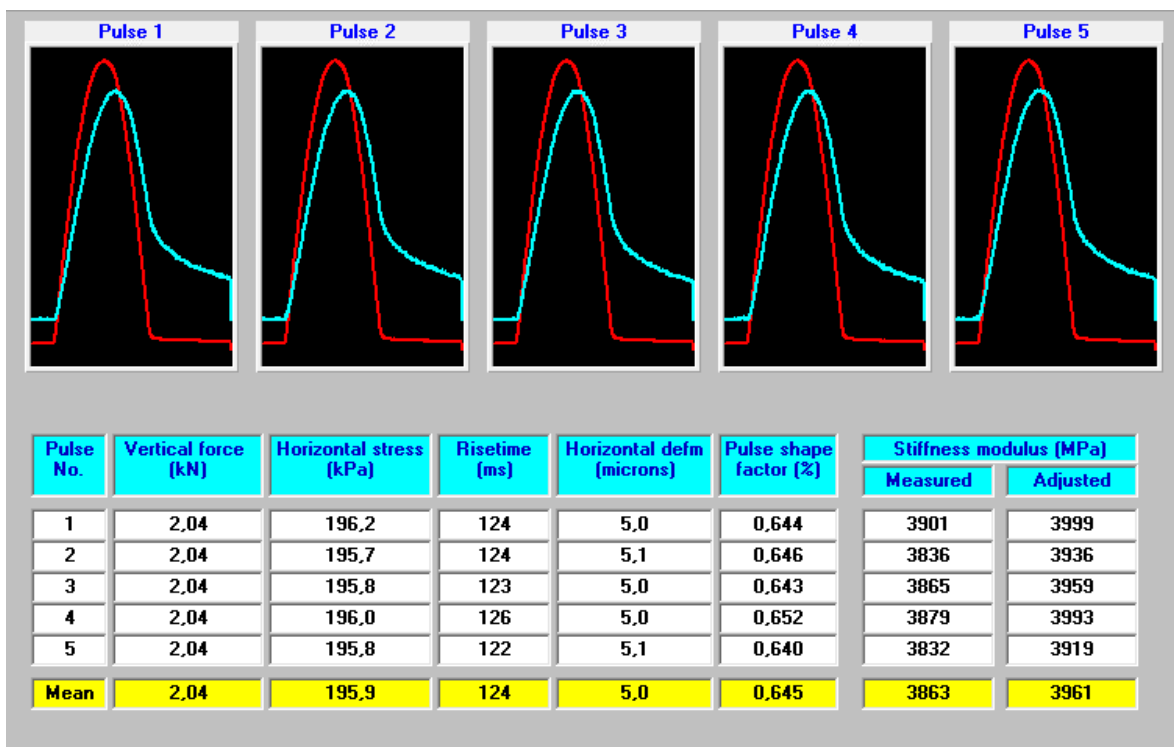


Figura 3-20: Módulo de rigidez. Briqueta B con caucho

Fuente: Laboratorio de Investigación de la U.C.S.G

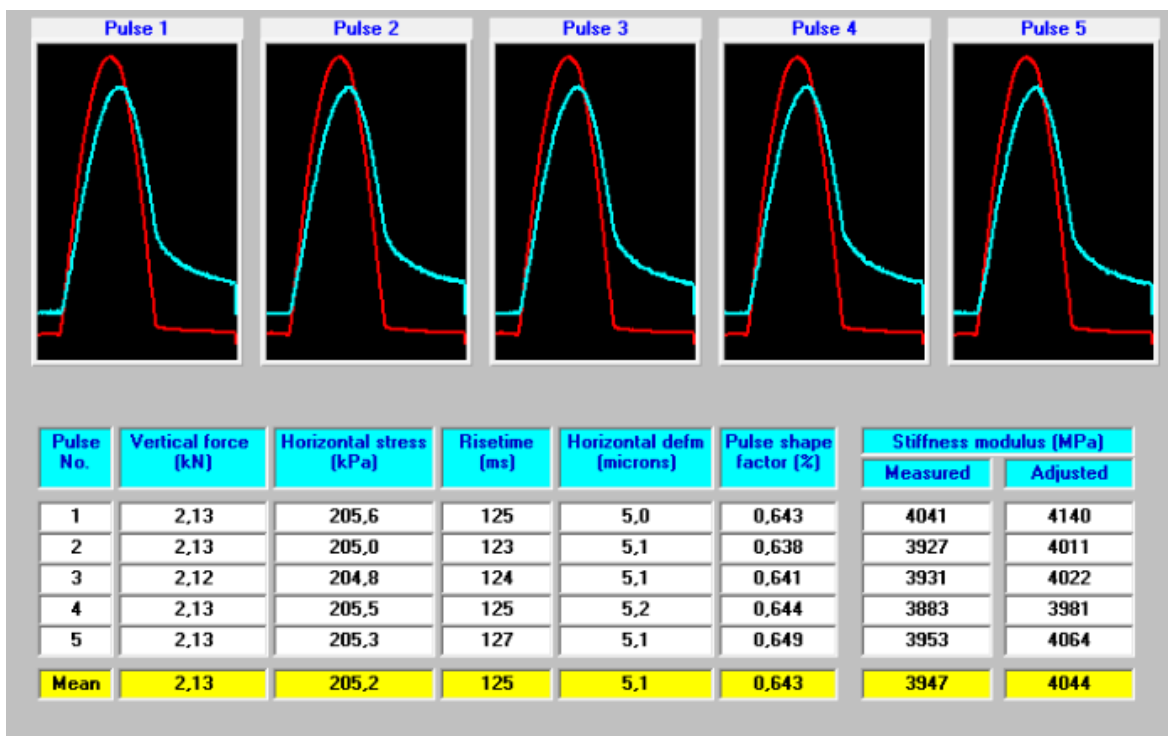


Figura 3-21: Módulo de rigidez. Briqueta C con caucho
Fuente: Laboratorio de Investigación de la U.C.S.G

b.- Fatiga (Incluye el módulo de rigidez por carga controlada).

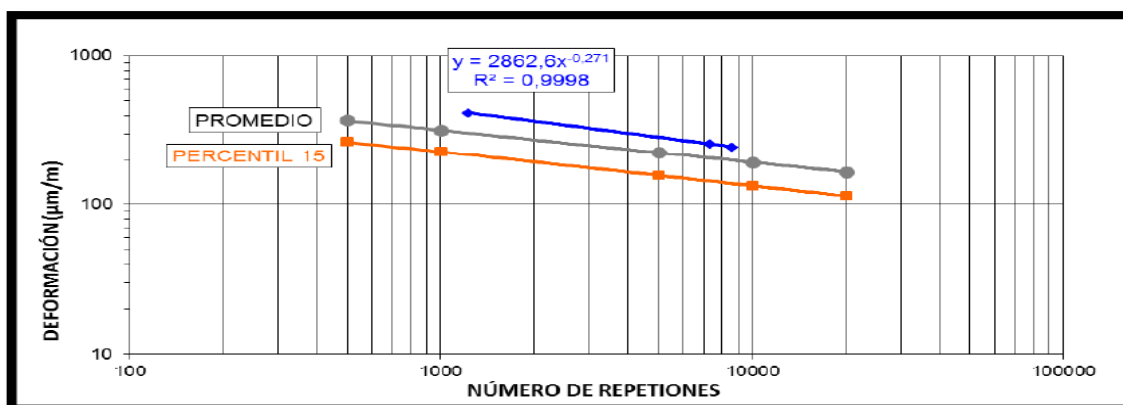
La prueba de fatiga se realizó por el método diametral o de tracción indirecta, aplicado a la briqueta un esfuerzo controlado. Previamente, tiene que determinarse el módulo de rigidez bajo el mismo esfuerzo. Con la prueba de fatiga se obtiene el número de aplicaciones de carga requeridas para alcanzar la rotura o una deformación máxima de 5 mm. El tiempo de carga es de 120 milisegundos y la temperatura para el estudio fue de 20°C. Los resultados suelen representarse en gráficas log-log, relacionando el número de repeticiones para el fallo en el eje de las abscisas con los esfuerzos o las deformaciones en el eje de las ordenadas. Los resultados obtenidos son:

Mezcla sin caucho

Tabla 2-0-11: Resultados de ensayo de Fatiga de la muestra sin caucho

COEF. POISSON=0,35

ESFUERZO (Kpa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN (x 10 ⁻⁶)	MÓDULO RIGIDEZ (Mpa)
200			
250	8581	245	2092
300	7301	258	2381
350	1221	417	1720
400			



Fuente: Laboratorio de Investigación de la U.C.S.G

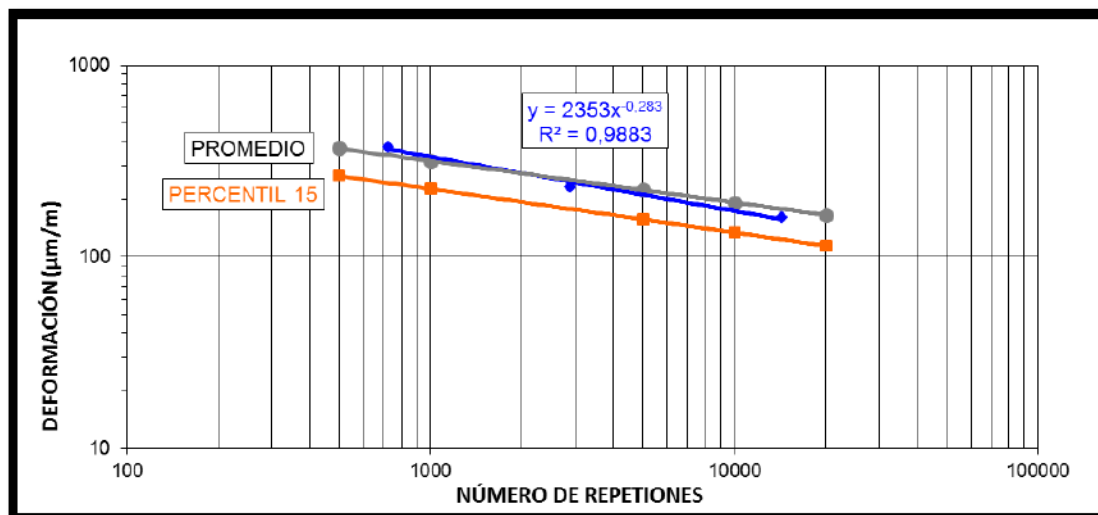
Elaboración: Carlos Luis Verdezoto

Mezcla con Caucho

Tabla 2-0-12: Resultados de ensayo de Fatiga

COEF. POISSON=0,35

ESFUERZO (Kpa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN (x 10 ⁻⁶)	MÓDULO RIGIDEZ (Mpa)
200			
250	14321	161	3182
300	2881	235	2622
350			
400	721	376	2178



Fuente: Laboratorio de Investigación de la U.C.S.G

Elaboración: Carlos Luis Verdezoto

Puede observarse en color azul, el comportamiento a la fatiga evaluado.

Si los puntos para la mezcla en particular analizada caen por debajo de la línea del percentil (color naranja), el comportamiento estimado será INADECUADO. Si los puntos se ubican por arriba de la línea del promedio (color gris), el comportamiento estimado será SATISFACTORIO. Entre ambas líneas el comportamiento no puede garantizarse como bueno, aunque puede considerarse como TOLERABLE mientras se desarrollan más estudios que aporten a la reducción de este umbral.

De acuerdo a la línea de ajuste obtenida con los resultados de las pruebas de fatiga realizadas, la mezcla sin caucho puede considerarse satisfactorio. Mientras que el resultado obtenido en la mezcla con caucho se considera muy tolerable.

Briquetas sin caucho.

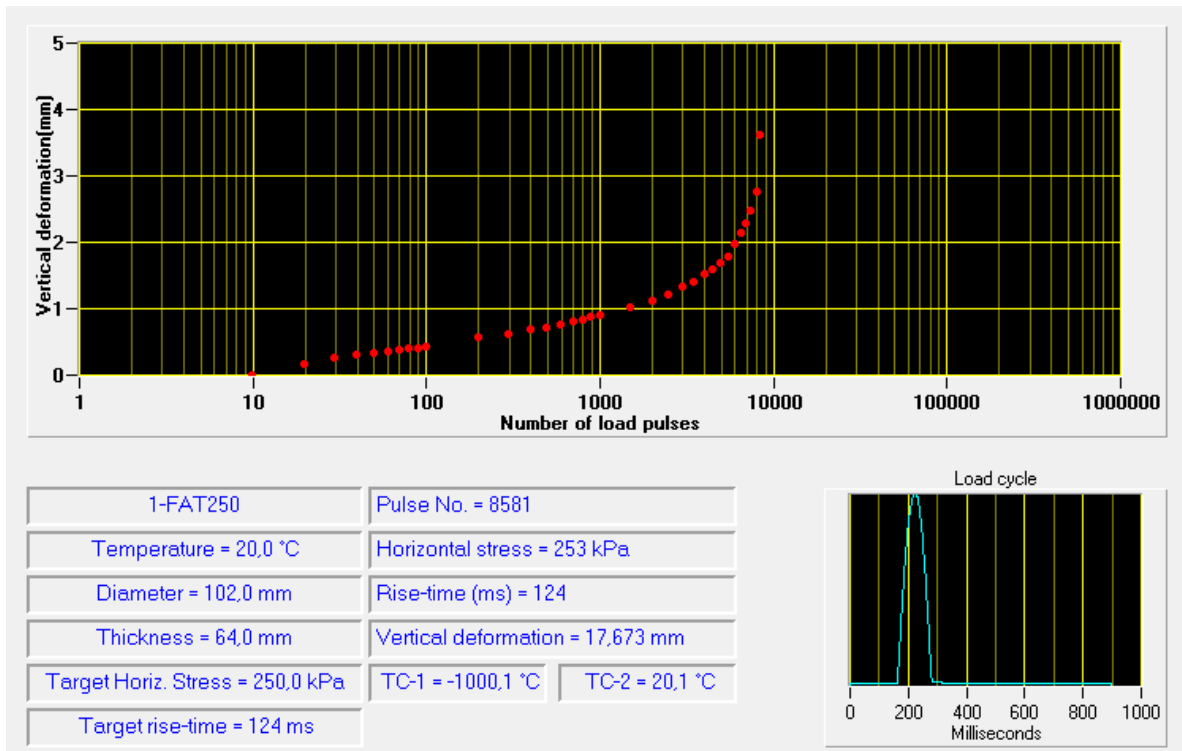


Figura 3-22: Fatiga sin caucho 250 KN

Fuente: Laboratorio de Investigación de la U.C.S.G

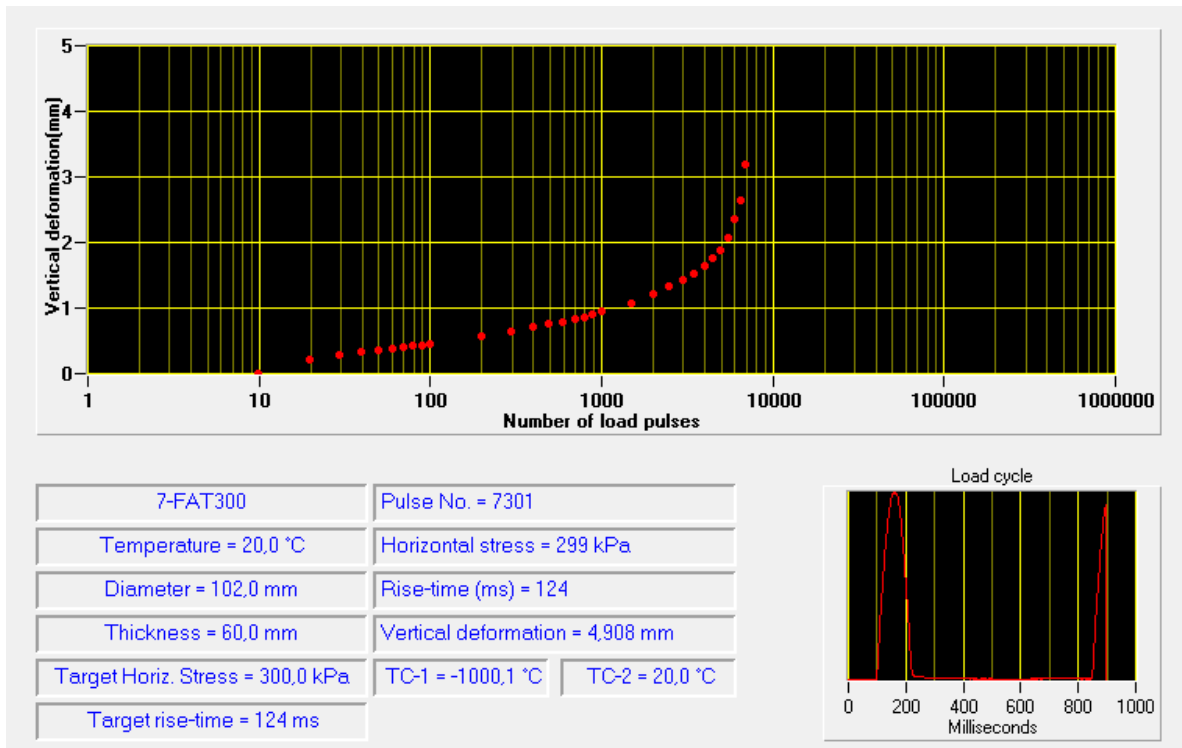


Figura 3-23: Fatiga sin caucho 300 KN

Fuente: Laboratorio de Investigación de la U.C.S.G

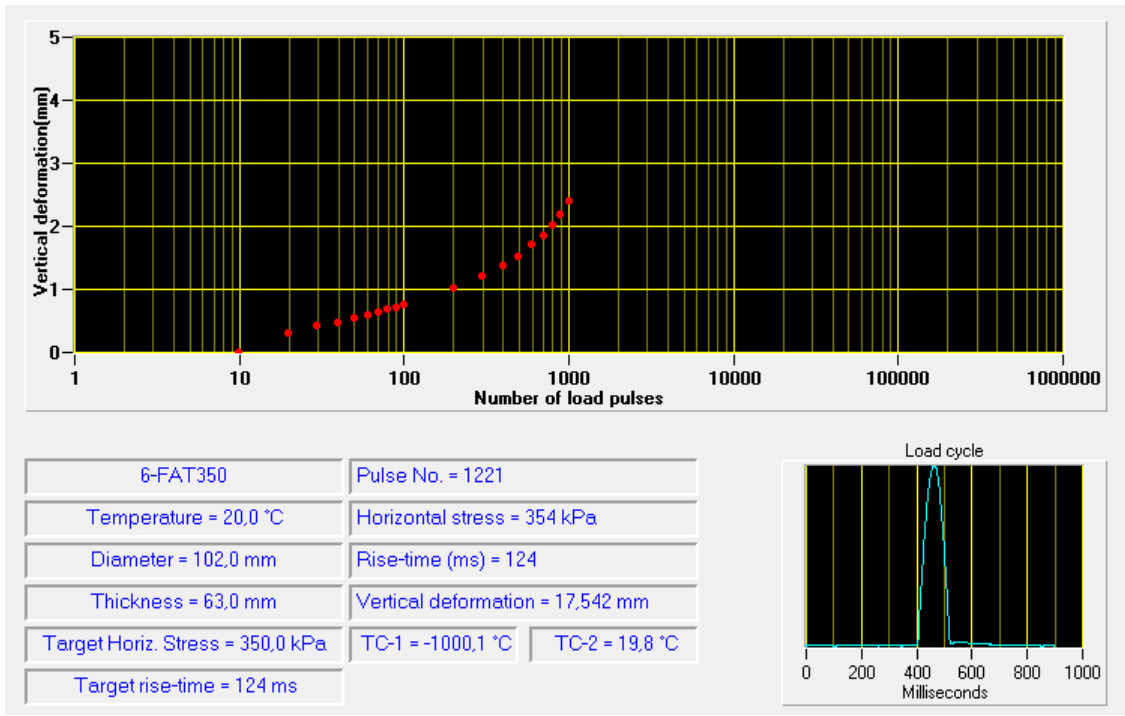


Figura 3-24: Fatiga sin caucho 350 KN

Fuente: Laboratorio de Investigación de la U.C.S.G

Briquetas con caucho

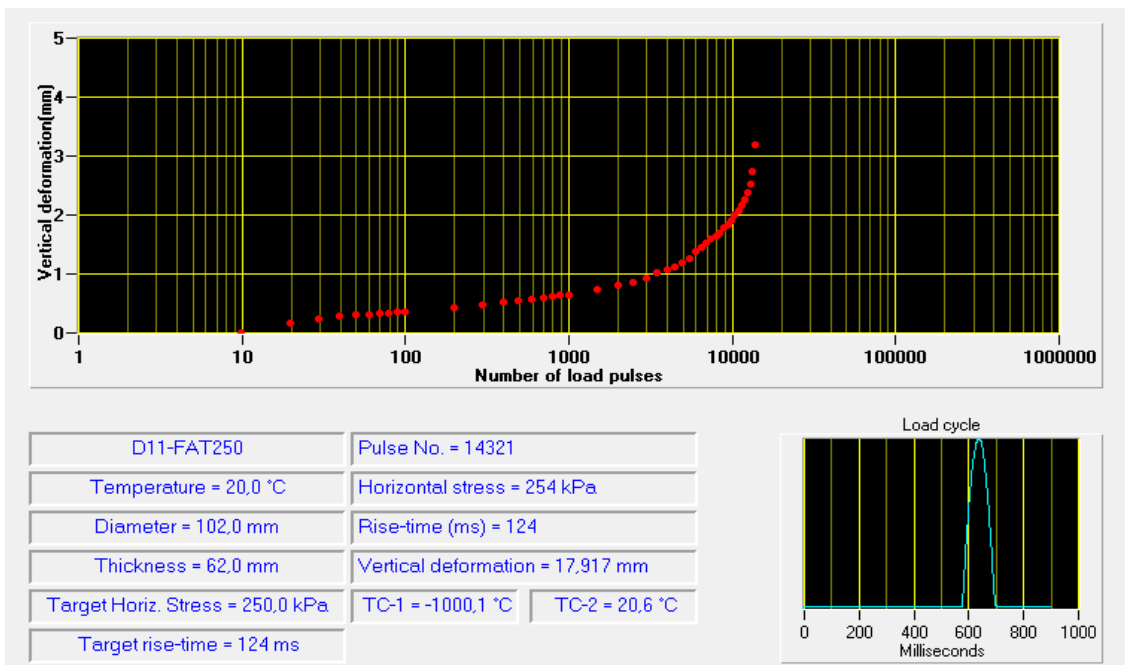


Figura 3-25: Fatiga con caucho 250 KN

Fuente: Laboratorio de Investigación de la U.C.S.G

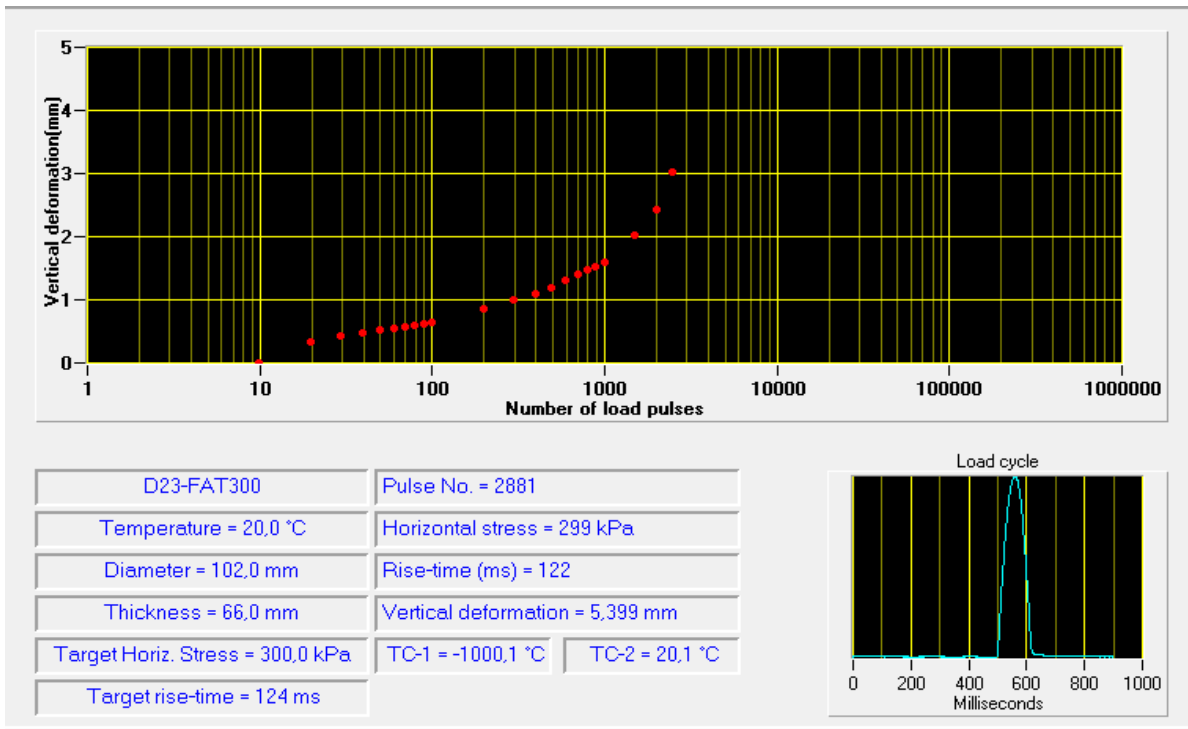


Figura 3-26: Fatiga con caucho 300 KN

Fuente: Laboratorio de Investigación de la U.C.S.G

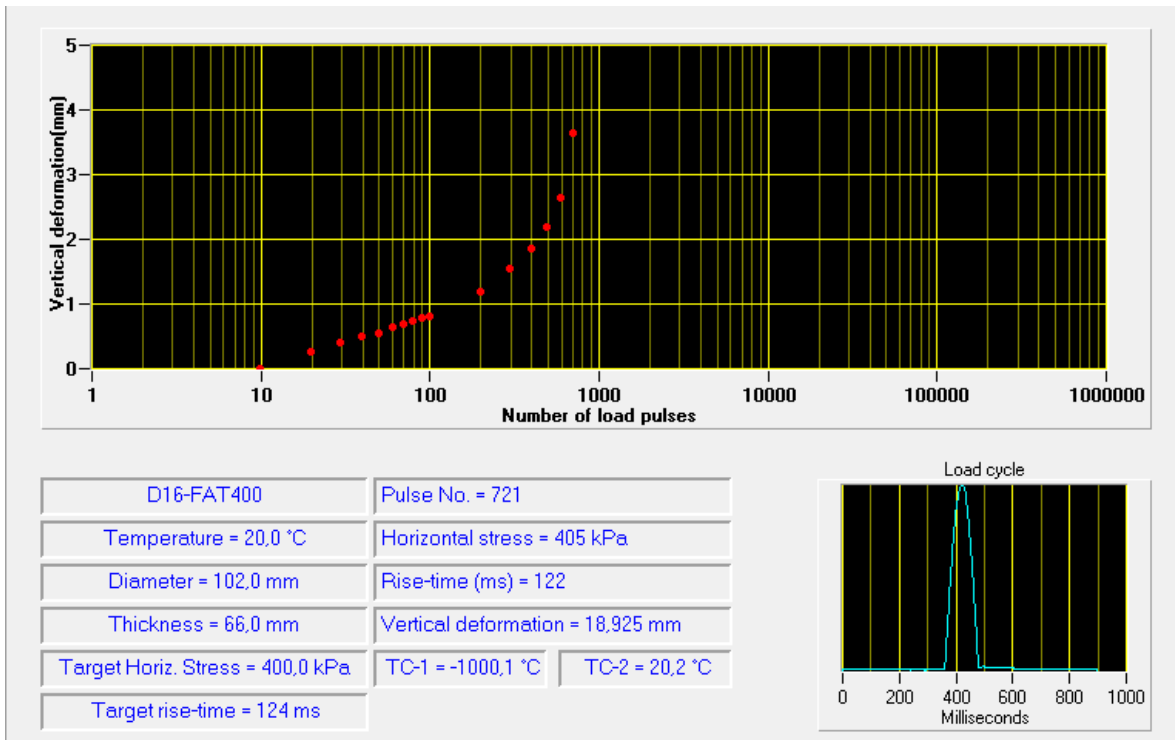


Figura 3-27: Fatiga con caucho 400 KN

Fuente: Laboratorio de Investigación de la U.C.S.G

c.- Deformación permanente por compresión cíclica (Ensayo conocido como Creep dinámico, ahuellamiento o deformación plástica).

La prueba de compresión cíclica uniaxial se realiza para estimar el comportamiento ante las deformaciones plásticas. Un ciclo de carga consiste en la aplicación de una presión durante 1 segundo seguido por 1 segundo de descanso, con ondas cuadráticas. El ensayo se ejecuta a una temperatura de 40°C, con una magnitud de carga de 100 kPa, midiendo las deformaciones provocadas por 3600 repeticiones de dicha carga.

Los resultados obtenidos son:

Tabla 2-0-13: Resultados de ensayos de ahuellamiento

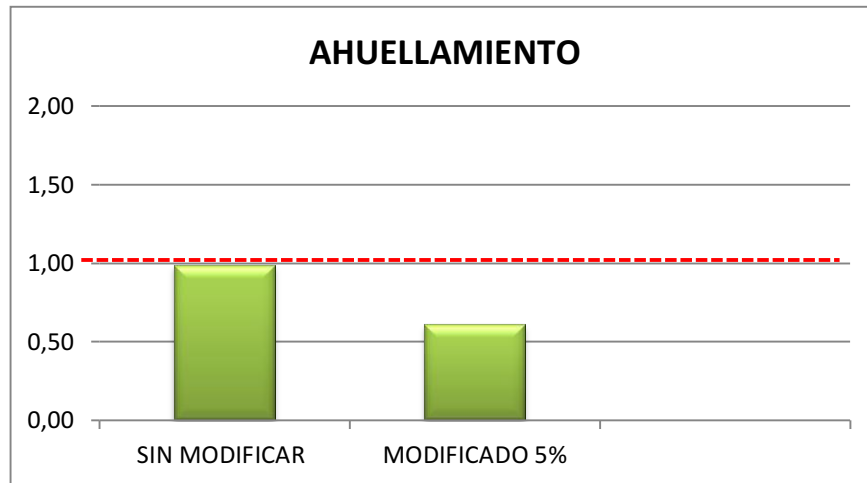
SIN CAUCHO		CON CAUCHO	
MUESTRAS	CREEP DINÁMICO (%)	MUESTRAS	CREEP DINÁMICO (%)
4	1,03	D	0,65
5	0,944	E	0,651
PROMEDIO	0,987	PROMEDIO	0,6055
DES. EST.	0,0608	DES. EST.	0,0629

Fuente: Laboratorio de Investigación de la U.C.S.G

Elaboración: Carlos Luis Verdezoto

Según los criterios británicos (Cooper, 2002), bajo estas condiciones:

- Deformaciones por debajo de 1% la mezcla tendrá un buen comportamiento.
- Con deformaciones superiores a 2% la mezcla tendrá asegurado un mal comportamiento.
- Entre 1 y 2% existe incertidumbre en el desempeño respecto a las deformaciones.



En una investigación realizada en la UCSG (Vila, 2013), se comprobó que existe una buena relación entre la exigencia del 1% de deformación en la prueba aplicada con el adecuado comportamiento ante el ahuellamiento en el sitio. En el 93,5% de los casos dicha relación se cumplió.

Sin Caucho

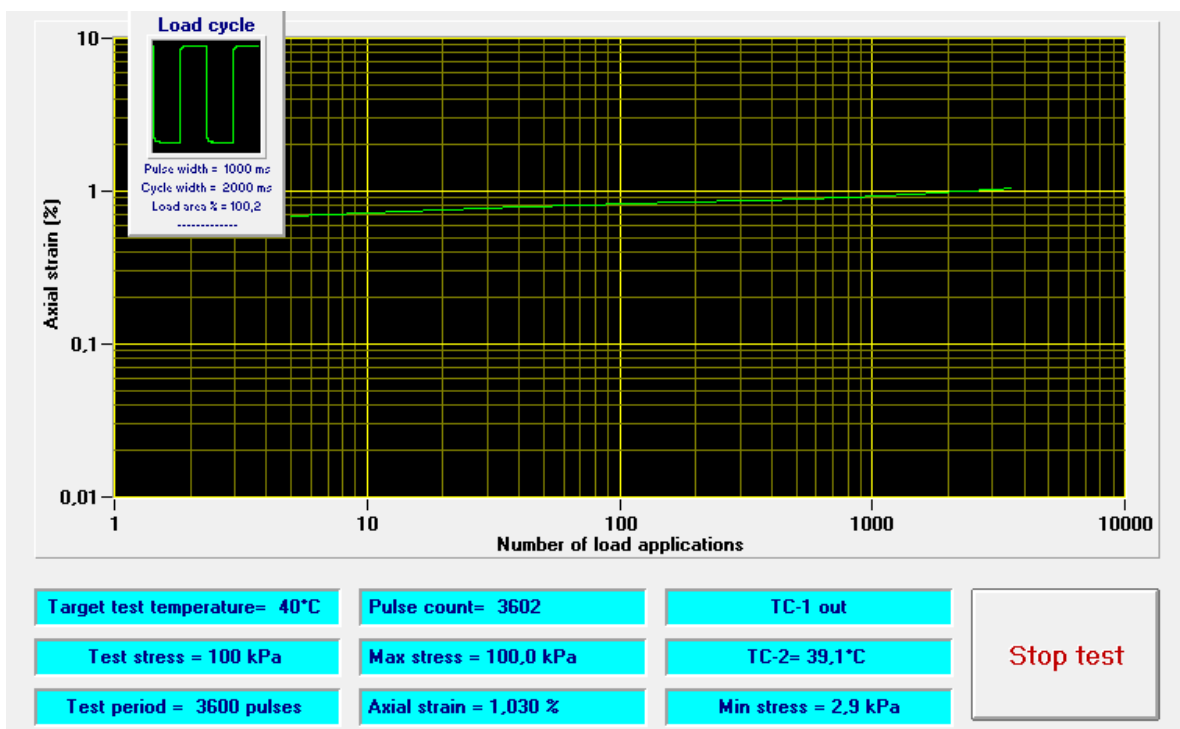


Figura 3-28: Creep dinámico. Briqueta 4
 Fuente: Laboratorio de Investigación de la U.C.S.G

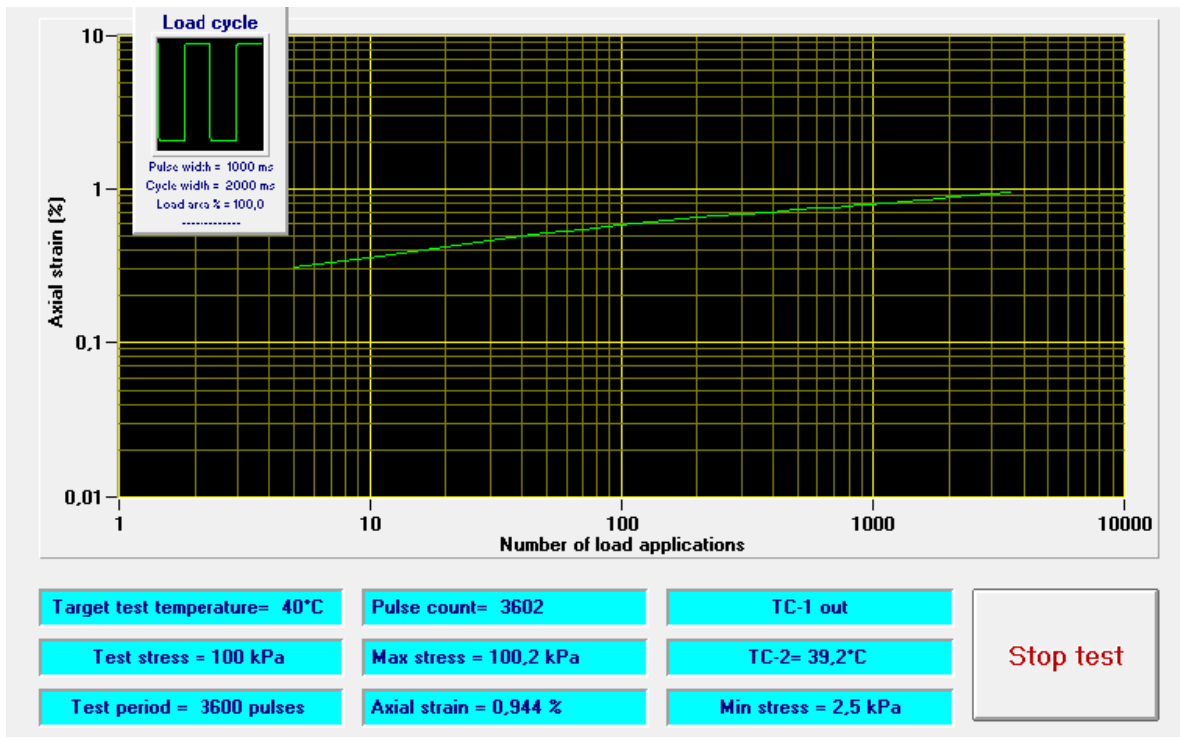


Figura 3-29: Creep dinámico. Briqueta 5
Fuente: Laboratorio de Investigación de la U.C.S.G

Briquetas con caucho

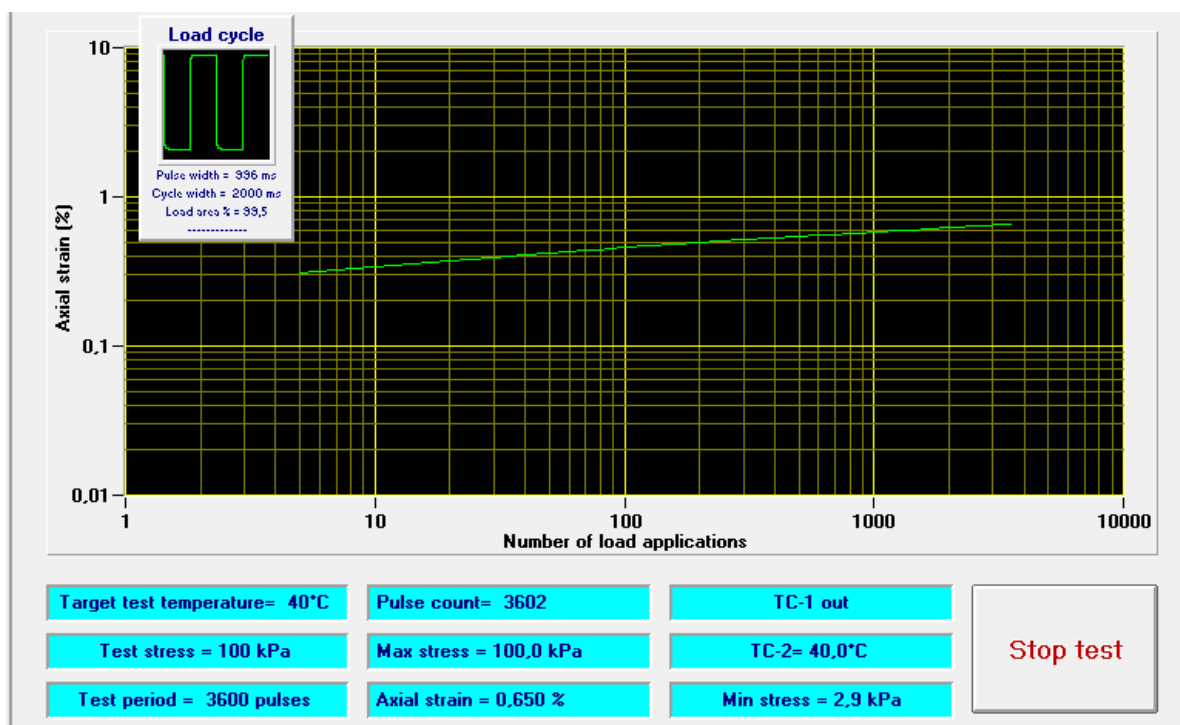


Figura 3-30: Creep dinámico. Briqueta D
Fuente: Laboratorio de Investigación de la U.C.S.G

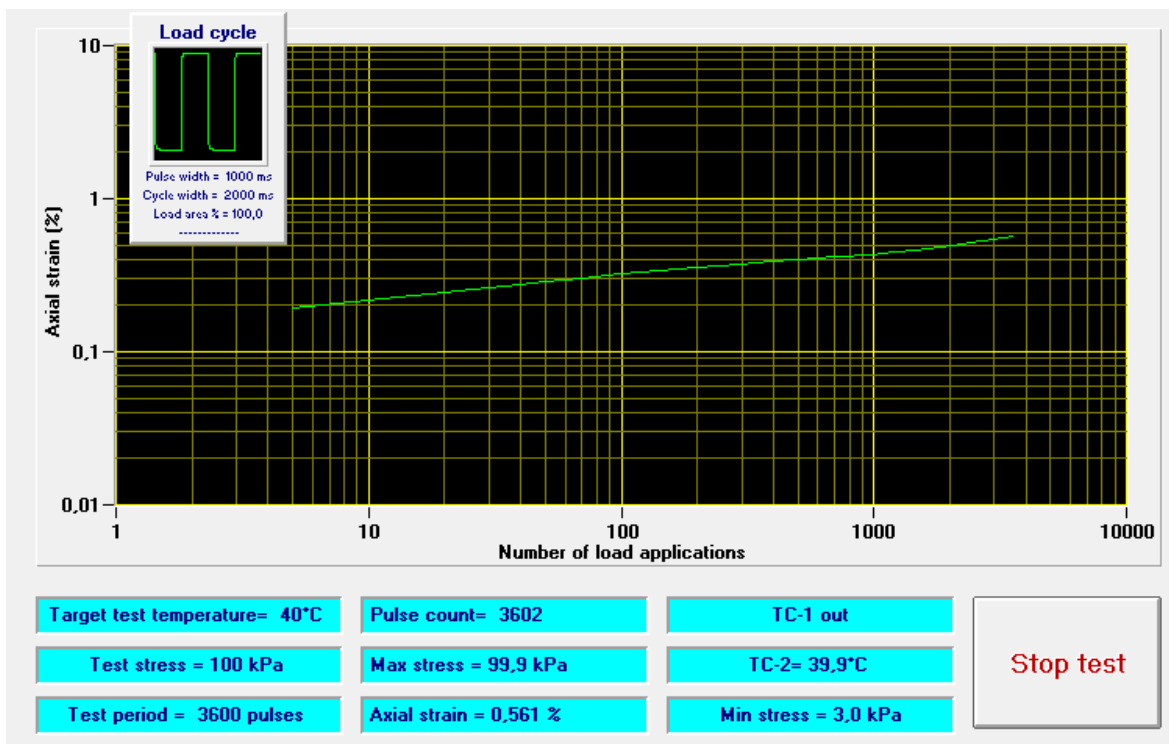


Figura 3-31: Creep dinámico. Briqueta E
Fuente: Laboratorio de Investigación de la U.C.S.G

1.2) Análisis comparativo de resultados.

Para el efecto sólo se considera los resultados de los diseños escogidos tanto en la mezcla tradicional, cómo en la muestra modificada con 5% de caucho. El diseño realizado con 10% de caucho no se considera analizar sus resultados debido a que no cumple con los requerimientos mínimos especificados por las normas que rigen cada ensayo. La finalidad de evaluar los resultados obtenidos en los ensayos es para determinar las propiedades físico – mecánicas y dinámicas de las mezclas asfálticas convencional y modificada para realizar un análisis comparativo de resultados mediante el uso de gráficos estadísticos el mismo que es importante para determinar las mejoras de la mezcla modificada con respecto a la mezcla convencional.

Análisis de resultados físico-mecánicas (método Marshall).

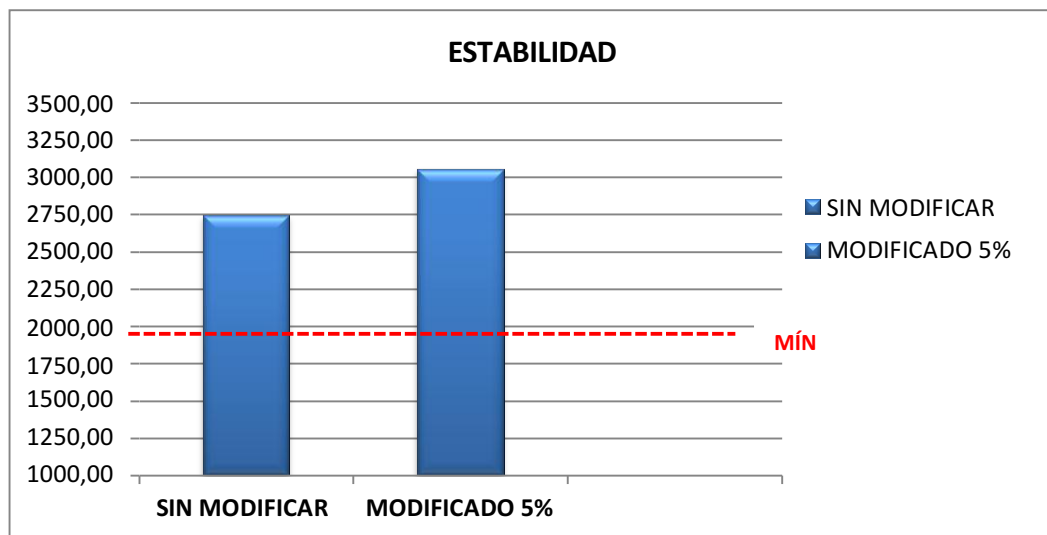
Tabla 2-0-14: Resumen de resultados de muestras sin modificar

RESUMEN DE RESULTADOS DE MUESTRAS SIN MODIFICAR						
% ASFALTO	ESTABILIDAD (lbs)	FLUJO (0.01")	PESO UNITARIO (Lb/pie ³)	% VACÍOS EN AGREGADO	% VACIOS MEZCLA	% VACIOS RELLENOS
6,0%	2746,12	12,33	149,37	17,07	4,01	74,78
Especificaciones	Mín: 1800 Lb	8 - 16		Mín: 14%	3 - 5%	65 - 75%

RESUMEN DE RESULTADOS DE MUESTRAS MODIFICADA CON 5% DE CAUCHO						
% ASFALTO	ESTABILIDAD (lbs)	FLUJO (0.01")	PESO UNITARIO (Lb/pie ³)	% VACÍOS EN AGREGADO	% VACIOS MEZCLA	% VACIOS RELLENOS
5,5%	3065,83	12,00	150,58	15,96	4,04	74,68
Especificaciones	Mín: 1800 Lb	8 - 116		Mín: 14%	3 - 5%	65 - 75%

Fuente: Carlos Luis Verdezoto

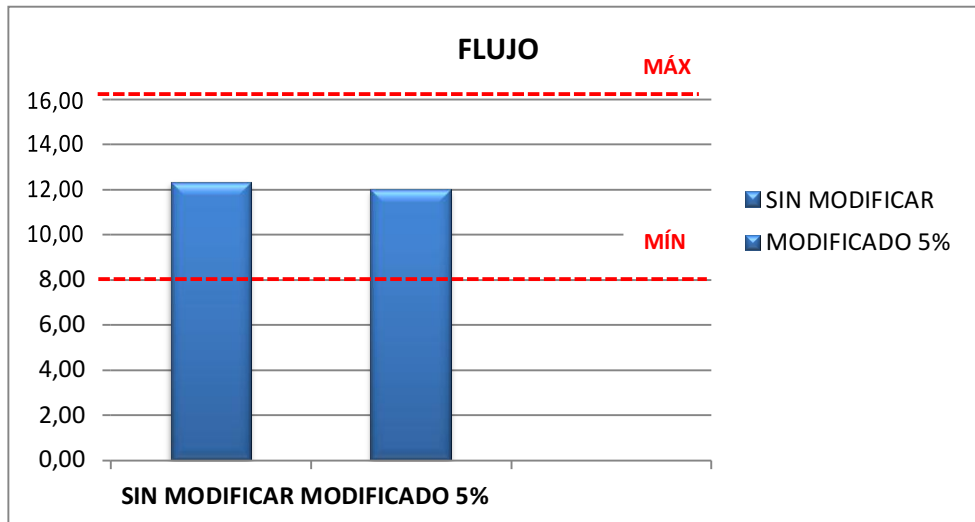
- **Estabilidad**



En la gráfica se observa una mejora notable en la estabilidad en la mezcla diseñada con 5% de caucho respecto a la mezcla con asfalto sin modificar (tradicional).

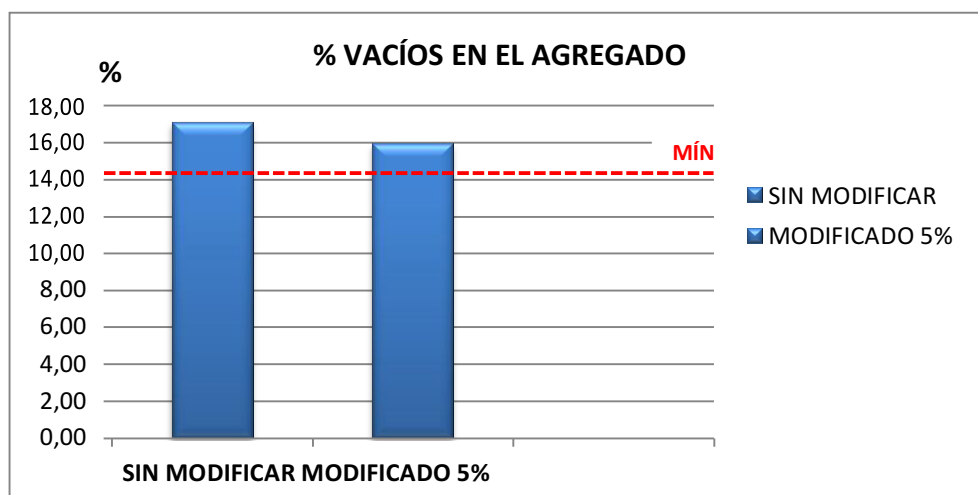
Esto se debe a que la incorporación de polvo de caucho, al aumentar la viscosidad del cemento asfáltico, mejora la cohesión y, en consecuencia, la estabilidad de las mezclas asfálticas.

- **Flujo**



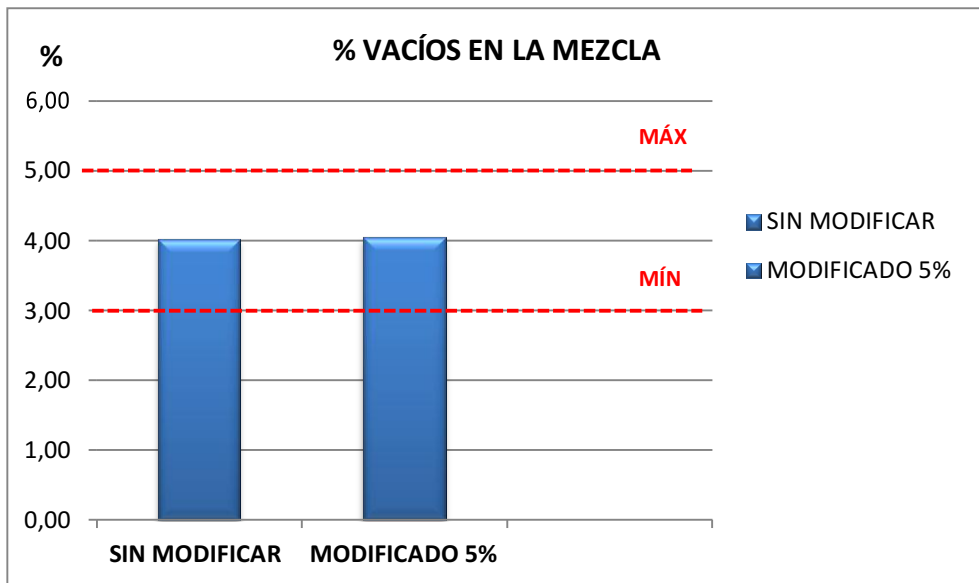
Se analiza el flujo para los 2 diseños y se tiene que están dentro de los rangos permisibles que establece el MTOP de 8 - 16

- **Vacíos en el agregado**



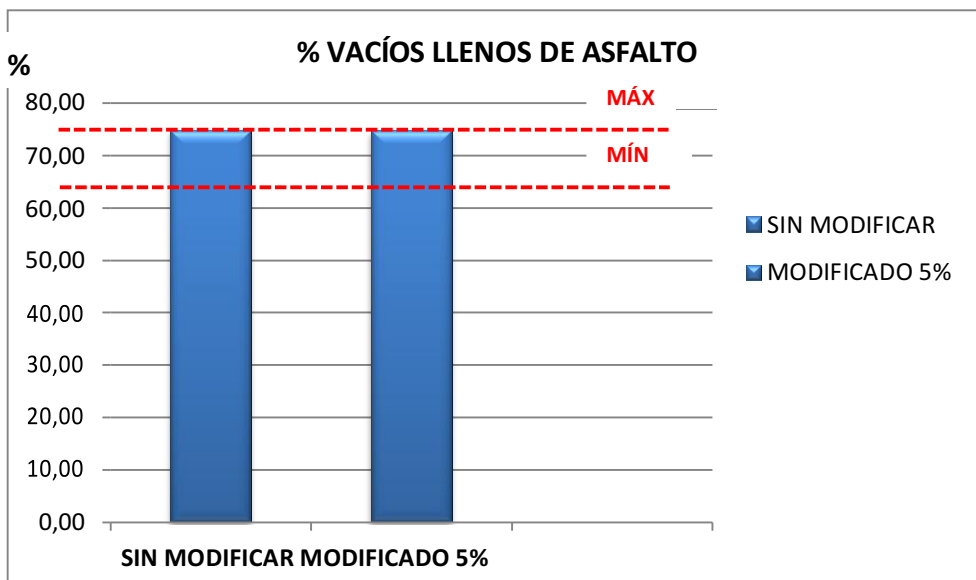
Se analiza el % de vacíos en el agregado para los 2 diseños y se tiene que están dentro del rango mínimo permisible que establece el MTOP de mínimo 14%.

- **Vacíos en la mezcla**



Se analiza el % de vacíos en la mezcla para los 2 diseños y se tiene que están dentro de los rangos mínimos permisibles que establece el MTOP de mínimo 3%, máximo 5%.

- **Vacíos llenos de asfalto**



Se analiza el % de vacíos llenos de asfalto en la mezcla para los 2 diseños y se tiene que están dentro de los rangos permisibles que establece el Asphalt Institute

de mínimo 65%, máximo 75%. Aunque cabe resaltar que las 2 muestras están cerca del límite máximo.

1.3) Costes

En el estudio de los costes debido a la utilización de caucho añadido al mezclador, hay que tener en cuenta los siguientes factores.

- El costo del polvo de caucho, es actualmente el mismo que el betún.
- El costo debido al incremento de energía por la elevación de la temperatura de fabricación de la mezcla bituminosa.
- El costo debido a los equipos adicionales necesarios para fabricar el betún modificado.
- El costo debido a la disminución del rendimiento, en su caso.

Por otro lado, estos costos hay que compararlos con los beneficios debidos a una prolongación de la vida útil de servicio, la mejora en las propiedades mecánicas y dinámicas de la mezcla y de la posible reducción del nivel sonoro.

A continuación, se presenta un análisis de precios unitarios en el suministro del ligante asfáltico, y en el suministro del ligante asfáltico más caucho

Tabla 2-0-15. Costo del ligante asfáltico

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

RUBRO: SUMINISTRO DE LIGANTE ASFÁLTICO

DETALLE:

UNIDAD: kg

EQUIPOS					
DESCRIPCION	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
SUBTOTAL M					0,00
MANO DE OBRA					
DESCRIPCION	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
SUBTOTAL N					0,00
MATERIALES					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO	
		A	B	C = A x B	
Ligante Asfaltico	kg	1,0000	0,35	0,35	
SUBTOTAL O					0,35
TRANSPORTE					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
		A	B	C = A x B	
SUBTOTAL P					
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+					0,35

Tabla 2-0-16: Costo del ligante asfáltico + caucho

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

RUBRO: SUMINISTRO DE LIGANTE ASFÁLTICO + CAUCHO

DETALLE:

UNIDAD: kg

EQUIPOS					
DESCRIPCION	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
SUBTOTAL M					0,00
MANO DE OBRA					
DESCRIPCION	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
SUBTOTAL N					0,00
MATERIALES					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO	
		A	B	C = A x B	
Ligante Asfaltico	kg	1,0000	0,35	0,35	
Caucho	kg	0,0500	0,35	0,02	
SUBTOTAL O					0,37
TRANSPORTE					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
		A	B	C = A x B	
SUBTOTAL P					
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O)					0,37

Conclusiones Y Recomendaciones

A continuación, se presentan los resultados y conclusiones más importantes que se han obtenido en esta investigación, además de recomendaciones para futuras investigaciones referentes a las mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho por vía húmeda para capas de rodadura.

2.1) Conclusiones.

RESULTADOS DE ENSAYOS DE PENETRACIÓN (dmm)				
Muestra	Norma	Resultado	Observación	Estado
A	MOP (60-70 dmm)	68	(Asfalto sin modificar)	Cumple
B	IRAM (40 - 60dmm)	53	(Asfalto modificado con 5% de caucho)	Cumple
C	IRAM (40 - 60dmm)	42	(Asfalto modificado con 10% de caucho)	Cumple
RESULTADOS DE ENSAYOS DE DUCTILIDAD (cm)				
Muestra	Norma	Resultado	Observación	Estado
A	MOP (Mín 100cm)	114	(Asfalto sin modificar)	Cumple
B	IRAM (Mín 10cm)	25	(Asfalto modificado con 5% de caucho)	Cumple
C	IRAM (Mín 10cm)	12	(Asfalto modificado con 10% de caucho)	Cumple
RESULTADOS DE ENSAYOS DE PUNTO DE INFLAMACIÓN (°C)				
Muestra	Norma	Resultado	Observación	Estado
A	MOP (Mín 232°C)	236	(Asfalto sin modificar)	Cumple
B	IRAM (Mín 235°C)	245	(Asfalto modificado con 5% de caucho)	Cumple
C	IRAM (Mín 235°C)	245	(Asfalto modificado con 10% de caucho)	Cumple
RESULTADOS DE ENSAYOS DE PUNTO DE ABLANDAMIENTO (°C)				
Muestra	Norma	Resultado	Observación	Estado
A	MOP (Mín 48°- Máx 57°C)	50	(Asfalto sin modificar)	Cumple
B	IRAM (Mín 58°C)	59	(Asfalto modificado con 5% de caucho)	Cumple
C	IRAM (Mín 58°C)	60	(Asfalto modificado con 10% de caucho)	Cumple

Los resultados de las propiedades físicas de Asfalto obtenidos en laboratorio cumplen con los requerimientos exigidos por las normas.

RESUMEN DE RESULTADOS DE MUESTRAS SIN MODIFICAR						
% ASFALTO	ESTABILIDAD (lbs)	FLUJO (0.01")	PESO UNITARIO (Lb/pie³)	% VACÍOS EN AGREGADO	% VACIOS MEZCLA	% VACIOS RELLENOS
4,5%	1837,66	7,67	143,92	18,82	7,42	60,48
5,0%	2336,93	8,33	145,95	18,11	6,57	63,72
5,5%	2632,17	10,33	148,42	17,16	5,26	68,16
6,0%	2746,12	12,33	149,37	17,07	4,01	74,78
6,5%	2641,40	14,67	149,00	17,72	3,76	78,77
7,0%	2394,68	16,67	148,38	18,50	3,23	82,53
Especificaciones	Mín: 1800 Lb	8 - 16		Mín: 14%	3 - 5%	65 - 75%

RESUMEN DE RESULTADOS DE MUESTRAS MODIFICADAS CON 5% DE CAUCHO						
% ASFALTO	ESTABILIDAD (lbs)	FLUJO (0.01")	PESO UNITARIO (Lb/pie³)	% VACÍOS EN AGREGADO	% VACIOS MEZCLA	% VACIOS RELLENOS
4,5%	2197,53	9,33	140,31	19,14	6,99	66,45
5,0%	2715,11	10,67	144,65	17,00	4,77	71,89
5,5%	3065,83	12,00	150,58	15,96	4,04	74,68
6,0%	3053,66	13,67	152,32	16,52	3,06	80,15
6,5%	2796,05	15,33	149,97	17,18	2,88	83,25
7,0%	2419,33	17,67	148,36	18,51	2,57	84,27
Especificaciones	Mín: 1800 Lb	8 - 16		Mín: 14%	3 - 5%	65 - 75%

RESUMEN DE RESULTADOS DE MUESTRAS MODIFICADAS CON 10% DE CAUCHO						
% ASFALTO	ESTABILIDAD (lbs)	FLUJO (0.01")	PESO UNITARIO (Lb/pie³)	% VACÍOS EN AGREGADO	% VACIOS MEZCLA	% VACIOS RELLENOS
4,5%	1741,67	6,00	135,28	19,14	7,09	62,94
5,0%	1827,67	7,33	138,41	18,56	6,43	64,59
5,5%	1951,33	9,33	140,58	21,54	5,45	74,66
6,0%	2052,67	14,33	141,92	19,84	5,07	73,29
6,5%	1859,67	16,00	139,70	22,86	3,75	83,58
7,0%	1688,33	19,33	137,03	24,73	3,68	85,12
Especificaciones	Mín: 1800 Lb	8 - 16		Mín: 14%	3 - 5%	65 - 75%

En el comportamiento de los 3 diseños, podemos apreciar que el porcentaje que cumple con los requerimientos mecánicos de las normas establecidas por el MTOP corresponde al 6.0% de asfalto para la mezcla tradicional, y del 5.5% para muestras modificadas con 5% de caucho, estableciendo una diferencia de 0.5% de asfalto frente a la mezcla tradicional, y con mejoras significativas especialmente en su estabilidad.

Por tal motivo se establece que la mezcla que tiene contenido de 5% de caucho tiene resultados muy satisfactorios frente a la mezcla tradicional.

En cambio, la mezcla que tiene 10% de caucho no cumple los requerimientos establecidos. La posible razón para que la muestra no cumpla con las normas establecidas es que el exceso en la cantidad de caucho produce una mezcla poco adhesiva y cohesiva, lo que significa que los agregados no se adhieren al ligante, y no se mantienen firmes en su posición las partículas de agregado en la mezcla compactada, por lo tanto su estabilidad es baja y su porcentaje de vacíos es alto, y existiría un fácil y rápido deterioro de la carpeta asfáltica.

- De acuerdo a los ensayos reológicos realizados en laboratorio se caracteriza a la muestra por su notable mejora en las propiedades dinámicas tales como módulo de rigidez y ahuellamiento de la mezcla modificada con 5% de caucho, respecto a la mezcla convencional, por lo que se puede asegurar que los daños viales van a disminuir con la utilización de esta mezcla, lo que esto implica menos costo en mantenimientos viales.

ENSAYOS REOLÓGICOS			
Muestras	MÓDULO DE RIGIDEZ A 20°C (MPa)	FATIGA (x10 ⁻⁶)	AHUELLAMIENTO %
MUESTRAS SIN CAUCHO	2631	307	0,987
MUESTRAS MODIFICADA CON CAUCHO 5%	3949	257	0,6055

La mejora más significativa es en el módulo de rigidez ya que este se incrementa hasta en un 33.37 por ciento con respecto a la mezcla convencional, siendo esta una de las propiedades más importantes en el

diseño de pavimentos, generará carpetas asfálticas de menor espesor con la misma capacidad estructural.

Los Ensayos de fatiga en la mezcla sin caucho pueden considerarse satisfactorio. Mientras que los resultados obtenidos en la mezcla con caucho se considera muy tolerable. Esto quiere decir que las dos muestras están dentro de los rangos permisibles aunque la muestra sin modificar muestra un mejor comportamiento.

- Los ensayos de ahuellamiento en ambos casos tienen están dentro de las consideradas muestras satisfactorias entre la exigencia del 1% de deformación, considerando que el resultado de la muestra con caucho está más lejos de llegar al 1%, esto nos indica que la muestra tiene mejor comportamiento ante la muestra sin modificar, ya que ésta última se encuentra muy cerca de las mezclas inadecuadas que son las que tienen valores mayores al 1%, concluyendo así, que la muestra tendería a sufrir de ahuellamiento.
- La mezcla modificada con 10% de caucho no cumple con los parámetros establecidos por la normativa, razón por la cual no es considerada para realizar las pruebas de desempeño.
- Anteriormente las únicas propiedades que servían como elemento de juicio para caracterizar una mezcla eran la densidad estabilidad y el flujo, como se pudo comprobar con esta investigación la caracterización dinámica de las mezclas en lo referente a módulos dinámicos da información bastante clara del comportamiento de la mezcla en servicio y durante su vida útil.

- Este trabajo podrá ser complementado con un tramo de prueba que permita comprobar en obra el funcionamiento y la mejora en las propiedades de la mezcla obtenida en el laboratorio.
- Para garantizar la calidad de las mezclas asfálticas el personal encargado de la producción debe tener la preparación adecuada para evitar los daños de fabricación y colocación en obra.
- Promover y motivar la aplicación de este tipo de mezclas asfálticas modificadas para que puedan ser utilizadas dentro de proyectos viales por los gobiernos autónomos provinciales y seccionales.

[REDACTED]

[REDACTED]

BIBLIOGRAFÍA

- Botasso, G. (2003). *Diseño de mezclas asfálticas en caliente*.
- I.N.V.E-799-07. (2012). *Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas en caliente*. Obtenido de Unicauca.edu.com.
- INVIAS Pavimentos asfálticos. (2012). Suministro de cemento asfáltico modificado con grano de caucho. *Invias*.
- Laboratorio nacional de vialidad. (Junio de 2015). *Mezcla asfáltica en caliente*. Recuperado el 01 de 08 de 2016, de www.vialidad.cl
- Maila, P. (2013). *Comportamiento de una mezcla asfáltica modificada con polímero vinil acetato (EVA)*. Quito - Ecuador.
- MOP. (2002). *Obras Públicas*. Recuperado el 21 de Julio de 2016, de <file:///C:/Users/CARLUIS/Desktop/TT/Especificaciones-Tecnicas%20MOP.pdf>
- MOP-001-F. (2002). *Especificaciones para la construcción de caminos y puentes*.
- Navarro. (2013). Confección y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de caucho. *Universidad de Chile*, 29.
- Náyade, R. P. (2006). *Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco*. Chile.
- Pérez, R. H. (2014). *REALIDADES Y PERCEPCIONES DEL USO DE LOS ASFALTOS MODIFICADOS EN COLOMBIA*. Recuperado el 22 de Junio de 2016, de Universidad Militar Nueva Granada: <http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/12236/1/TRABAJO%20FINAL%20MODIFICADOS%2017-06-2014.pdf>

**Alegria
Eduardo Santos Baquerizo**

Decano de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas. Magister en Geotécnia. Magister en Docencia e Investigación Educativa. Doctorado en Ciencias Ambientales. Profesor de la Universidad Politécnica del Litoral. Director de Fiscalización Edificio de Contraloría de la Ciudad de Guayaquil. Director de Obras Civiles de la Policía Nacional en Guayaquil. Fiscalizador de Obras Civiles de la Policía Nacional.

Carlos Luis Verdezoto Alegria

Estudiante de Ingeniería Civil

Carlos Olmedo Mora Cabrera

Título de Ingeniero Civil – Universidad de Guayaquil. Magister en Docencia y Gerencia en Educación Superior - Universidad de Guayaquil. Diploma Superior en Docencia y Evaluación en Educación Superior – Universidad de Guayaquil. Diplomado Programa de Fiscalización Integral de Obras en el Instituto Tecnológico Monterrey México. Director de la Carrera de Ingeniería Civil - 2 artículos Latindex. Director del Departamento de Topografía. Coordinador del Área Vía de Comunicaciones. Coordinador de Internacionalización de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas de la Universidad de Guayaquil. Jefe del Departamento Técnico del Primer Proyecto Urbanístico del Municipio de Guayaquil. Jefe del departamento de Mantenimiento de la Universidad de Guayaquil

Francisco Javier Córdova Rizo

Vicedecano de la Facultad de Ciencias, Matemáticas y Físicas, Magister en Geotecnía, Magister en Docencia y Gerencia en Educación Superior. Diplomado Superior en Docencia y Evaluación e la Educación Superior, experiencias laboral Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas-Carreras de Ingeniería Civil Docente en las asignaturas de Carreteras I y Diseño Vial. Director de Construcción del Proyecto Control de Inundaciones de la Ciudad de Babahoyo. Superintendente de Obras de la Constructora PROGECON S.A Consultor Vial

ISBN: 978-9942-760-99-9



9 789942 760999