

**CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE
PROYECTO DE GRADUACIÓN**

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. Pedro Castro Fernández, Ing. Sergio Fernández Cerdas, Ing. Rommel Cuevas Kaufmann, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



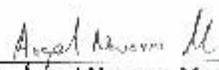
Ing. Gustavo Rojas Moya.
Director



Ing. Pedro Castro Fernández.
Profesor Guía



Ing. Sergio Fernández Cerdas.
Profesor Lector



Ing. Ángel Navarro Mora.
Profesor Observador

Efecto de la variación de la relación polvo / asfalto sobre la durabilidad de mezclas asfálticas



Abstract

The question that motivated this research was the need to know if the ratio of mineral dust / effective asphalt content is a relevant parameter by itself, not by correlation with other properties, since currently the Ministry of Public Works can reject asphalt mixes only because of unacceptable mineral dust / effective asphalt content ratios, whereas other indicators might show compliance.

Different mixtures were manufactured at the laboratory with the mix design optimum asphalt content applied at the actual mixing plant from MOPT at Siquirres. Also mixes with dust / effective asphalt content ratios of 1.0, 1.3 and 1.7 were manufactured and tested by diametral tension, stability and flow, and resilient modulus. Therefore it was possible to gain some knowledge on whether or not it might be feasible to change the current standard.

As for the results, it was determined that there isn't a strong evidence of connection between the performance of the mixture and the dust / effective asphalt content, and there might be some much more important parameters to judge a mixture performance.

Keywords: dust / effective asphalt content, durability, retained strength.

Resumen

La interrogante que le dio forma a este trabajo fue la necesidad de saber si la relación polvo mineral / asfalto efectivo es un parámetro relevante por sí mismo, no por correlación con otros, por cuanto el Ministerio de Obras Públicas y Transportes puede rechazar mezclas con base en el incumplimiento para dicho parámetro, mientras que otros indicadores evidencian cumplimiento de los requerimientos.

Se elaboraron diferentes mezclas asfálticas a partir del diseño de mezcla Marshall utilizado en la planta del MOPT de Siquirres, y se cambió la relación polvo mineral / asfalto efectivo con valores de 1,0, 1,3 y 1,7; seguidamente se practicaron pruebas, para determinar su comportamiento y desempeño, tales como resistencia a la tensión diametral, estabilidad y flujo, así como módulo resiliente, para así obtener información de si es factible o no cambiar dicho requerimiento.

En cuanto a los resultados, pudo determinarse que no hay una evidencia ineludible de que exista relación en el desempeño de la mezcla y la relación polvo mineral / asfalto efectivo y que es muy probable que existan otros parámetros mucho más importantes para juzgar el desempeño de las mezclas asfálticas.

Palabras clave: relación polvo mineral / contenido de asfalto efectivo, durabilidad, resistencia retenida.

Efecto de la variación de la relación polvo / asfalto sobre la durabilidad de mezclas asfálticas

MARÍA ALEJANDRA BENAVIDES SOLERA

Proyecto final de graduación para optar por el grado
académico de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Septiembre del 2016

Contenido

| | |
|----------------------------------|----|
| Prefacio..... | 1 |
| Resumen ejecutivo..... | 2 |
| Introducción..... | 3 |
| Marco teórico..... | 6 |
| Metodología..... | 11 |
| Resultados | 19 |
| Análisis de los resultados | 36 |
| Conclusiones | 40 |
| Apéndices | 42 |
| Anexos..... | 62 |
| Referencias | 63 |

Prefacio

La combinación de polvo mineral (porcentaje de agregado por peso pasando la malla número 200) junto al ligante que forma el aglutinante asfáltico es de suma importancia para el comportamiento reológico (viscosidad, densidad), impermeabilidad y durabilidad de la mezcla asfáltica. La relación polvo mineral / asfalto es uno de los factores que intervienen para conseguir una buena mezcla, ya que cuando esta relación es alta se puede deber a dos factores; que exista mucho porcentaje pasando la número 200, lo cual tiende a derivar una mezcla asfáltica más deformable; también puede ser que exista poco asfalto efectivo generando problemas de vacíos, fatiga, etc.

El MOPT tiene en sus carteles de licitación parámetros que van, según la norma, desde 0,8 hasta 1,30 de relación polvo / asfalto efectivo, con un alto grado de incumplimiento histórico incluso desde el diseño de mezcla y hasta en casos de procesos licitatorios con un solo oferente, el cual se tiene que rechazar por el incumplimiento de dicho parámetro, a pesar del cumplimiento de los demás parámetros como durabilidad, resistencia retenida por compresión uniaxial, resistencia retenida a la tensión diametral retenida, contenido de vacíos llenos de asfalto, contenido de vacíos en el agregado mineral, etc. La idea de este proyecto es poder evaluar el desempeño de la mezcla con una variación al margen superior de la relación polvo / asfalto, para así poder considerar posibles cambios a este parámetro para futuras contrataciones.

El beneficio de esto es que al MOPT le quedará una justificación de por qué cambiar la normativa con la que han estado trabajando, además de que el oferente podrá realizar mezclas más eficientes, obviando implícitamente este parámetro, siempre y cuando siga cumpliendo con los parámetros restantes.

El agradecimiento a las instituciones las cuales brindaron apoyo para la realización de los ensayos: en el Lanamme la Ing. Mónica Jiménez; al técnico del laboratorio del ITCR Heiner Navarro; a los técnicos del Laboratorio de materiales del

MOPT, a Gabriel Lacayo, Fernando Guzmán, Henry Zúñiga, Marvin Ramírez, Jorge Solano y José Solano, a los Ingenieros del MOPT, Leonardo Álvarez, Andrés Moya y Hugo Chávez, por brindar especial atención y apoyo cuando se requirió, a el ingeniero Andrés Muñoz quien fue la contraparte y supervisor del MOPT para este proyecto, a Mario Campos Jefe del Laboratorio de Materiales del MOPT, por permitir el desarrollo del proyecto y brindar atención a lo requerido. A mi profesor Guía, el doctor Pedro Castro Fernández, por siempre estar anuente a cualquier consulta y ser la guía intelectual para el buen desarrollo de este trabajo.

Resumen ejecutivo

La principal pregunta, al iniciar este trabajo fue, ¿realmente es relevante la relación polvo/asfalto efectivo para la aceptación o rechazo de mezclas asfálticas?; ya que el MOPT, en ocasiones, rechaza mezclas de oferentes al no cumplir este parámetro únicamente y, muchas veces, se trata del único oferente, imposibilitando la contratación. De primero se realizó una recopilación y revisión de las licitaciones en oficinas centrales del MOPT, para poder generar un histórico de cinco años atrás, respecto de relaciones polvo/asfalto efectivo de las mezclas ofertadas para el MOPT; después, se procedió a realizar una gira a la planta procesadora de mezclas asfálticas del MOPT ubicada en Siquirres, de donde se extrajeron muestras de agregado y ligante asfáltico, para la elaboración de mezcla en el laboratorio.

Se realizó mezcla con la granulometría original del diseño de mezcla para la planta en ese momento; diseño de mezcla Marshall (relación polvo/asfalto efectivo=1,7), a la cual se le realizaron ensayos de tensión diametral retenida a 24 horas, estabilidad y flujo Marshall y módulo resilente; También, se prepararon mezclas con relaciones polvo asfalto efectivo de 1,0 y de 1,3, esto para comparar su desempeño, y así poder demostrar si dicho parámetro era relevante dentro de la generalidad de la normativa nacional. Se realizaron ensayos en el Laboratorio de la sub área de Geotecnia y materiales del MOPT ubicado en San José, en el laboratorio del Instituto Tecnológico de Costa Rica en Cartago, y en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales - Lanamme; los ensayos realizados fueron, resistencia a la tensión diametral retenida(INTE 04-01-05-05), estabilidad y flujo Marshall(INTE 04-01-11-06), además, de módulo resilente(ASTM D4123); el único parámetro de cambio fue el porcentaje del agregado pasando el tamiz número 200, ya que, de esta manera, logró reproducirse la relación polvo/ asfalto efectivo buscada en cada caso, siempre respetando la misma cantidad de porcentaje de asfalto de diseño de mezcla original. Entre las condiciones destaca que los valores de los oferentes históricos, generalmente tienden al

máximo, de esta manera, es posible que durante el proceso constructivo haya incumplimientos de este parámetro; Entre las limitaciones que impidieron obtener resultados más contundentes la principal fue la desactualización del diseño de mezcla que se reproduce en la planta procesadora de mezclas asfálticas del MOPT, ya que la granulometría del agregado que usan en la planta no concuerda con la brindada en el diseño de mezcla; el ligante asfáltico usado a pesar de ser AC-30 , no concuerda en características con los del informe de diseño de mezcla, al practicarle los ensayos, los resultados se desvían de los mismos encontrados en el diseño de mezcla en planta, sin embargo la relación entre el desempeño y durabilidad de la mezcla esta desligado de la relación polvo/asfalto efectivo de acuerdo a los datos de esta investigación. Por lo tanto, no se encontró evidencia de que la relación polvo/asfalto efectivo deba considerarse como un parámetro de aceptación de mezclas asfálticas en el MOPT.

INTRODUCCIÓN

La combinación de polvo mineral (pasando la malla número 200) junto al ligante que forman el mastique asfáltico es de suma importancia para el comportamiento reológico, impermeabilidad y durabilidad de la mezcla asfáltica. La relación polvo mineral / asfalto es uno de los factores que intervienen para conseguir una buena mezcla, debe controlarse su valor tanto por encima como por debajo del parámetro, ya que en cuanto más alta es esta relación, más elevada es la viscosidad de masa y más rígida es la mezcla. Sin embargo, valores muy altos pueden determinar problemas de durabilidad y, eventualmente, susceptibilidad al agrietamiento; si es muy baja, podría ser por poco porcentaje pasando el tamiz número 200, ó mucho asfalto efectivo y esto podría desencadenar problemas de deformación en la mezcla. Por esto es de importancia mantener este parámetro controlado sin embargo lo más común, es que se incumpla por encima del parámetro superior de 1.3; con este informe se pretende demostrar la tendencia del comportamiento de la mezcla, específicamente de la planta de Siquirres, con un valor de la relación polvo mineral / asfalto por encima del rango superior actual en normativa nacional.

Antecedentes

El MOPT tiene en sus carteles de licitación parámetros que van, según la norma, desde 0,8 hasta 1,30 de relación polvo mineral / asfalto efectivo; para los cuales no siempre los oferentes cumplen; en ocasiones, habiendo únicamente un oferente, al cual se le rechaza por el incumplimiento de dicho parámetro, a pesar de estar en regla con los otros parámetros, tales como: durabilidad, resistencia retenida por compresión uniaxial, resistencia retenida a la tensión diametral, contenido de vacíos llenos con asfalto (VFA) y contenidos de vacíos en el agregado mineral (VAM). Se pretende con esto, dar una herramienta, para que funcionarios de

MOPT puedan aceptar mezcla que cumpla con durabilidad y desempeño (demostrándolo practicándole ensayos) aun incumpliendo el valor máximo de relación polvo mineral/ asfalto efectivo.

Justificación del proyecto

En el Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes, CR-2010 este parámetro se describe en la división 400; para especímenes Marshall especifica que la relación polvo / asfalto efectivo deberá tener un valor mínimo de 0,8 y un valor máximo de 1,3.

Se ha evidenciado que la durabilidad de las mezclas puede medirse directa e indirectamente mediante otros parámetros establecidos como:

- Contenido de vacíos en especímenes compactados
- VAM (Contenido de vacíos en el agregado mineral)
- Estabilidad y flujo
- Resistencia a la tensión diametral retenida mínima
- VFA (contenido de vacíos en el agregado mineral)
- Módulo resiliente retenido
- Deformación plástica acumulada

Esto dado a que muchas veces la mezcla cumple por durabilidad, sin embargo, se sale del margen de la relación polvo / asfalto efectivo.

Con este proyecto pretende evaluarse el desempeño de la mezcla con una variación al margen superior de la relación polvo / asfalto efectivo, para así poder considerar posibles cambios a este parámetro en las futuras contrataciones, sin afectación de la durabilidad de la mezcla efectiva.

Planteamiento del problema

Una relación polvo mineral/ asfalto efectivo afuera del rango establecido ha producido que ofertas que se presentan para ejecución de obras de infraestructura vial sean rechazadas por el incumplimiento de esta. También, se ha presentado problemas por la falta de oferentes, ya que todos los que ofertan no cumplen con el parámetro; en algunas ocasiones solo uno, pudiendo dejar de lado el servicio y la calidad es aceptada por ser el único que cumple los requisitos.

Objetivos

Objetivo general

Determinar el efecto de la variación de la relación polvo mineral / asfalto efectivo sobre la durabilidad de las mezclas asfálticas en caliente de la planta de la división de obras públicas del MOPT en Siquirres.

Objetivos Específicos

- Revisar los documentos de ofertas históricas, para determinar cuál es la relación polvo asfalto en cada uno de los diseños, y así poder establecer como se han comportado a lo largo del tiempo las mezclas requeridas por el MOPT en cuanto a la relación polvo mineral / asfalto efectivo.
- Reproducir en el laboratorio la mezcla asfáltica de la planta de Siquirres con la relación polvo / asfalto de diseño, para poder tener un parámetro de control de calidad en cuanto al diseño de mezcla, y la mezcla asfáltica real que se está produciendo en planta.
- Variar la relación polvo mineral / asfalto de la mezcla asfáltica de diseño de manera que se incremente y se asemeje a las ofertas de licitaciones no adjudicadas, para valorar si al llegar al margen superior de la norma establecida, la mezcla sea aprobada por durabilidad.

- Establecer si la relación polvo mineral / asfalto efectivo, es un parámetro que debe ser considerado en especificaciones.

Alcances y limitaciones

Alcances

Se fabricará la mezcla tal y como está en el diseño utilizado en planta actualmente, sin cambiar ningún parámetro.

Seguidamente, se fabricarían mezclas asfálticas cambiando únicamente la relación polvo mineral / asfalto efectivo de diseño en dos décimas más que los de diseño.

Limitaciones

Como parte de las limitaciones que se presentaron a lo largo del proyecto se tienen:

- Se tuvieron retrasos de orden administrativo, ya que, al ser una institución sujeta a rigidez y controles institucionales, resulta muchas veces complicado el uso de equipos, ya que debe haber alguien supervisando siempre.
- Limitaciones climáticas, ya que la planta en observación se encuentra en una zona en la que llueve la mayor parte del tiempo, por lo tanto, en momentos de temporal, la planta cierra, y no puede muestrearse asfalto ni agregado hasta que esta esté en función.
- Limitaciones de diseño, ya que al practicarle los ensayos de rigor al agregado y al ligante asfáltico, los resultados no fueron los esperados (ceranos a los del diseño de mezcla de la planta procesadora de asfaltos del MOPT), por lo tanto, a partir de ahí se obtuvieron problemas de resultados fuera de los parámetros establecidos en las normas nacionales como el porcentaje de vacíos.

Productos esperados

Como parte de los productos esperados en este proyecto están:

- Resultados de pruebas para la mezcla con el actual diseño de la planta de Siquirres
- Valoración de la mezcla según diseño de la planta de Siquirres.
- Determinación de cómo se comporta la mezcla en cuanto a pruebas de durabilidad con una mayor relación polvo mineral / asfalto efectivo
- Determinación de cómo se comporta la mezcla con pruebas de durabilidad variando hacia el margen superior el parámetro de relación polvo mineral / asfalto efectivo establecido en el Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010.

MARCO TEÓRICO

El método de diseño Marshall, fue desarrollado durante la Segunda Guerra Mundial y, posteriormente, fue adaptado para el uso civil en proyectos carreteros (tomando en cuenta mayores presiones de inflado y cargas), dentro de sus parámetros fundamentales tiene compactación, estabilidad, flujo, vacíos en el agregado mineral (VMA) y porcentaje de vacíos de aire (Va). (Castro,2015)

Los requisitos básicos para diseño de mezclas son:

- Suficiente ligante para lograr durabilidad
- Suficiente estabilidad bajo cargas de tránsito
- Vacíos de aire dentro de un rango apropiado; al límite superior para evitar el agrietamiento por fatiga, daño por agua y compresibilidad; y al límite inferior para prevenir flujo plástico y exudación ante la carga.
- Trabajabilidad

Las mezclas asfálticas o aglomerados están formadas por agregados pétreos más un ligante hidrocarburoado, de manera que estos queden cubiertos de este.

Su principal objetivo es lograr desarrollar porcentajes de combinación de agregados y ligante que cumplan los requisitos técnicos y de costo.

Caracterización de materiales pétreos

Son materiales granulares sólidos inertes que se emplean en los firmes de las carreteras con o sin adición de elementos activos y con granulometrías adecuadas; se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cementos, cales, etc.) o con ligante asfálticos (Smith y Collins, 1994).

Los agregados tienen propiedades físicas macroscópicas como dimensión, forma, redondez, densidad, propiedades de superficie, porosidad, permeabilidad, etc. Así mismo, presenta propiedades químicas macroscópicas como solubilidad, alterabilidad, hinchamiento, etc. Cuando el uso de los agregados es para la construcción de pavimentos deben tenerse ciertas consideraciones como:

Naturaleza e identificación: evaluar la naturaleza del agregado, el grado de alteración de los componentes minerales, la porosidad y propiedades químicas.

Propiedades geométricas: forma y angulosidad de las partículas, distribución geométrica.

Propiedades mecánicas: resistencia al desgaste y pulimiento.

Ausencia de impurezas: es fundamental que los agregados por utilizar estén libres de impurezas que puedan afectar el comportamiento.

Inalterabilidad: evaluar las posibles degradaciones que pueda sufrir el agregado.

Adhesividad: los agregados deben ser afines con el ligante por utilizar, caso contrario se necesitará el uso de actuantes (aditivos de adherencia) para garantizar un buen comportamiento de la mezcla.

Los agregados pétreos se clasifican de acuerdo con su tamaño en

- Agregado grueso: El cuál es la parte del agregado retenido en el tamiz número 4.

Estos tienen características y propiedades deseables, que los hacen idóneos para el uso de mezclas, tales como la **granulometría**, ya que influye en la resistencia mecánica del conjunto; el **rozamiento interno**, ya que la resistencia a la deformación o la capacidad de soporte de una capa dependen esencialmente del rozamiento interno (trabazón interna) y la

cohesión que pueda proporcionar con el ligante; el rozamiento interno aumenta con partículas angulosas y de textura superficial áspera; **angulosidad del agregado**; **forma del agregado**, para las cuales existe normativas para uso en pavimentos, en donde se restringe el uso de partículas con formas no deseadas por medio de los índices de partículas planas y alargadas y partículas fiables; **resistencia a la fragmentación de los agregados gruesos**, los agregados deben cumplir con un mínimo de resistencia a la fragmentación o al desgaste, lo cual dará una orientación del comportamiento que tendrá el agregado dentro de la mezcla asfáltica, al entrar esta en servicio; **limpieza del agregado**, el agregado debe estar exento de arcilla, material vegetal u otra impureza que pueda afectar la durabilidad de la capa.

- Agregado fino: el agregado fino es la parte del agregado pétreo que pasa el tamiz número 4, y queda retenido en el tamiz número 200. Estos, al igual que los agregados gruesos, tienen propiedades deseables para su utilización en la mezcla asfáltica; **limpieza del agregado**, este debe estar exento de terrones de arcillas, material vegetal y cualquier otra impureza, para evitar comportamientos anómalos del material dentro de la mezcla; **resistencia a la fragmentación del agregado fino**, el material que se triture para obtener agregado fino deberá cumplir las condiciones exigidas al agregado grueso sobre el coeficiente de desgaste de los ángeles; **adhesividad del agregado fino**, debe tener en cuenta la química en la adhesividad agregado fino – ligante.

- Polvo mineral (filler): este se define como la parte del agregado pétreo que pasa el tamiz número 200, tiene características deseables para ser utilizado en mezclas asfálticas, tales como: **finura**, al ocupar parcialmente los espacios libres dejados por la estructura granular compactada y conformada por partículas mayores, reduce el volumen de vacíos de la mezcla, evitando un aumento de la cantidad de ligante asfáltico; **modificación del comportamiento reológico**, el empleo del polvo mineral incrementa la magnitud de la resistencia a la deformación de la mezcla, sin modificar la naturaleza viscosa del ligante, originando como consecuencia un aumento de la resistencia al corte de las mezclas

asfálticas; **acción estabilizante frente al agua**, incrementa la durabilidad de las mezclas asfálticas frente a la acción del agua debido a que reduce parcialmente la porosidad de la estructura granular, evitando el acceso del agua en su interior.

Algunos ensayos para caracterizar los agregados pétreos son los siguientes:

- Análisis granulométrico. Por medio de este ensayo se determina la distribución de tamaños de partículas, consiste en hacer pasar una cantidad de muestra de agregado por una serie de tamices normalizados (ASTM) en un orden de mayor a menor abertura de tamiz, quedando retenida parte de la muestra en cada tamiz. Se presenta una tabla o una gráfica los porcentajes pasando cada uno de los tamices, y la tolerancia y especificación según el tamaño máximo nominal (Tabla 418-2 CR 2010).

- Ensayo de desgaste de los Ángeles. Este ensayo caracteriza la resistencia que presentan los agregados al desgaste. La máquina de los Ángeles consiste en un cilindro hueco de acero, con sus extremos cerrados y una abertura para introducir las esferas (carga abrasiva), estas se introducen en el cilindro junto con la muestra (el peso de ésta depende del tamaño nominal del agregado) y se hace girar un determinado número de veces, luego se separa la parte de la muestra que pasa por el tamiz número 12 y se determina el coeficiente de desgaste de los Ángeles, el cual es el peso inicial de la muestra menos el retenido después de las 500 revoluciones, a su vez dividido entre el peso inicial por cien.

Ligante asfáltico

Una etapa fundamental en el diseño de mezclas asfálticas es el análisis de la calidad del asfalto y de los agregados. Aquí se describen de manera general las pruebas practicadas a los ligantes asfálticos y a los agregados pétreos.

En Costa Rica, todos los ligantes asfálticos provienen de la Refinadora Costarricense de Petróleo. S.A., actualmente el asfalto que vende Recope es el AC-30 (viscosidad de 2 400 a 3 600 poises a 60 °C).

El ligante asfáltico es un material cementante, en estado sólido, semisólido o viscoso, compuesto principalmente de hidrocarburos de alto peso molecular (asfaltenos, aromáticos, resinas, saturados).

Puede obtenerse en forma natural o por medio de refinación del petróleo. Es adhesivo, durable, altamente resistente a la reacción con ácidos, bases, sales y, además, provee una apropiada flexibilidad a las mezclas con agregado mineral.

Al ser visco-elástico su comportamiento depende de la temperatura y el tiempo de aplicación de carga.

Su función en la mezcla asfáltica es aglutinar los agregados de manera que haya impermeabilidad, trabazón en la estructura interna del agregado y durabilidad; además, la cohesión que adiciona la película del ligante asfáltico sobre los agregados que los recubre, influye en la resistencia mecánica de la mezcla.

Criterios de diseño Marshall

Compactación

La densidad de la mezcla se define como su peso unitario (peso de un volumen específico de mezcla). Es importante, porque al tener una alta densidad, en el pavimento final, se procura un rendimiento duradero de este. (Carrasco,2004)

El criterio de diseño Marshall dice que para menos de 10.000 ejes equivalentes (tránsito liviano) se puede trabajar con una compactación de 35 golpes de martillo Marshall (mazo de 10 libras), para tránsito medio (de 10 000 a 1 000 000 ejes equivalentes) con 50 golpes de martillo Marshall, y para tránsito pesado más de 1 000 000 ejes equivalentes de carga con 75 golpes.

Estabilidad

La estabilidad es la capacidad de resistir desplazamientos y deformaciones bajo cargas de tránsito. Un pavimento estable debería de ser capaz de mantener su forma y acabado bajo cargas repetidas de tránsito. Cuando el pavimento presenta roderas o ahuellamiento en su superficie, así como corrugaciones, es

evidencia de poca estabilidad. (Carrasco,2004)

Los requisitos de estabilidad varían dependiendo de la carga de tránsito específica para cada proyecto, la estabilidad debe ser alta para cumplir con las condiciones de carga. Valores de estabilidad muy altos producen un pavimento demasiado rígido comprometiendo la durabilidad del mismo, y facilitando el agrietamiento.

La estabilidad depende de la fricción y la cohesión interna de la mezcla; la fricción se relaciona con características del agregado como la forma y la textura, la cohesión es resultado de la capacidad del ligante asfáltico. Una buena fricción y cohesión en la mezcla evitan que el agregado se desplace por cargas vehiculares. Entre más angular sea la forma de las partículas de agregado y más áspera sea su textura, más estable será la mezcla.

Flujo

Es una medida de la deformación vertical de la muestra antes de la falla por tortura. Valores altos de flujo indican una mezcla plástica, valores bajos de flujo indican una mezcla con vacíos de aire más altos. (Castro,2015)

Vacíos de aire

Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire que están presentes en los agregados recubiertos de asfalto en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas tengan cierto porcentaje de vacíos para poder permitir una compactación adicional en funcionamiento (bajo cargas de tránsito); el porcentaje de vacíos permitido en laboratorio es del $4\% \pm 1\%$; esto da un margen del 3-5 por ciento. En campo el margen permitido es de 3-8 por ciento de % de vacíos de aire, para Costa Rica. (Castro,2015)

Vacíos en el agregado mineral (VAM)

Los vacíos en el agregado mineral son los espacios de aire que existen entre las partículas del agregado en una mezcla compactada, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto efectivo. Representan un indicador del máximo grosor posible de

capa de ligante alrededor del agregado, como porcentaje del volumen total. Si el valor de VAM es muy pequeño, la mezcla presentará problemas de durabilidad, así como estabilidad, y será costosa. (Carrasco.2004)

Susceptibilidad al daño por humedad

La durabilidad de un pavimento está en función del contenido de vacíos, ya que cuanto menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido de vacíos muy alto proporciona espacios por donde el agua y el aire van a entrar a la mezcla, causando deterioro. (Nieto,2010)

Por el contrario, un porcentaje de vacíos muy pequeño puede provocar exudación de asfalto (condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla, hacia la superficie).

Ensayos de durabilidad

La durabilidad de un pavimento es la capacidad de resistir factores como la desintegración del agregado, oxidación y envejecimiento del asfalto, además de la separación de la película de asfalto con eventual desprendimiento del agregado. (Castro,2015)

En el Cuadro 1. Se describen posibles efectos de poca durabilidad en una mezcla asfáltica, así como sus causales

| CUADRO 1. CAUSAS Y EFECTOS DE UNA POCA DURABILIDAD | |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CAUSAS | EFECTOS |
| Bajo contenido de asfalto | Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado. |
| Alto contenido de vacíos debido al diseño por la falta de compactación | Endurecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento o desintegración. |
| Agregados susceptibles al agua | La película de asfalto se desprende del agregado dejando un pavimento desgastado, o desintegrado. |

Fuente: Carrasco (2004, pág. 67)

Tensión Diametral Indirecta Retenida (INTE 04-01-05-05)

Método de ensayo para determinar la resistencia al daño inducido por la humedad en mezclas asfálticas compactadas.

Este ensayo evalúa los efectos de la saturación y el acondicionamiento acelerado con agua de la mezcla asfáltica compactada; el valor porcentual de la resistencia a la tensión diametral indirecta retenida se obtiene por medio de la comparación de la resistencia de especímenes de ensayo sujetos a acondicionamiento de humedad, con la resistencia de los especímenes de ensayo secos.

Los especímenes se preparan, según las condiciones del diseño de mezcla, cada grupo se divide en dos subgrupos, un subgrupo debe ser ensayado en condición seca por resistencia a la tensión diametral indirecta, el otro subgrupo se somete a saturación al vacío y acondicionamiento por humedad, antes de ser ensayado por resistencia a la tensión diametral indirecta. La resistencia a la tensión diametral indirecta se calcula a partir de los datos obtenidos del ensayo de los dos subgrupos: seco y acondicionado. Ambos grupos tendrían similares contenidos de vacíos promedios.

El parámetro en el país para este ensayo se encuentra en el Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010 en la página 251, en éste dice que la resistencia a la tensión diametral retenida debe ser al menos el 75%, con vacíos de 6 a 8%.

- **Estabilidad y flujo Marshall (INTE 04-01-11-06)**

Este método de ensayo se usa para la medición de la resistencia al flujo plástico de los especímenes cilíndricos de mezcla asfáltica para pavimento, aplicando la carga en dirección perpendicular al eje cilíndrico, utilizando equipo Marshall.

Los valores de estabilidad y flujo Marshall, junto con la densidad, vacíos de aire y vacíos llenos de asfalto son usados para el diseño de mezcla en laboratorio y para la evaluación de mezclas asfálticas.

La estabilidad y el flujo son características de la mezcla asfáltica determinadas con ensayos sobre especímenes compactados.

La estabilidad es la carga máxima de resistencia obtenida de la deformación a velocidad constante en una secuencia de carga. El flujo es la medida de la deformación de la mezcla determinada durante el ensayo de estabilidad.

Los parámetros de estos valores están contemplados en el MANUAL DE ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS,

CAMINOS Y PUENTES CR-2010; y son de 8KN mínimo para la estabilidad, y entre 2 y 3,5 mm de flujo para alto niveles de carga.

- **Módulo Resiliente (ASTM 4123)**

Módulo resiliente se define como la magnitud del esfuerzo desviador repetido en compresión triaxial dividido entre la deformación axial recuperable. Durante la prueba de carga repetida, se puede ver, después de algunos ciclos de carga, que el modulo llega a ser constante; al módulo que permanece constante se le llama módulo resiliente. El ciclo de carga se compone de un pulso de amplitud y duración establecida, seguido de un tiempo de relajación. Los datos de deformación obtenidos, junto con los de la carga aplicada y el coeficiente de Poisson definido el valor del módulo. Según el MANUAL DE ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, CAMINOS Y PUENTES CR-2010 el módulo resiliente retenido a los 25 grados será al menos de 5000 MPa (luego del acondicionamiento).

En el Cuadro 2, se resumen parámetros incluidos en el CR-2010, para los ensayos incluidos en el trabajo.

CUADRO 2. PARÁMETROS ESTABLECIDOS DE ALGUNOS ENSAYOS EN EL MANUAL DE ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, CAMINOS Y PUENTES CR-2010

| | |
|---------------------------------------------------|--------------|
| Porcentaje de vacíos | 4% ± 1% |
| Tensión Diametral Retenida (AASHTO T283) | (>=75%) |
| Estabilidad(KN) (AASHTO T 245) | 8 mínimo |
| Flujo (mm) (AASHTO T245) | 2,75 ±0,75 |
| Relación Polvo mineral/Asfalto efectivo | de 0,8 a 1,3 |
| Módulo resiliente retenido a los 25°C (ASTM 4123) | 5 000 MPa |
| VMA | 11%-15% |
| VFA | 65%-80% |

Fuente: Recopilación del CR-2010 división 4000

Metodología

El trabajo se llevó a cabo en cuatro localidades, en la planta procesadora de mezcla asfáltica del MOPT en Siquirres, donde se recolectó el agregado y el ligante para poder recrear el diseño de mezcla en el laboratorio de materiales del MOPT, donde, además, se realizó el ensayo de tensión diametral; en el laboratorio del Instituto Tecnológico de Costa Rica se llevó a cabo el ensayo de estabilidad y flujo, y en el Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales de la UCR, LANAMME, se realizó la prueba de módulo resiliente.

En una primera parte se procedió a recolectar datos de la relación polvo/asfalto efectivo de las ofertas de los últimos 5 años en licitaciones del MOPT, para esto se fue a la oficina de archivos en el plantel central del MOPT, de ahí se sacaron las licitaciones que existían en el sistema y su respectiva relación polvo mineral/ asfalto efectivo.

Muestreo en planta

Hubo desplazamiento a la planta a recolectar agregado, de modo aleatorio, de diferentes apilamientos, se homogeneizaron y se llenaron sacos para llevar al laboratorio, bajo la práctica estándar para el muestreo de agregado AASHTO T 2. En el sitio los apilamientos se encontraban tapados con una manta algunos, otros se encontraban lavados por lluvia.

También se tomaron muestras de asfalto del tanque de almacenamiento de la planta, se colectó por medio del “ladrón”, el cual consiste en una cadena larga, con un embudo, para poder bajarlo guiándolo desde la cadena y que este se llene, y así atraerlo y sacarlo, esto llenando recipientes de aluminio.



Figura 1. Recolección de asfalto con el “ladrón”.

Análisis en laboratorio

Después de trasladar las muestras al laboratorio de materiales del MOPT, el agregado se cuarteó bajo la norma AASHTO T248, reducción de muestras de agregado a tamaño de ensayo, se lavó, y a este se le practicaron ensayos de granulometría, por vía húmeda, de abrasión e impacto con Máquina de los Ángeles, gravedad específica (Gbs) de gruesos y de finos.



Figura 2. Cuarteo de material llevado al laboratorio.



Figura 3. Ensayo de granulometría.



Figura 4. Ensayo de gravedad específica a los agregados finos



Figura 5. Gravedad específica a los agregados gruesos

Al asfalto recolectado en la planta se le realizaron ensayos de viscosidad rotacional, punto de inflamación, densidad y ductilidad.



Figura 6. Ensayo de punto de inflamación.



Figura 7. Ensayo de viscosidad rotacional.



Figura 8. Pesaje para ensayo de densidad del ligante asfáltico.

Después de tener caracterizados los materiales y compararlos con los del diseño en planta, se procedió a realizar mezcla Marshall, según diseño de planta. Se reservó una parte de esta mezcla para realizarle ensayo de gravedad específica máxima teórica; con esta misma mezcla se realizaron especímenes Marshall, los primeros de prueba para hacerlos cumplir con altura, y además comprobar el número de golpes necesarios para que cumplieran con el porcentaje de vacíos de $4\% \pm 1\%$; Cuando se comprobó cuanta cantidad de mezcla se necesitaba para cada espécimen, y cuantos golpes se requerían, se moldearon las pastillas 28 especímenes Marshall bajo la norma INTE 04-01-10-06; 4 especímenes para el ensayo de gravedad específica bruta, 12 especímenes para tensión diametral retenida, 4 especímenes para estabilidad y flujo y 8 especímenes para módulo resiliente.

Durante la realización de los ensayos de tensión diametral, módulo resiliente, y estabilidad y flujo los equipos estaban debidamente calibrados, así como los hornos, los martillos de compactación mecánicos presentaban problemas en la pesa de soporte y en el contador automático.



Figura 9. Preparación de pesos para elaboración de mezcla asfáltica



Figura 10. Preparación de pesos y moldes para la elaboración de mezcla asfáltica y pastillas Marshall



Figura 11. Pesaje del asfalto para la elaboración de mezcla asfáltica.



Figura 12. Mezclado de agregado y asfalto.



Figura 13. Cuarteo de la mezcla asfáltica elaborada en laboratorio, para posterior pesaje para elaboración de pastillas Marshall.



Figura 14. Pesos para elaboración de pastillas Marshall.



Figura 15. Compactador mecánico Marshall.



Figura 16. Pastillas Marshall desmoldadas.

Después de esto, se cambió el parámetro de la relación polvo minera/asfalto efectivo; y se realizó mezcla con dos parámetros diferentes; seguido de esto se efectuó el mismo procedimiento anterior.

A cada una de las mezclas con diferente parámetro de polvo asfalto efectivo, se les realizó el ensayo de gravedad específica máxima teoría, a 4 pastillas de cada mezcla se le efectuó el ensayo de gravedad específica bruta; con este se comprobó el porcentaje de vacíos de cada una. En el laboratorio del MOPT, también se realizó el ensayo de tensión diametral retenida, éste con 4 especímenes secos, 4 acondicionados a 24 horas y 4 acondicionados a 48 horas.

Ensayo de gravead específica máxima teórica (INTE 04-01-03-05)

Se separaron dos muestras de la mezcla suelta, se curaron y secaron en el horno por dos horas, se enfrió la mezcla a temperatura ambiente y luego se colocó en el contenedor calibrado y previamente tarado, luego de esto se agregó agua hasta cubrir la mezcla, se removió el aire atrapado con la aplicación de presión de vacío, se termina de llenar de agua hasta el calibrado del contenedor y se pesa la muestra respectiva, la gravedad específica máxima teórica se saca por la diferencia de la masa del espécimen seco dividido entre la masa del espécimen seco menos la masa del contenedor lleno de agua más el espécimen menos la masa del contenedor.

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

A= Masa de la muestra seca
B=Masa del contenedor calibrado
C=Masa del contenedor+muestra+agua+tapa

Seguido de esto se saca la muestra del contenedor, se traslada a una bandeja y se deja secar a temperatura ambiente; después de esto se pesa, 15 minutos después se vuelve a pesar su diferencia de la primera masa menos la segunda, dividido entre la primera, no deberá ser mayor a 0.05; esto para garantizar una precisión aceptable.

Ensayo de gravead específica bruta de mezclas asfálticas compactadas (INTE 04-01-01-04)

Se pesaron 4 especímenes en estado seco, se sumergieron en agua a 25°C por 4 minutos y se registró la masa sumergida, luego de esto se secó lo más posible el espécimen con una toalla húmeda y se pesó una tercera vez.

Cada especie de ensayo se sumergió y pesó individualmente.

La gravedad específica bruta se calcula:

$$Gbs = \frac{A}{B - C}$$

A= Masa del espécimen seco
B=Masa del espécimen en condición saturada con superficie seca
C=Masa del espécimen sumergido

Porcentaje de vacíos de aire (INTE 04-01-04-05)

Para el porcentaje de vacíos de aire en una mezcla asfáltica compactada, se debe calcular primero la gravedad máxima teoría y la gravedad específica bruta de la mezcla compactada como se describen en las normas anteriores, ya con estos datos se obtiene el porcentaje de vacíos de aire de la siguiente manera.

$$\%V = 100 * \left(1 - \frac{Gbs}{Gmm} \right)$$

Ensayo de tensión diametral (INTE 04-01-05-05)

Para este ensayo se tomaron 12 especímenes de pastillas por mezcla y a estas se les practico el ensayo de gravedad específica bruta, con los resultados del porcentaje de vacíos se agruparon en tres cuartetos respectivamente; uno de ellos serían las pastillas secas, otro las saturadas a 24 horas, y otras las saturadas a 48 horas, a pesar de

que este ensayo solo se mide a 24 horas, se tomó la decisión de saturarlas a 48 horas para medir en condiciones extremas. A los especímenes se les midió el espesor y el diámetro, a los especímenes secos, después de esto se les aplicó carga con la muela como se ve en la imagen 18, y se le calculó la carga a la que resistían, con estos datos ya se calculó la tensión diametral; a los especímenes que debían saturarse se les pre acondicionó saturándolos al vacío y asegurándose de que la saturación se encontrara entre 70% y 80%, ya que si el grado de saturación era menor a 70% se debía repetir el procedimiento de colocarlo en el contenedor para aplicar vacío. Una vez estos saturados, se colocaron en un baño con agua potable a 60 grados Celsius por 24 y 48 horas respectivamente, seguido se fallaron, y se calculó la tensión diametral. Teniendo los resultados de las muestras secas y las muestras acondicionadas. Se determinó la razón de tensión diametral, valor que se comparó con el del CR-2010.

Después de realizados los ensayos en el laboratorio del MOPT, se trasladaron las pastillas respectivas de cada mezcla al laboratorio del TEC, y con ayuda del técnico Heiner Navarro Mena se realizó la prueba de estabilidad y flujo a las muestras de las 3 respectivas mezclas.

Ensayo de estabilidad y flujo Marshall (INTE 04-01-11-06)

Los especímenes de ensayo para esta prueba fueron elaborados por la autora en el laboratorio del MOPT, se elaboraron 4 especímenes por mezcla para este ensayo, se les practicaron ensayos de gravedad y se midieron alturas de cada espécimen, se acondicionaron para el ensayo sumergiéndolos en un baño maría durante 30-40 minutos, a 60 grados Celsius, los especímenes se fueron sacando uno a uno para su colocación en las muelas como se muestra en la imagen número 19, seguidamente se fallan, y se toman los datos segundo a segundo para poder determinar la estabilidad y el flujo, los cuales se alcanzan cuando la tasa de deformación constante empieza a disminuir, esto se ve evidente en los gráficos en los apéndices 4,5 y 6 presentes en este informe.

Ensayo de Modulo Resiliente (ASTM 4123)

El ensayo de módulo resiliente, gracias al Director del Laboratorio de MOPT Ing. Mario Campos, logró gestionar con la Ing. Mónica Jiménez, Ingeniera del Lanamme, y por medio de ella se realizaron los ensayos respectivos de módulo resiliente, en estado seco y acondicionado a 24 horas. Este fue el único ensayo que no se ejecutó por acción directa de la autora; las muestras se entregaron en recepción de muestras en el laboratorio y los resultados fueron enviados una vez concluidos. No fue factible estar presentes por requerimientos de aseguramiento de calidad del Lanamme.



Figura 17. Acondicionamiento de muestras, para ensayos acondicionados.



Figura 18. Ensayo de tensión diametral retenida de mezcla asfáltica.



Figura 19, Estabilidad y flujo Marshall

Ya con los datos, se procedió al análisis de los resultados, para lo cual inicialmente se derivó un

cuadro comparativo entre las mezclas con relación polvo mineral / asfalto efectivo de 1.0, 1.3 y 1.7. (cuadro 12) Al tener los datos y compararlos entre sí, se nota que el valor del dato del medio del porcentaje de vacíos no tiene la tendencia entre el primero (relación polvo mineral / asfalto efectivo de 1.0), y el último (relación polvo mineral / asfalto efectivo de 1.7); por recomendación y justificado mediante la teoría de ser un valor atípico que según la bibliografía probabilidad y estadísticas para ingeniería y ciencias, dice que estos son valores considerados inusuales, alejados de los demás datos, y que se considera este valor extremo como un “evento raro” se recomienda sacarlo del análisis de los datos, por lo cual no se tomara en cuenta a la hora de las conclusiones en este informe.

En la figura número 14, el grafico de puntos muestran los valores de vacíos según el valor de relación polvo mineral/ asfalto efectivo, se ve una gran distancia entre el valor de P/A=1.7 y P/A=1.3, por lo que según la teoría es un valor atípico; eso se le atribuye a que, durante el proceso de compactación de ese grupo de pastillas, la compactadora mecánica empezó a fallar, también, durante el pesaje de asfalto, la balanza empezó a oscilar muy constantemente por el paso de trenes frecuente.

El % polvo / asfalto es un parámetro que se determina mediante la fórmula.

$$P/A = \frac{\% \text{ pasando N200}}{\% \text{ Asfalto efectivo}}$$

Resultados

Revisión Bibliográfica de licitaciones

Los resultados de la revisión bibliográfica de las ofertas que se tenían en el MOPT de los últimos cinco años se resumen en las siguientes figuras. Los resultados son individuales de cada contratista en los diferentes periodos.

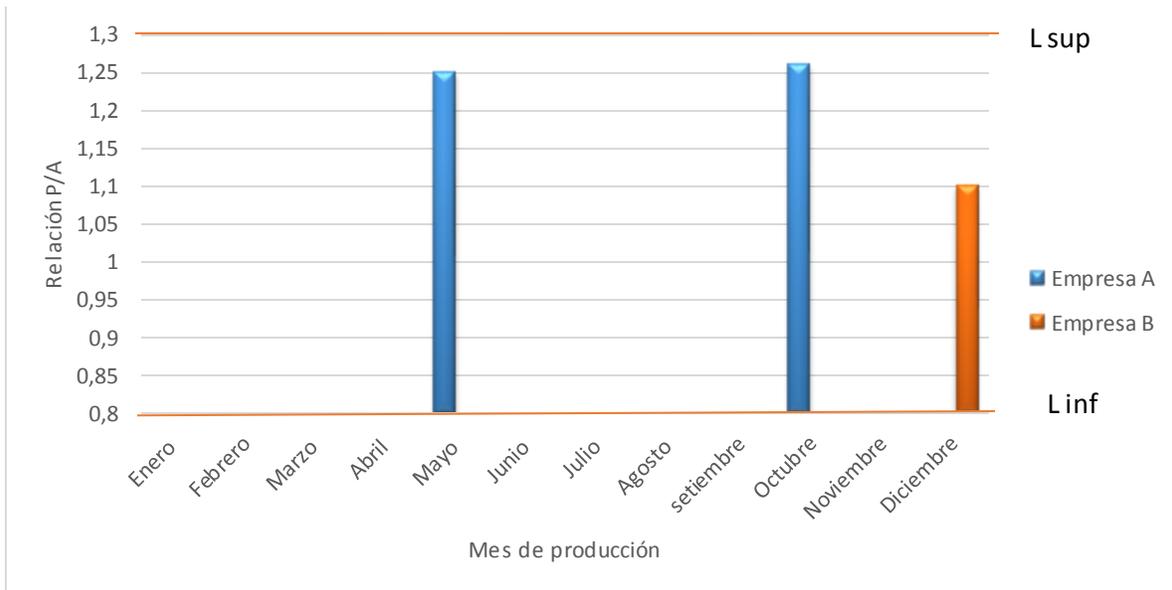


Figura N20: Relación polvo mineral /asfalto efectivo de los oferentes en licitaciones del año 2011

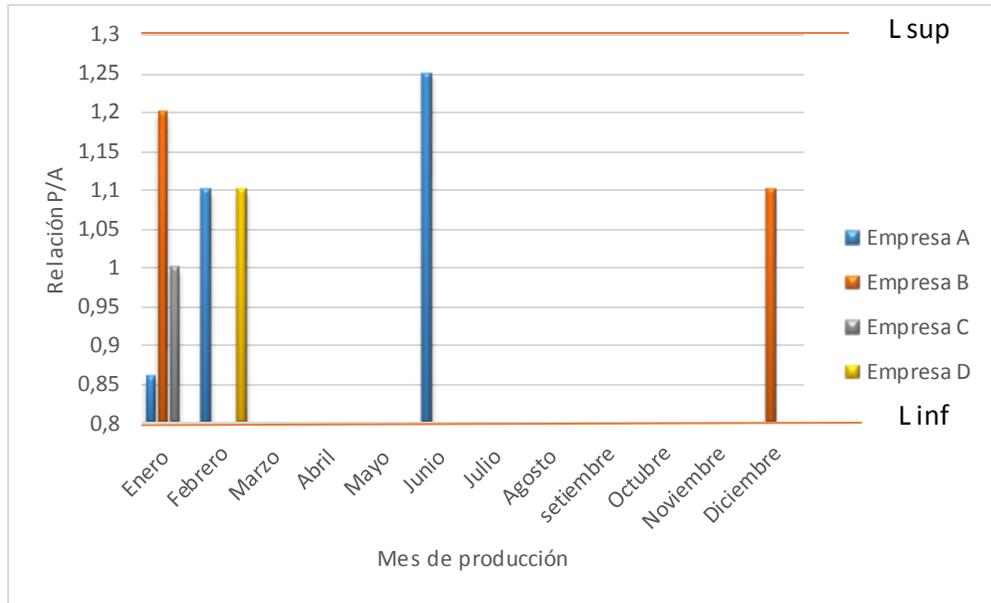


Figura N21: Relación polvo mineral/asfalto efectivo de los oferentes en licitaciones del año 2012

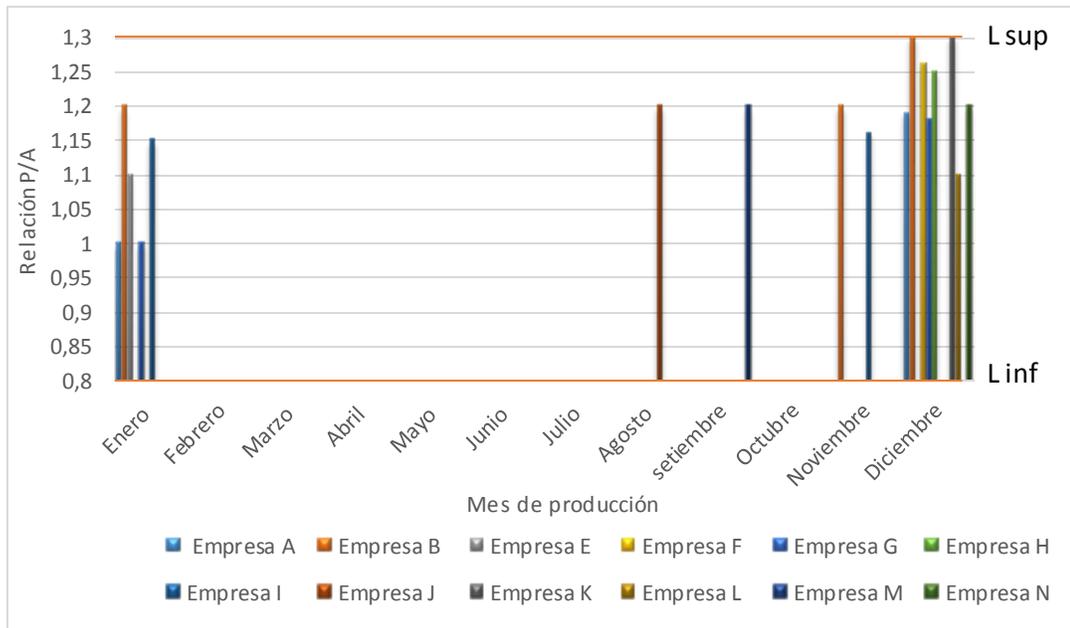


Figura N22: Relación polvo mineral /asfalto efectivo de los oferentes en licitaciones del año 2013

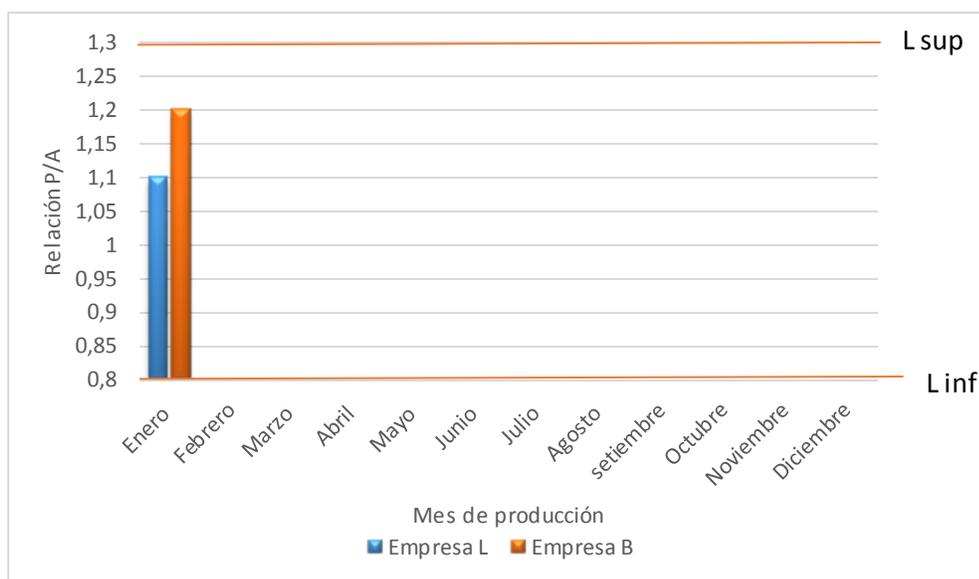


Figura N23: Relación polvo mineral /asfalto efectivo de los oferentes en licitaciones del año 2014

Ensayos realizados

como los cuadros 6 y 7 son comparaciones de las mismas pruebas con los resultados en el diseño de mezcla original.

Ensayos al agregado

Se tomaron dos muestras y se les realizó análisis granulométrico del material recolectado en la planta; luego se promediaron (apéndice 4).

Se realizó el ensayo para determinar la resistencia a la degradación del agregado grueso, gravedad específica del agregado grueso, y del agregado fino (apéndice 5, 6 y 7). Cada uno de estos ensayos se realizó al menos dos veces, para una mayor representatividad.

El cuadro 3 representa la comparación entre la granulometría original, en el diseño de mezcla actual, y la granulometría del ensayo granulométrico efectuado en el laboratorio con el material recolectado en planta. Los cuadros 4 y 5, representan el resumen de los ensayos realizados al material recolectado en la planta de asfalto en Siquirres del agregado grueso y fino respectivamente, así

| CUADRO 3. GRANULOMETRIA DE LABORATORIO VRS GRANULOMETRIA DE DISEÑO | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------|------------|-----------------------|
| Tamiz | % Pasando Laboratorio | % Pasando Diseño | Diferencia | Tolerancias de diseño |
| 1" (25,00mm) | 100 | 100 | - | 100 |
| 3/4" (19,00mm) | 100 | 100 | - | 100 |
| 1/2" (12,00mm) | 99 | 93 | 6 | 90-98 |
| 3/8" (9,500mm) | 93 | 85 | 8 | 80-90 |
| No.4(4,750mm) | 64 | 49 | 15 | 45-53 |
| No.8(2,360mm) | 45 | 33 | 12 | 29-37 |
| No.16(1,180mm) | 31 | 23 | 8 | 19-26 |
| No.30(0.600mm) | 23 | 16 | 7 | 12-19 |
| No.50(0,300mm) | 18 | 12 | 6 | 8-16 |
| No.200(0,075mm) | 10 | 6 | 4 | 4.5-8.0 |

| CUADRO 4. RESUMEN DE PRUEBAS AL AGREGADO GRUESO REALIZADAS EN LABORATORIO | |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Ensayo | Valor |
| Gravedad especifica bruta (AASHTO T85) | 2,686 |
| % absorción (AASHTO T85) | 2,02% |
| Perdida pro abrasión en agregado grueso (AASHTO T96) | 24,87% |

| CUADRO 5. RESUMEN DE PRUEBAS AL AGREGADO FINO EN LABORATORIO | |
|---------------------------------------------------------------------|-------|
| Ensayo | Valor |
| Gravedad especifica bruta (AASHTO T84) | 2,479 |
| % absorción (AASHTO T84) | 4,76% |

| CUADRO 6. RESUMEN DE PRUEBAS AL AGREGADO GRUESO EN DISEÑO DE MEZCLA ORIGINAL VRS LAS REALIZADAS EN LABORATORIO | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Ensayo | Original en diseño de mezcla | Realizadas en laboratorio |
| Gravedad especifica bruta | 2,685 | 2,686 |
| % absorción | 1,75% | 2,02% |
| Perdida pro abrasión en agregado grueso | 18,80% | 24,87% |

CUADRO 7. RESUMEN DE PRUEBAS AL AGREGADO FINO EN DISEÑO DE MEZCLA ORIGINAL VRS LAS REALIZADAS EN LABORATORIO

| Ensayo | Original en diseño de mezcla | Realizadas en laboratorio |
|---------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Gravedad específica bruta | 2,642 | 2,479 |
| % absorción | 2,46% | 4,76% |

Ensayos al ligante

Se le practicaron ensayos de rutina al ligante asfáltico, esto para poder compararlos con los que constan en el diseño de mezcla de planta.

En el cuadro 8 se muestra una comparación entre las pruebas realizadas al ligante recolectado en la planta y el ligante adjunto en la boleta en el diseño de mezcla original.

En los apéndices 8, 9, 10 y 11, se encuentran los cuadros con los datos de las respectivas pruebas.

CUADRO 8. RESUMEN DE PRUEBAS AL CONCRETO ASFALTICO EN DISEÑO DE MEZCLA ORIGINAL VRS LAS REALIZADAS EN LABORATORIO

| Ensayo | Original en diseño de mezcla | Realizadas en laboratorio |
|------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Densidad(Kg/m ³) | 1033,0 | 1032,02 |
| Ductilidad(cm) | 65 | +100 |
| Punto de inflamación(°C) | 260 | 269 |
| Viscosidad rotacional(poise) | 3,00 | 5,42 |

Ensayos realizados a la mezcla asfáltica

Relación polvo / asfalto efectivo de 1.0

En esta mezcla se construyó con la granulometría del diseño de mezcla original de la planta, con los agregados recolectados en ésta y respetando el porcentaje de asfalto del diseño de mezcla original.

En el cuadro 9, se muestra en una tabla los resultados de los ensayos principales realizados en esta mezcla, en los apéndices del 12 al 18, se encuentra detallado los valores obtenidos en cada uno de los ensayos.

También se muestra en la figura número 6, el comportamiento que tuvieron los especímenes respectivos a la hora de realizar el ensayo de estabilidad y flujo. Y en la figura número 7 y 8 se muestra el comportamiento a las muestras a cada temperatura realizado en el ensayo de módulo resiliente para las muestras en estado seco y acondicionado respectivamente.

| CUADRO 9. TABLA RESUMEN DE ENSAYOS EFECTUADOS CON MEZCLA ASFALTICA CON RELACION POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.0 | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Relación Polvo/Asfalto efectivo | 1.0 |
| Porcentaje pasando tamiz No.200 | 6,2 |
| Porcentaje de vacíos | 6,30% |
| Porcentaje a la tensión diametral a las 24 h | 76% |
| Porcentaje a la tensión diametral a las 48 h | 69% |
| Estabilidad (KN) | 11,71 |
| Flujo (mm) | 3,00 |
| Módulo Resiliente 25* (MPa) | 4992 |
| %VMA | 23,47% |
| %VFA | 65,88% |

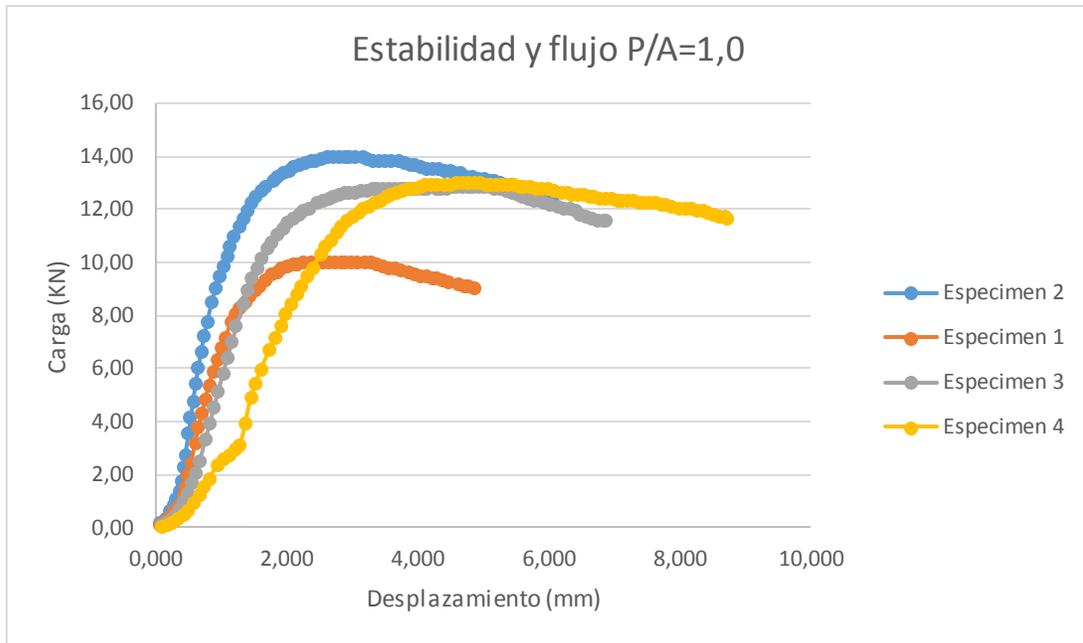


Figura N24. Comportamiento de los especímenes en ensayo estabilidad y flujo con especímenes de relación polvo/asfalto efectivo de 1,0

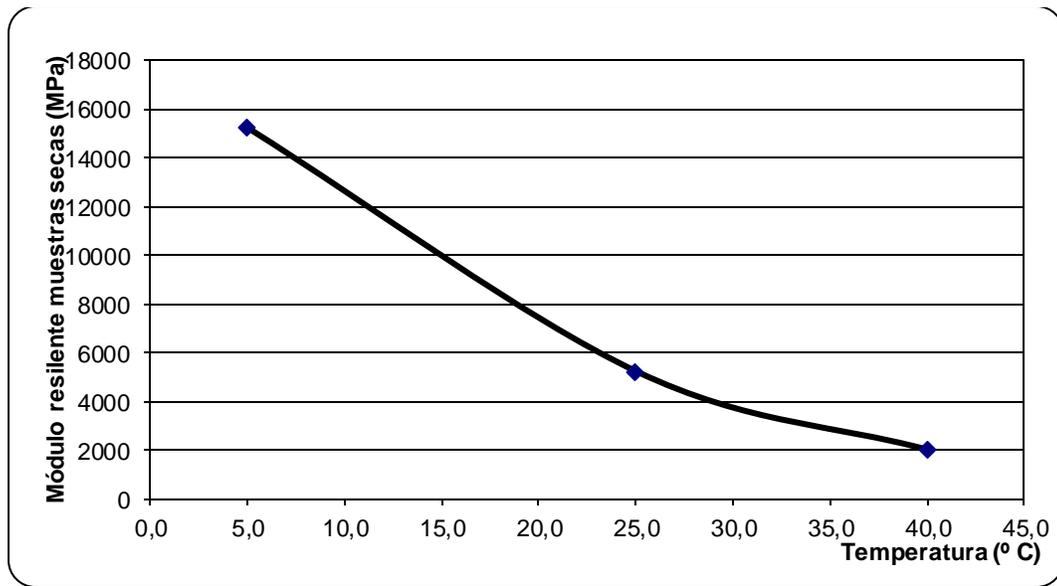


Figura N25. Comportamiento del módulo resiliente en muestras secas en función de la temperatura para relación polvo/asfalto efectivo de 1.0

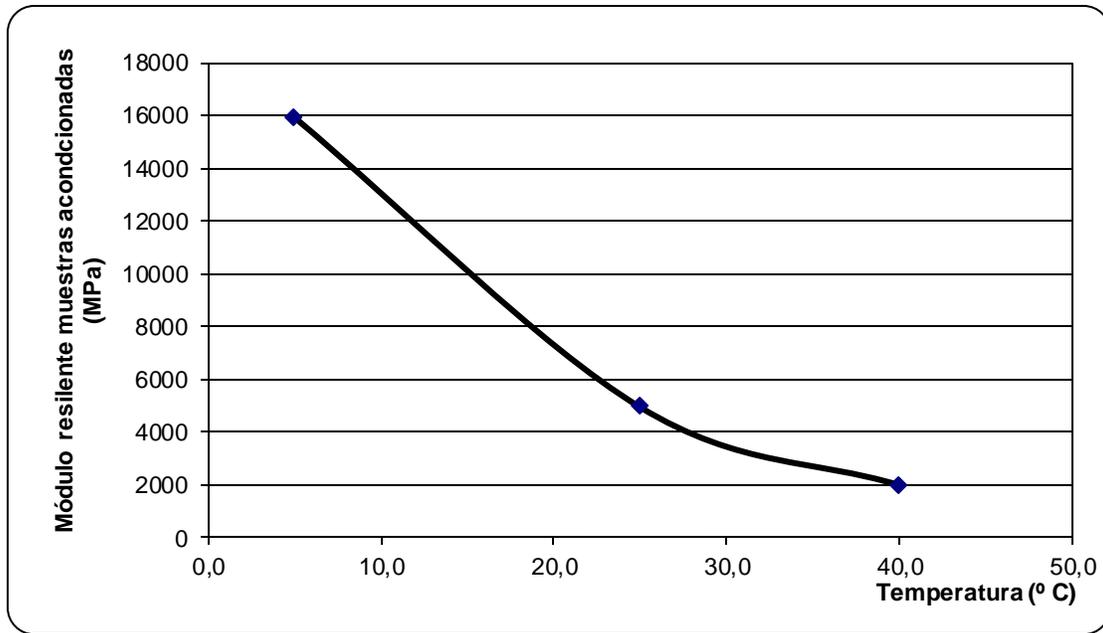


Figura N26. Comportamiento del módulo resiliente en muestras acondicionadas en función de la temperatura para relación polvo/asfalto efectivo de 1.0

Relación polvo/ asfalto efectivo de 1.3.

Esta mezcla se construyó con la granulometría del diseño de mezcla original de la planta excepto en el porcentaje de agregado pasando el tamiz No.200, con los agregados recolectados en esta y respetando el porcentaje de asfalto del diseño de mezcla original, la diferencia de esta con la anterior (la del punto A) fue que el porcentaje pasando el tamiz N200 es de 7,93% en vez de 6,2%, para una relación polvo / asfalto efectivo de 1.3.

En los apéndices del 19 al 31 se encuentran los valores de cada ensayo respectivamente realizados a esta mezcla; resumidos estos en el cuadro número 10.

También la figura número 9, muestra el comportamiento de los especímenes ante el ensayo de estabilidad y flujo; en las figuras 10 y 11 se muestra el comportamiento a las muestras a cada

temperatura realizadas en el ensayo de módulo resiliente para las muestras en estado seco y las acondicionadas respectivamente.

| CUADRO 10. TABLA RESUMEN DE ENSAYOS EFECTUADOS CON MEZCLA ASFALTICA CON RELACION POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.3 | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Relación Polvo/Asfalto efectivo | 1,3 |
| Porcentaje pasando tamiz No.200 | 7,93 |
| Porcentaje de vacíos | 11,47% |
| Porcentaje a la tensión diametral a las 24 h | 80% |
| Porcentaje a la tensión diametral a las 48 h | 73% |
| Estabilidad (KN) | 11,93 |
| Flujo (mm) | 3,55 |
| Módulo Resilente 25* (MPa) | 5193 |
| %VMA | 23.47 |
| %VFA | 51.13 |

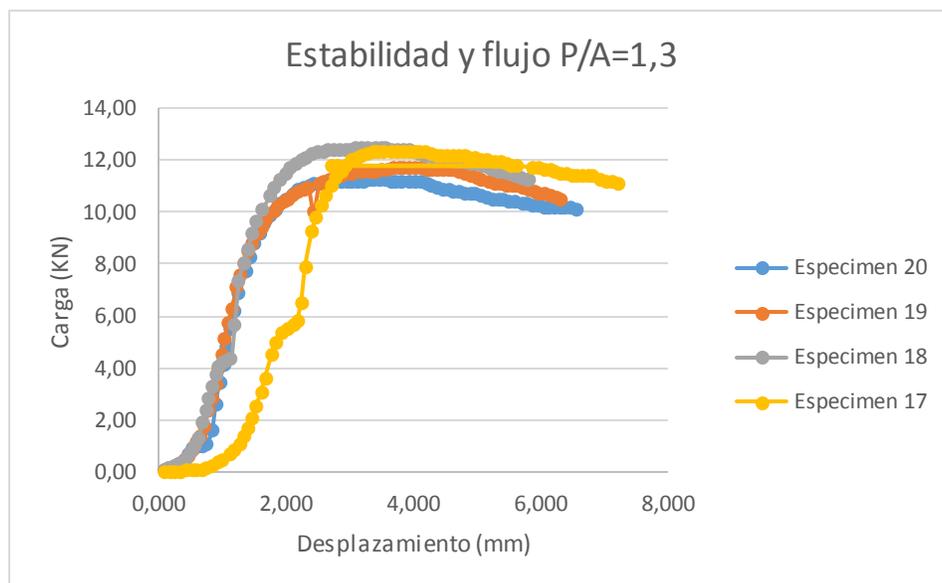


Figura N27. Comportamiento de los especímenes en ensayo estabilidad y flujo con especímenes de relación polvo/asfalto efectivo de 1.3

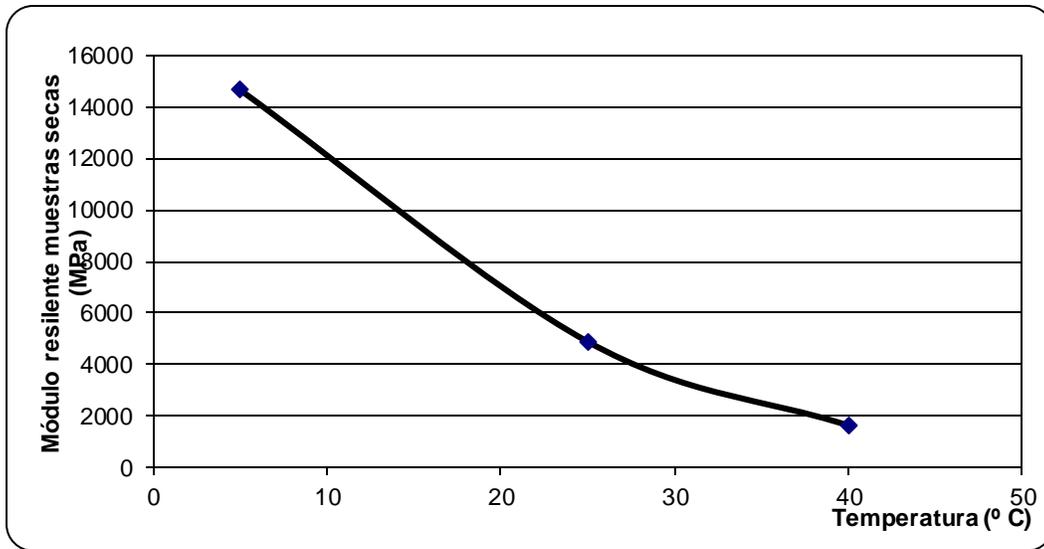


Figura N28. Comportamiento del módulo resiliente en muestras secas en función de la temperatura para relación polvo/asfalto efectivo de 1.3

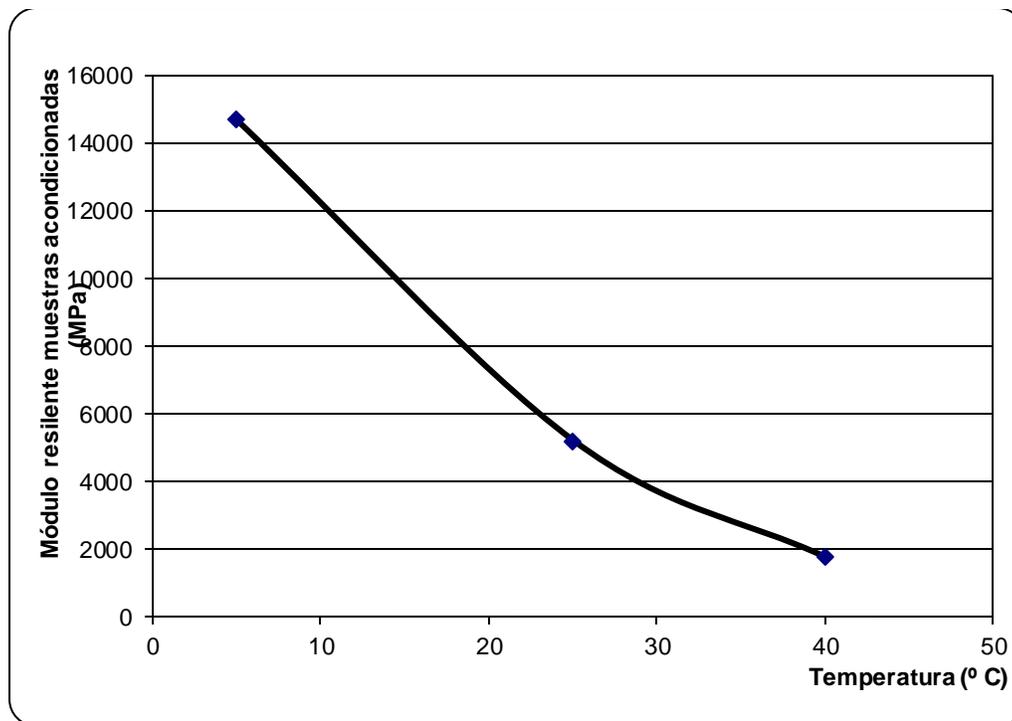


Figura N29. Comportamiento del módulo resiliente en muestras acondicionadas en función de la temperatura para relación polvo/asfalto efectivo de 1.3

C. Relación polvo / asfalto efectivo de 1.7.

En esta mezcla se construyó con la granulometría del diseño de mezcla original de la planta excepto en cuanto al porcentaje de agregado pasando el tamiz No.200, también se respetó el porcentaje de asfalto del diseño de mezcla original; el porcentaje pasando el tamiz N200 para esta es de 10,4%, para alcanzar una relación polvo mineral /asfalto efectivo de 1.7.

En la figura número 12, se muestra la tendencia de las muestras en el ensayo de estabilidad y flujo.

En las figuras 13 y 14, se muestra el comportamiento de los especímenes secos y acondicionados en el ensayo de módulo resiliente a las diferentes temperaturas de ensayo.

En los apéndices del 26 al 33, se encuentran los valores de cada ensayo resumidos aquí en el cuadro número 11.

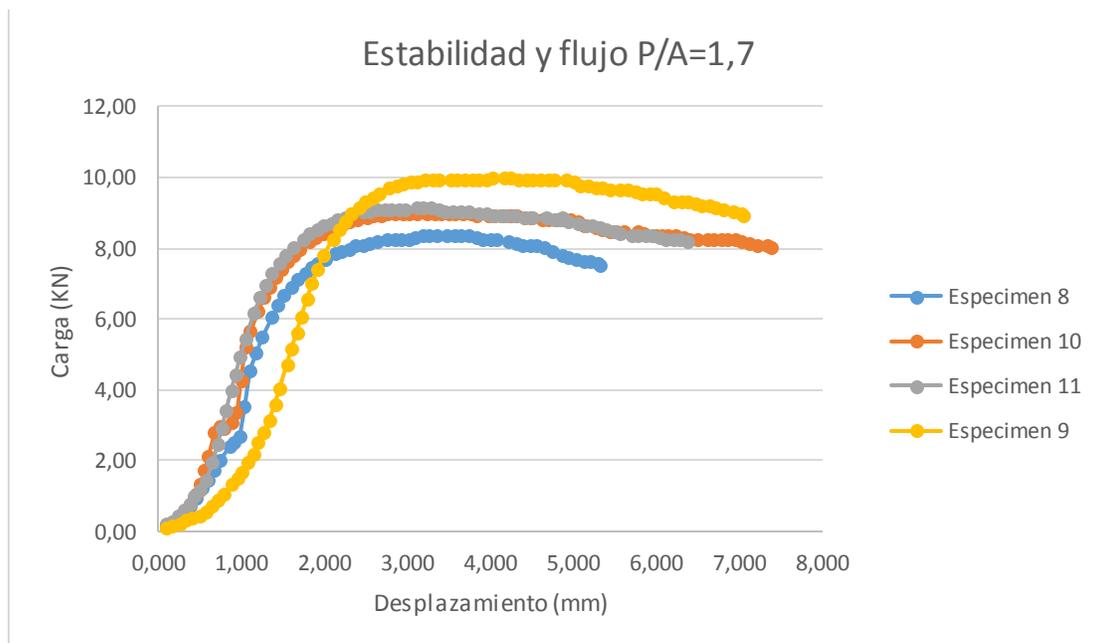


Figura N30. Comportamiento de los especímenes en ensayo estabilidad y flujo con especímenes de relación polvo/asfalto efectivo de 1,7.

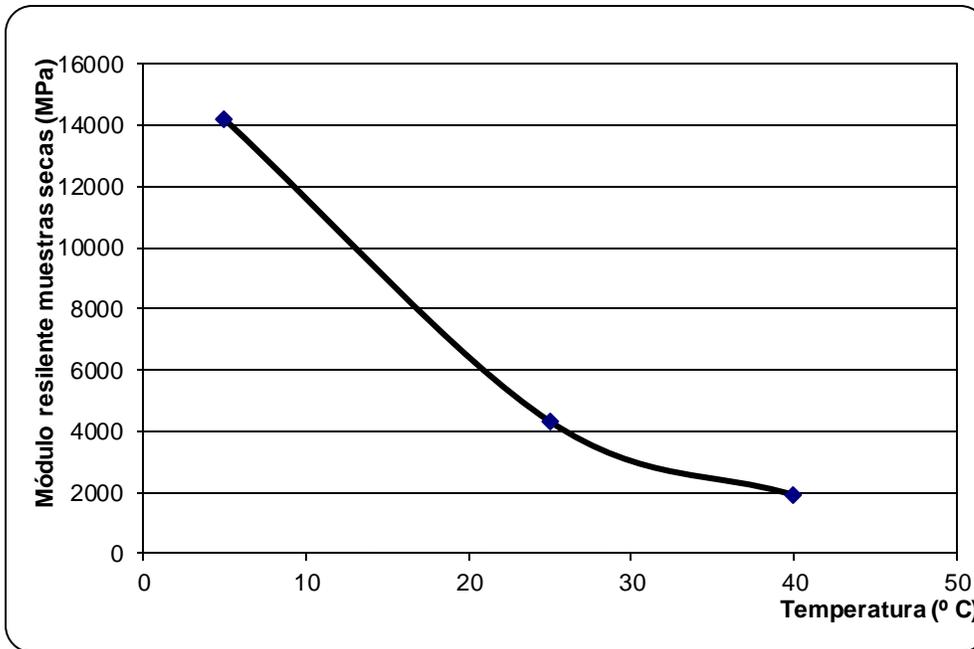


Figura N31. Comportamiento del módulo resiliente en muestras secas en función de la temperatura para relación polvo/asfalto efectivo de 1.7

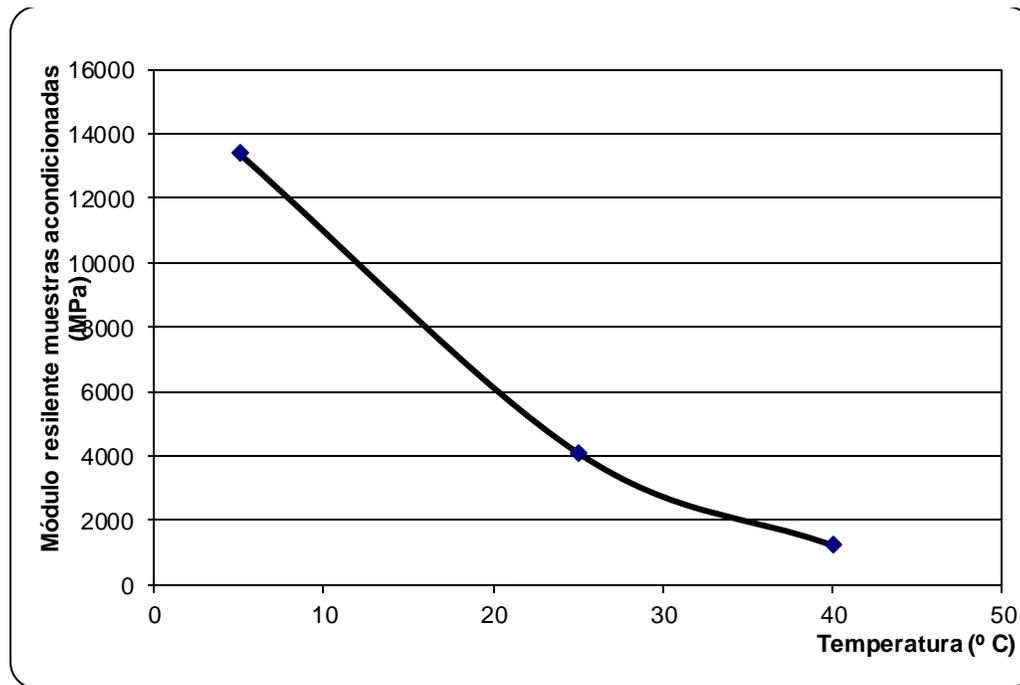


Figura N32. Comportamiento del módulo resiliente en muestras acondicionadas en función de la temperatura para relación polvo/asfalto efectivo de 1.7

| CUADRO 11. TABLA RESUMEN DE ENSAYOS EFECTUADOS CON MEZCLA ASFALTICA CON RELACION POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.7 | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Relación Polvo/Asfalto efectivo | 1,7 |
| Porcentaje pasando tamiz No.200 | 10,4 |
| Porcentaje de vacíos | 4,69% |
| Porcentaje a la tensión diametral a las 24 h | 66% |
| Porcentaje a la tensión diametral a las 48 h | 51% |
| Estabilidad (KN) | 9,07 |
| Flujo (mm) | 3,31 |
| Módulo Resilente 25* (MPa) | 4074 |
| %VMA | 17.90% |
| %VFA | 73.82% |

| CUADRO 12. TABLA RESUMEN DE ENSAYOS EFECTUADOS | | | |
|-------------------------------------------------------|-------|--------|-------|
| Relación Polvo/Asfalto efectivo | 1 | 1,3 | 1,7 |
| Porcentaje pasando tamiz No.200(%) | 6,2 | 7,93 | 10,4 |
| Porcentaje de vacíos (%) | 6,30% | 11,47% | 4,69% |
| Porcentaje a la tensión diametral a las 24 h (%) | 76% | 80% | 66% |
| Porcentaje a la tensión diametral a las 48 h (%) | 69% | 73% | 51% |
| Estabilidad (KN) | 11,71 | 11,93 | 9,07 |
| Flujo (mm) | 3,00 | 3,55 | 3,31 |
| Módulo Resilente 25* (MPa) | 4992 | 5193 | 4074 |

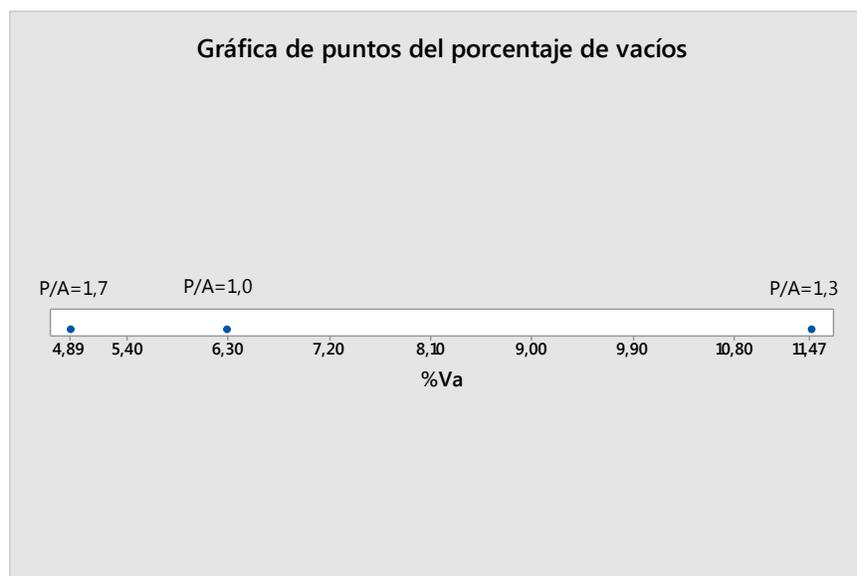


Figura N33. Grafica de puntos del porcentaje de vacíos para cada mezcla con relación polvo mineral/asfalto efectivo.

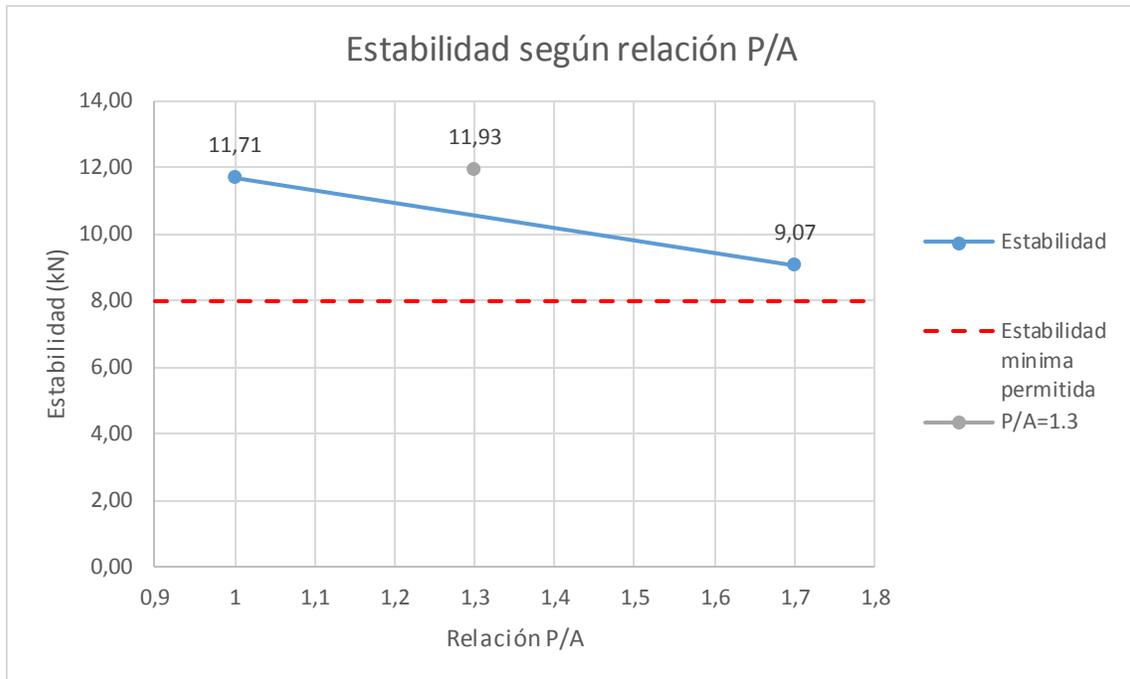


Figura N34. Estabilidad alcanzada para cada mezcla con relación polvo/asfalto efectivo de 1, 1.3 y 1.7

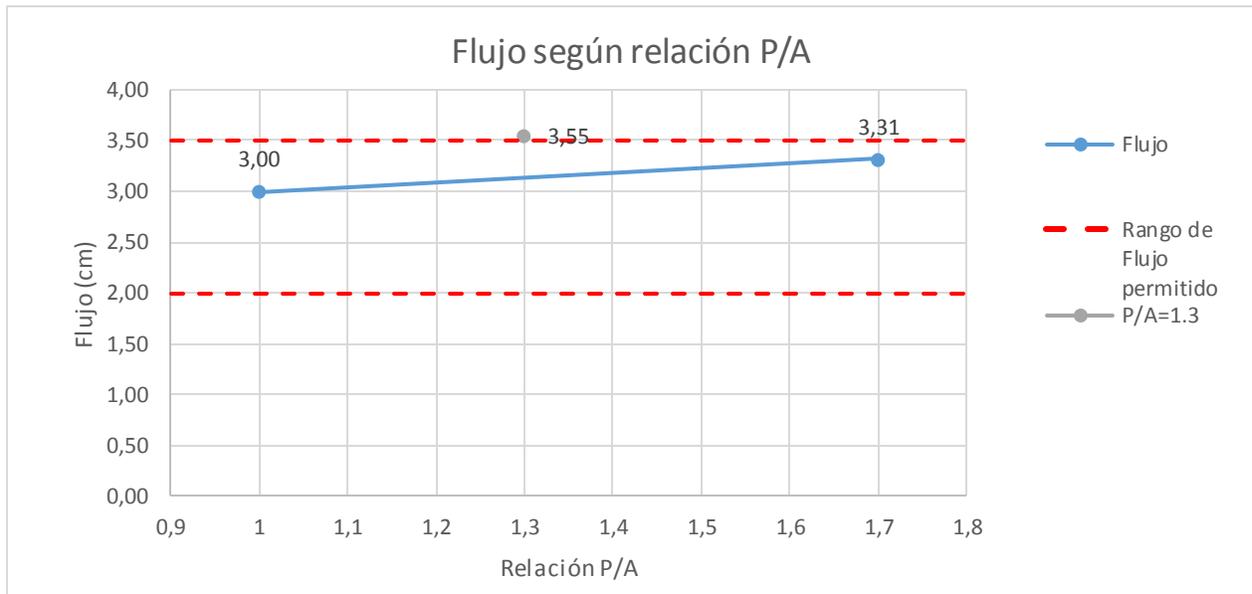


Figura N35. Flujo alcanzado para cada mezcla con relación polvo/asfalto efectivo de 1, 1.3 y 1.7

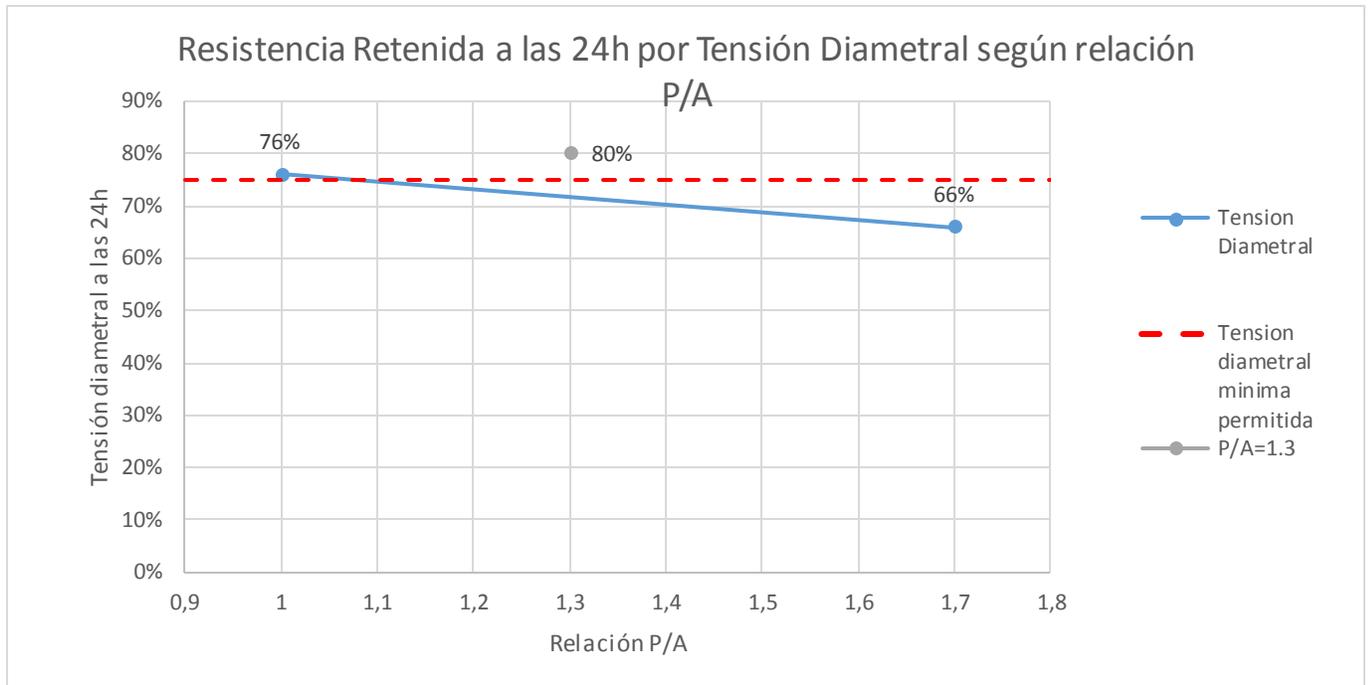


Figura N36. Resistencia a la tensión diametral retenida a las 24 horas para cada mezcla con relación polvo/asfalto efectivo de 1, 1.3 y 1.7

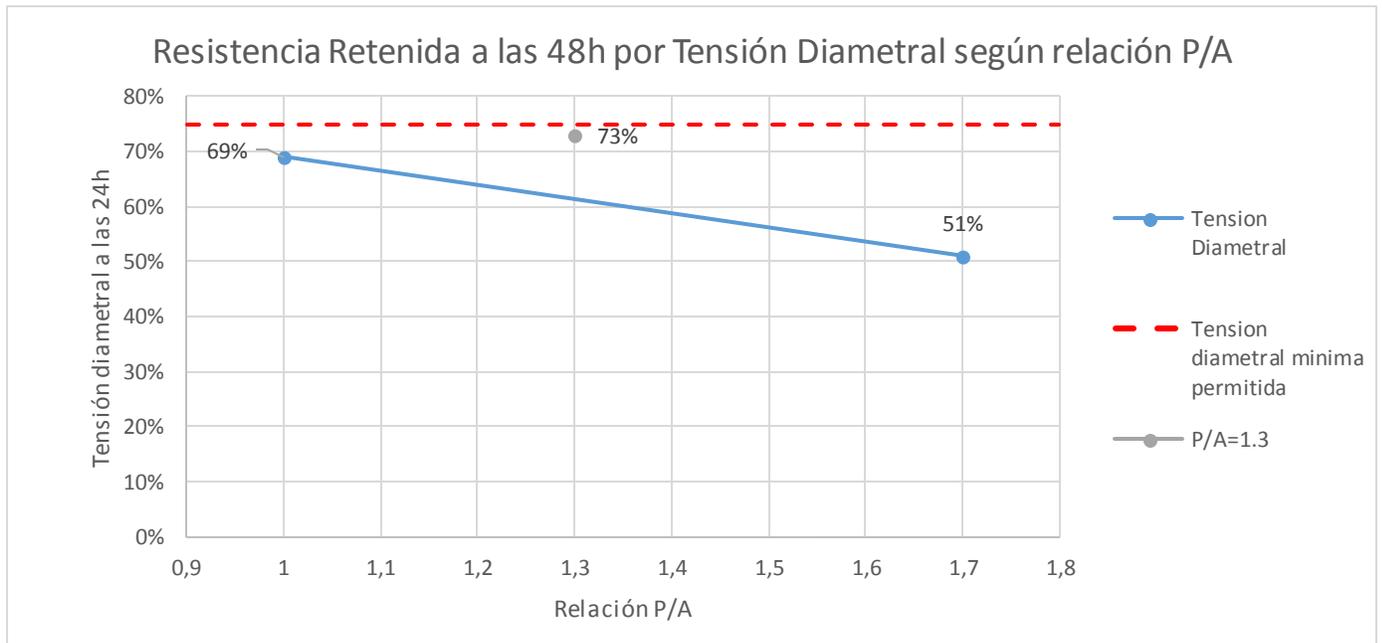


Figura N37. Resistencia a la tensión diametral retenida a las 48 horas para cada mezcla con relación polvo/asfalto efectivo de 1, 1.3 y 1.7

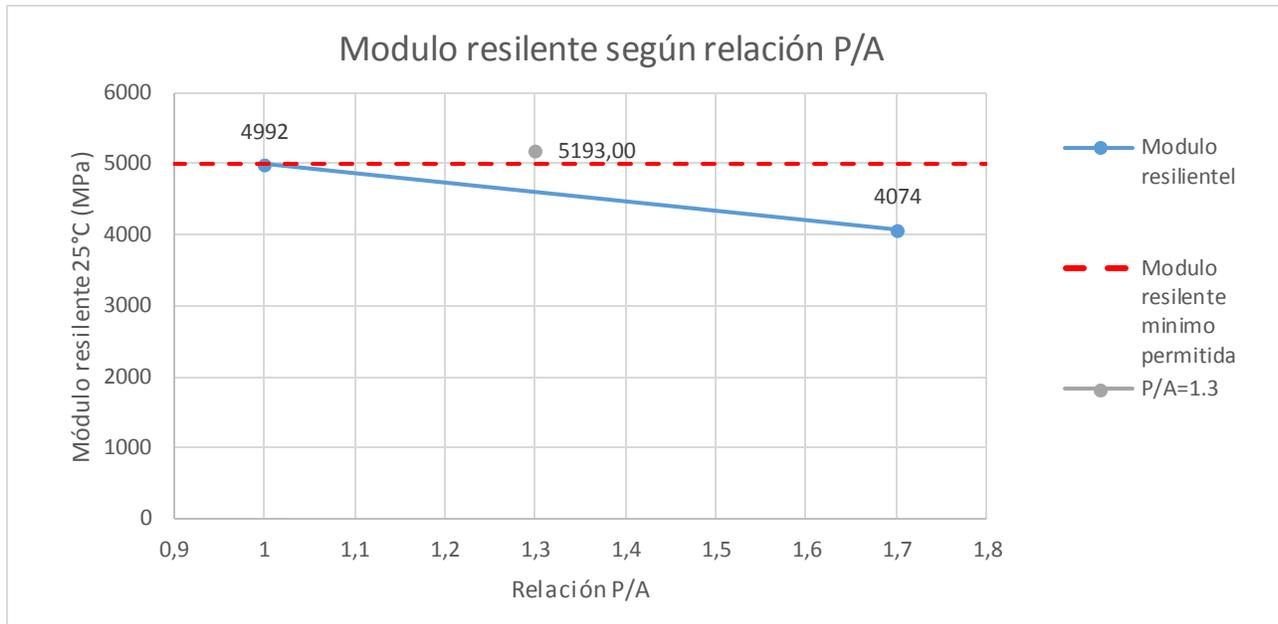


Figura N38. Módulo Resiliente para cada mezcla con relación polvo/asfalto efectivo de 1, 1.3 y 1.7

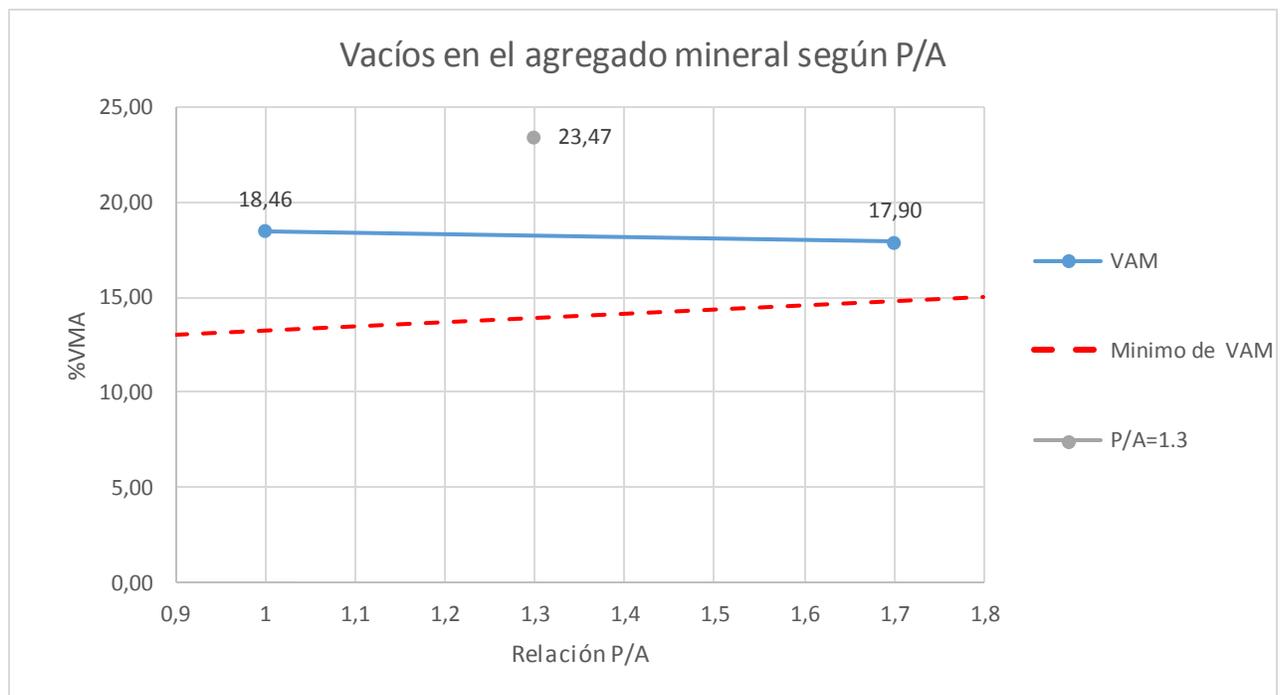


Figura N39. Vacíos en el agregado mineral para cada mezcla con relación polvo/asfalto efectivo de 1, 1.3 y 1.7

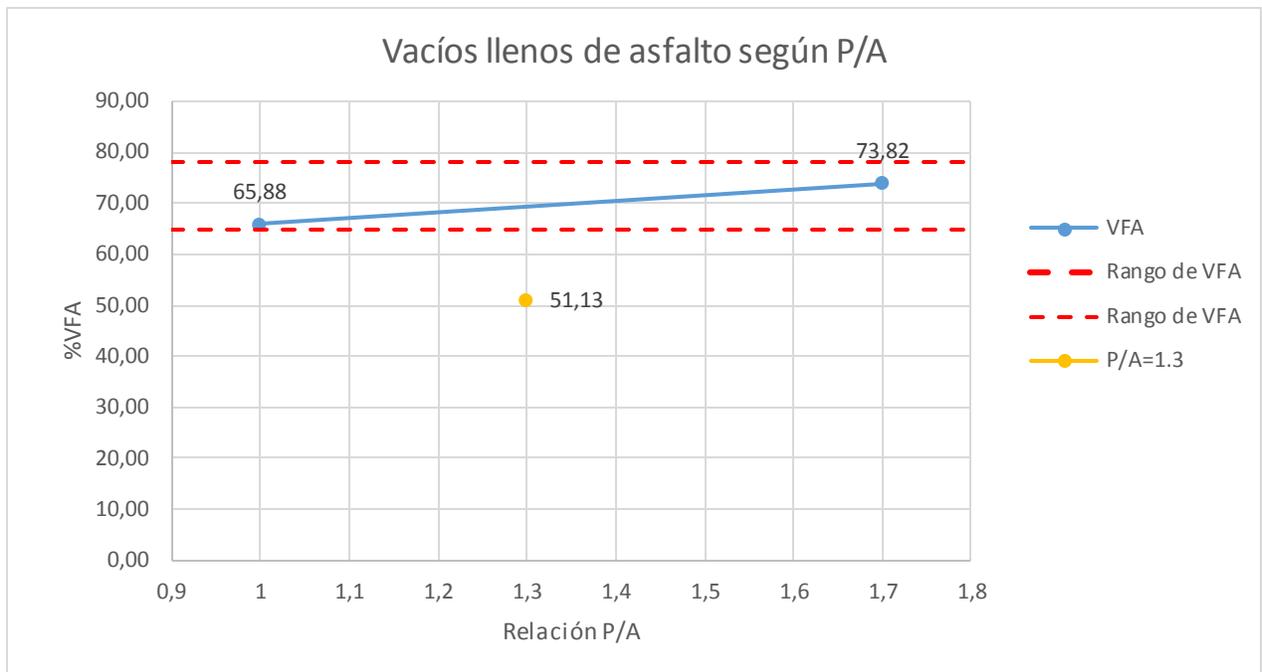


Figura N40. Vacíos llenos de asfalto para cada mezcla con relación polvo/asfalto efectivo de 1, 1.3 y 1.7

Análisis de los resultados

Documentación aportada sobre licitaciones previas por el MOPT

En cuanto a la revisión de las licitaciones aportadas por el MOPT en los últimos cinco años, se puede notar en las figuras 2 y 3 los valores de la relación polvo mineral/asfalto efectivo varían dentro del rango, alcanzando como máximo 1,25, la figura 4 alcanza el valor máximo 1,3, mientras que en la figura número 5 el valor máximo es de 1.2; los valores en general, tienden a ser máximos, siendo posible que durante el proceso productivo haya incumplimientos ya que no existe holgura para esto, además que en el proceso de producción y colocación las variables a intervenir aumentan motivo de que no se trabaja en un ambiente tan controlado como en el laboratorio.

Los datos brindados por el MOPT fueron de licitaciones que entraron, no de las que aprobaron; de igual manera, varían de empresa a empresa, y entre épocas; una premisa de la variación es que entre una y otra la fuente de los agregados es diferente.

Ensayos

Agregados.

En cuanto al agregado grueso, según el Apartado 703.07 del CR-2010, para concreto asfáltico, el agregado a utilizar debe ser piedra de buena calidad triturada, además de cumplir con ciertos parámetros; dentro de las pruebas que se realizaron puede compararse algunos de estos.

La abrasión en la máquina de los

Ángeles, AASHTO T96, indica que el porcentaje máximo de desgaste debe ser máximo un 40%, la prueba de la máquina de los Ángeles, en el agregado recolectado en planta, dio un resultado de 24,9% de pérdida por abrasión, resultando dentro de los parámetros establecidos; en el informe del diseño de mezcla que el MOPT contrato hacer a una empresa, dice que la pérdida por abrasión es del 18,8%, fundamentando una diferencia del 6,1% en cuanto a la pérdida por abrasión.

La gravedad específica y absorción del agregado grueso

realizado en laboratorio indica 2,686 en el informe del diseño de mezcla es de 2,685, teniendo variación del 0.001. El porcentaje de absorción de la prueba dio 2,02%, el diseño de mezcla indica 1,75%, la variación en este es de 0,27%; esto indica que el agregado recolectado en planta absorbe 0,27% más agua que el agregado usado para diseñar la granulometría de diseño de la mezcla original.

En cuanto al **agregado fino**, el ensayo de **gravedad específica y absorción** en el informe de la empresa aportado al MOPT es de 2,642 gravedad específica bruta, y 2,46% el porcentaje de absorción; en los ensayos realizados para este proyecto, los resultados fueron de 2,479, la gravedad específica bruta y 4,76%, el porcentaje de absorción, con esto se demuestra que los finos absorben casi el doble de lo que absorbían los finos iniciales, esto hace que la demanda de asfalto necesite aumentar, ya que el fino como se menciona anteriormente absorbe más; en cuanto a la gravedad específica bruta, se ve una diferencia de 0,163, con lo cual se estima el agregado que se suministra

actualmente difiere del agregado al que se le practicaron los ensayos inicialmente.

Ligante

Las pruebas realizadas al ligante asfáltico fueron viscosidad rotacional, densidad, punto de inflamación y ductilidad; el ligante asfáltico utilizado fue el aportado por Recope, AC-30, tomado en planta. Según la boleta de Recope adjunta en el informe de diseño de mezcla por la empresa al MOPT, los resultados a estos ensayos son: ductilidad 65 cm, densidad 1033 kg/m³, punto de inflamación 260 °C, y viscosidad rotacional 3 poise, en los ensayos realizados en laboratorio se muestran diferencias (**cuadro 8**), el punto de inflamación reportado en el ensayo realizado es de 269 °C, la ductilidad alcanzó más de 100cm, la densidad es de 1 032 kg/m³, posiblemente porque el ligante recolectado para cada uno de estos ensayos es de lotes diferentes que los que usaron en el momento de hacer el diseño de mezcla original; además, los ligantes varían en alguna medida dependiendo de cuánto tiempo ha estado en planta, ya que es posible y en el caso de que sufran procesos de envejecimiento. También según estas características se está en presencia de un asfalto con mayor viscosidad, eso quiere decir que es un asfalto más duro.

Mezcla asfáltica

Relación polvo /asfalto efectivo de 1.0

Para el diseño de mezcla empleado en la planta del MOPT de Siquirres, usando agregado integrado con los pesos del diseño de mezcla original, se obtiene una relación polvo/ asfalto efectivo de 1.0, sin embargo, empleando el apilamiento encontrado en sitio la relación polvo /asfalto efectivo alcanza 1,7. Esto quiere decir que la mezcla que está saliendo de

la planta a diario cuenta con una relación polvo/ asfalto efectivo de 1,7, ya que el material no se lava antes de procesarlo, y a simple vista puede verse muy cargado de finos.

Como resultados se tiene que los vacíos no cumplen según la norma, ya que son de 6,30%, muy por fuera del rango de 4% más menos 1%; en este primer panorama, se puede dar una idea de que esta mezcla podría tener problemas de durabilidad en cuanto a desnudamiento y compresibilidad por el alto contenido de vacíos, ya que esto favorece a que la mezcla tenga poca resistencia al paso de aire y agua por medio de ella, también será muy permeable, y favorecerá el agrietamiento. Se realizaron ensayos de durabilidad, primeramente resistencia a la tensión diametral; la normativa nacional CR-2010 menciona que para carpetas que serán usadas para capas o sobre capas asfálticas y bacheo, donde la superficie de ruedo existente consiste en concreto asfáltico, deberá cumplir con una resistencia a la tensión diametral retenida igual o mayor a 76%; en cuanto a ese ensayo, lo que se compara son los especímenes acondicionados contra los especímenes secos y de ahí se saca una relación, la norma de ensayo indica que los especímenes son saturados a 24 horas, sin embargo en el ensayo realizado se hizo con especímenes saturados a 24 horas, y con especímenes saturados a 48 horas, esto considerando las condiciones climáticas de la zona de Limón; los resultados de este fue que la resistencia a la tensión diametral, con los especímenes acondicionados a 24horas, cumplió con el 75% mínimo, ya que el resultado fue de 76%, en la figura número 17 se ve gráficamente que apenas se encuentra sobre la línea punteada cumpliendo con el mínimo; sin embargo, las pastillas acondicionadas a 48 horas no, ya que el resultado fue de 69%; con esto puede verse que la mezcla a las condiciones de la zona es susceptible al desnudamiento; sin embargo, cumple con el requerimiento mínimo de la norma.

El ensayo de estabilidad y flujo Marshall arrojó resultados conforme a la norma, en

la figura 15 y 16 se ve que se encuentran por encima de la línea punteada que indica el mínimo establecido, la estabilidad determinó 11,71 KN, y la norma indica que debe ser de al menos 8 KN; en cuanto al flujo el resultado fue de 3 mm y el CR-2010 dice que debe estar dentro del parámetro de $2,75\text{mm} \pm 0,75 \text{ mm}$; con estos parámetros según la norma, habría resistencia a la deformación plástica, ya que la trabazón del agregado y su distribución son favorables; sin embargo se debe recordar que el porcentaje de vacíos estaba muy por fuera del requerimiento.

También, se practicó, en la misma mezcla el ensayo de módulo resiliente, el valor arrojado para este ensayo fue de 4 992 MPa, el CR-2010 indica que debe de ser al menos 5 000 MPa para resistir el daño por humedad, en la figura N18 se ve gráficamente que no alcanza el mínimo establecido, esto indica que es una mezcla que no va a funcionar adecuadamente en condiciones de intemperie ni en condiciones de repetición de cargas, como es de esperar que sea el caso en la provincia del Atlántico. Se calcularon los vacíos en el agregado mineral, el resultado es un 23.47% (figura N19) muy por fuera del requerimiento, y ya que esto es un indicador del máximo grosor posible de película de ligante alrededor del agregado, se tienen muchos vacíos en el agregado, esto se corrobora con un % de vacíos alto. El VFA es el porcentaje de vacíos en el agregado mineral que realmente es asfalto efectivo, este valor es de 65%, con esto se ve que del 23.47%(figura N20) un 65% de este es asfalto efectivo, apenas cumpliendo con el mínimo.

Con esto se demuestra que, aunque se cumpla con la relación polvo / asfalto efectivo inicial de 1,0, dentro del rango de 0,8-1,3, no necesariamente cumple con parámetros volumétricos de rigor practicados en este trabajo.

Relación Polvo/asfalto efectivo de 1.3

En esta mezcla hay un 7.93% de tamiz pasando la numero 200, se ajustó para obtener la relación polvo/ asfalto efectivo de 1.3 (el valor máximo admisible según CR-2010) con el mismo porcentaje de asfalto.

A esta mezcla se le practicaron los mismos ensayos que a las otras dos, el porcentaje de vacíos se disparó llegando a 11.47%, esto se le atribuye a que necesita más asfalto, ya que los finos absorben más de lo esperado, según diseño original.

La resistencia a la tensión diametral aumento alcanzando un 80% a 24horas; la estabilidad tambien aumento, en menor medida, pero alcanzo 11.93KN, se podría atribuir a que se rigidizo, aunque no se tiene evidencia física de esto; con el aumento de vacíos el flujo tambien aumento como es de esperar y alcanzo 3.55mm, que se sale del parámetro aceptado en el CR-2010, el módulo resiliente aumento a 5193MPa, quiere decir que la mezcla resiste mayor carga de repetición que la anterior, lo cual es esperable ya que la tensión diametral tambien aumento considerablemente. (Resultados cuadro número 10).

Esto quiere decir que esta mezcla a pesar de no cumplir con vacíos es un poco más resistente a cargas antes de la falla, fluye mucho y podría sufrir consolidación, sin embargo, resiste más el daño por humedad si fuera posible densificarla correctamente en campo.

Para poder crear una tendencia en este trabajo, se tomó la decisión de sacar los valores de la mezcla con relación polvo asfalto efectivo con valor de 1.3 a la hora de tomar una decisión en cuanto a las conclusiones , ya que como se evidencia en el cuadro número 14, es un valor extremo en el porcentaje de vacíos, esto atribuyéndole a esto problemas con el compactador mecánico a la hora de realizar la compactación para esta mezcla, y problemas de oscilación de la balanza a la hora de la dosificación.

En las gráficas número 15,16,17,18 y 19, se ve gráficamente que es un valor pico en todos los parámetros ensayados.

Relación Polvo / asfalto efectivo de 1,7

Esta mezcla hay un 10,4% pasando la malla número 200. Esto quiere decir que tiene más de finos que la mezcla anterior. A pesar de tener más finos, se hicieron las pruebas de gravedades, y se encontró, que el porcentaje de vacíos disminuyó y no solo eso, sino que cumplió el parámetro de $4\% \pm 1\%$; los vacíos en esta mezcla alcanzaron el 4,69%, con lo cual cumple con el parámetro de diseño Marshall. La resistencia a la tensión diametral disminuyó y alcanzó una resistencia de 66%, saliéndose del parámetro de al menos 75% (figura N17, por debajo del parámetro); esto por el aumento de finos, la falta de adherencia y la posible falta de asfalto efectivo. La estabilidad disminuyó y el flujo aumento respecto a la mezcla anterior, 9,07 KN de estabilidad (figura N15) y 3,31 mm de flujo (figura N16), esto era una posibilidad esperable, ya que, aunque aumentando los finos, se rellenaron los vacíos de la mezcla, evidentemente la mezcla es menos rígida y, por lo tanto, menos estable; se eligió asumir mayor porcentaje de agregado, pasando el tamiz Número 200, para emular la mezcla que está saliendo de la planta. El módulo resiliente de esta mezcla también disminuyó respecto a la anterior (figura N18), esto era de esperar, ya que al ser una mezcla con mayor fluidez disminuye su tensión diametral, por lo tanto, su módulo.

El VAM disminuyó (figura N19) respecto al primero, dando un 17,90% aun sin cumplir con norma, va disminuyendo conforme aumenta el % pasando la No.200, siguiendo la misma tendencia el VFA entra en norma con un 73,82% (figura N20).

Con esto puede verse que no necesariamente al cumplir con la relación

polvo / asfalto efectivo, la mezcla va a estar en cumplimiento con los parámetros de durabilidad y desempeño, ya que se observa que no tienen relación alguna; inclusive la relación con 1,7 de polvo mineral/asfalto efectivo cumple con vacíos, y ensayos de estabilidad y flujo, ensayos que las relaciones dentro del parámetro establecido que se ensayaron ($P/A=1$; $P/A=1,3$) no cumplían del todo. Así, no se considera indispensable cumplir con la relación de polvo / asfalto efectivo, sí el resto de parámetros cumplen, especialmente si se practican ensayos de desempeño para valorar el desempeño de la mezcla asfáltica.

Conclusiones

- En cuanto a las licitaciones brindadas por el MOPT los valores tienden a ser máximos, de 1,3 siendo posible que durante el proceso constructivo existan incumplimientos.
- La granulometría del agregado utilizado en planta no concuerda con la granulometría brindada en el informe de diseño de mezcla realizado para dicha planta.
- El ligante asfáltico que usan es AC-30, a pesar de eso, no concuerda con los datos del AC-30 brindados en el informe de diseño de mezcla. Es decir, el ligante asfáltico también varía respecto del informe de diseño de mezcla.
- Conforme se aumenta el %pasando la No200, hay un sellado de vacíos por lo tanto el % de vacíos disminuye, esto crea una tendencia de una mezcla más deformable y que el modulo disminuya.
- La mezcla con relación polvo / asfalto efectivo de 1,0 no cumple vacíos, ni módulo resiliente, pero sí cumple con valores mínimos de resistencia a la tensión diametral, estabilidad y flujo.
- La mezcla con relación polvo / asfalto efectivo de 1,7 cumple con porcentaje de vacíos, con estabilidad y flujo; sin embargo, incumple con la resistencia a la tensión diametral y módulo resiliente.
- El hecho de que incumpla con la relación P/A, no quiere decir que no cumpla con parámetros de desempeño y durabilidad.

Recomendaciones

- Deben valorarse condiciones de manejo de apilamientos en planta, así como la variación de fuentes de materiales.
- Se debe actualizar el diseño de mezcla de la Planta de Siquirres del MOPT, ya que no está cumpliendo actualmente con la totalidad de los parámetros mínimos de aceptación en Costa Rica.
- Se debe implementar una medida, para la medición y pesaje en el laboratorio de materiales del MOPT, ya que los equipos se ven afectados por la vibración del paso constante de trenes.
- Para darle seguimiento a este estudio, es primordial que la fuente de agregado sea coherente con la de diseño.
- En cuanto al manejo de ensayos en laboratorio y seguimiento de control de calidad de las mezclas que sale de la planta de asfalto, se debe tener un monitoreo constante y cuando se encuentre algo anómalo, corregirlo lo más pronto posible, para garantizar la calidad de mezcla en cada planta.
- Se puede implementar una época de mayor trabajo para esa planta (verano) y en invierno considerar trasladar el personal a otra, para aprovechar mejor los recursos, ya que en época de invierno permanece cerrada muchos días por lluvia.
- Si se le diera continuidad a este trabajo, caracterizar mejor el material de agregado recolectado.
- Realizar esta investigación con otra fuente de agregados.

Apéndices

Apéndice 1: Figura 1. Tendencia de vacíos según retenido en el tamiz número 200

Apéndice 2: Figura 2. Cálculo de número de golpes para realizar muestras Marshall de mezcla con relación polvo/asfalto efectivo de 1,7

Apéndice 3: Figura 3. de cálculo de número de golpes para realizar muestras Marshall de mezcla con relación polvo/asfalto efectivo de 1,3

Apéndice 4: Cuadro 1 Análisis granulométrico del agregado.

Apéndice 5: Cuadro 2. resistencia a la degradación del agregado grueso de tamaño pequeño por abrasión e impacto en la máquina de ángeles AASHTO T96 / ASTM C131

Apéndice 6: Cuadro 3. gravedad específica y absorción del agregado grueso AASHTO T85

Apéndice 7: Cuadro 4. gravedad específica y absorción del agregado Fino AASHTO T84

Apéndice 8: Cuadro 5. Viscosidad Rotacional ASTM D2170

Apéndice 9: Cuadro 6. Densidad del material bituminoso ASTM D 70-08

Apéndice 10: Cuadro 7. Punto de inflamación ASTM D 92

Apéndice 11: Cuadro 8. Ductilidad ASTM D 113-07

Apéndice 12: Cuadro 9. Gravedad específica máxima teórica de mezcla asfáltica con relación polvo/asfalto efectivo de 1.0 INTE 04-01-03-05

Apéndice 13: Cuadro 10. Gravedad Específica bruta de mezcla asfáltica con relación polvo/asfalto efectivo de 1.0 INTE 04-01-01-04

Apéndice 14: Cuadro 11. resistencia a la Tensión Diametral Retenida de mezcla asfáltica con relación polvo/asfalto efectivo de 1.0 INTE 04-01-05-05

Apéndice 15: Cuadro 12. Tensión diametral según condición de muestra para mezcla con relación polvo/asfalto efectivo de 1.0

Apéndice 16: Cuadro 13. Estabilidad y flujo Marshall de mezcla asfáltica con relación polvo/asfalto efectivo de 1.0 INTE 04-01-11-06

Apéndice 17: Cuadro 14. Módulo Resiliente de Muestras Secas de mezcla asfáltica con relación polvo/asfalto efectivo de 1.0 ASTM D4123

Apéndice 18: Cuadro 15. Módulo Resiliente de muestras acondicionadas de mezcla asfáltica con relación polvo/asfalto efectivo de 1.0 ASTM D4123

Apéndice 19: Cuadro 16. Granulometría de mezcla con relación polvo/asfalto efectivo de 1.3

Apéndice 20: Cuadro 17. Gravedad específica máxima teórica de mezcla asfáltica con relación polvo/asfalto efectivo de 1.3 INTE 04-01-03-05

Apéndice 21: Cuadro 18. Gravedad Específica bruta de mezcla asfáltica con relación polvo/asfalto efectivo de 1.3 INTE 04-01-01-04

Apéndice 22: Cuadro 19. resistencia a la Tensión Diametral Retenida de mezcla asfáltica con relación polvo/asfalto efectivo de 1.3 INTE 04-01-05-05

Apéndice 23: Cuadro 20. Tensión diametral según condición de muestra para mezcla con relación polvo/asfalto efectivo de 1.3

Apéndice 24: Cuadro 21. Estabilidad y flujo Marshall de mezcla asfáltica con relación polvo/asfalto efectivo de 1.3
INTE 04-01-11-06

Apéndice 25: Cuadro 22. Módulo Resilente de Muestras Secas DE mezcla asfáltica con relación polvo/asfalto efectivo de 1.3 ASTM D4123

Apéndice 31: Cuadro 23. Módulo Resilente de Muestras Acondicionadas DE mezcla asfáltica con relación polvo/asfalto efectivo de 1.3 ASTM D4123

Apéndice 26: Cuadro 24. Granulometría de mezcla con relación polvo/asfalto efectivo de 1.7

Apéndice 27: Cuadro 25. Gravedad específica máxima teórica de mezcla con relación polvo/asfalto efectivo de 1,7 INTE 04-01-03-05

Apéndice 28: Cuadro 26. Gravedad Específica bruta de mezcla con relación polvo/asfalto efectivo de 1.7 INTE 04-01-01-04

Apéndice 29: Cuadro 27. resistencia a la Tensión Diametral Retenida de mezcla con relación polvo/asfalto efectivo de 1.7 INTE 04-01-05-05

Apéndice 30: Cuadro 28. Tensión diametral según condición de muestra para mezcla con relación polvo/asfalto efectivo de 1.7

Apéndice 31: Cuadro 29. Estabilidad y flujo de mezcla con relación polvo/asfalto efectivo de 1.7
INTE 04-01-11-06

Apéndice 32: Cuadro 30. Módulo Resilente de Muestras Secas de mezcla con relación polvo/asfalto efectivo de 1.7 ASTM D4123

Apéndice 33: Cuadro 31. Módulo Resilente de Muestras Acondicionadas de mezcla con relación polvo/asfalto efectivo de 1.7 ASTM D4123

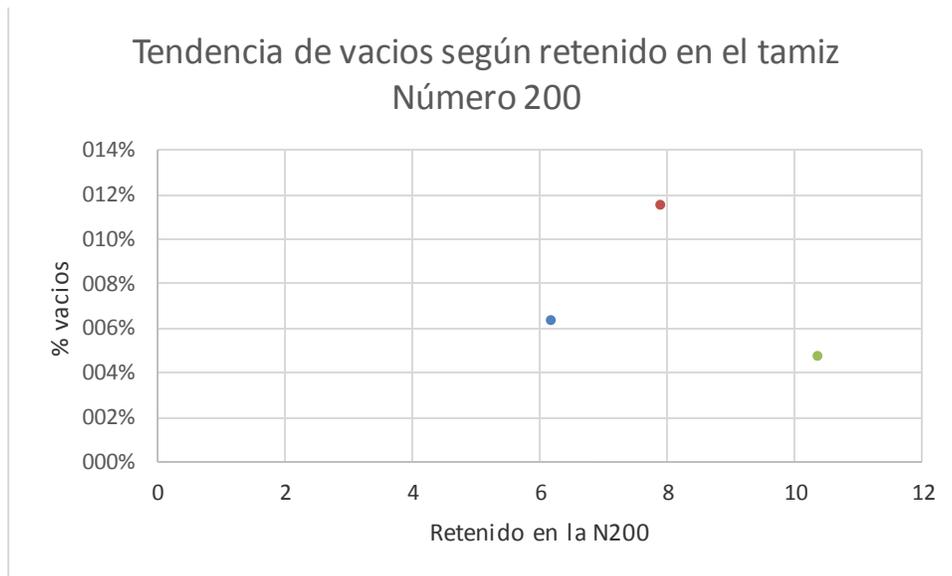


Figura 1. Tendencia de vacíos según retenido en el tamiz número 200

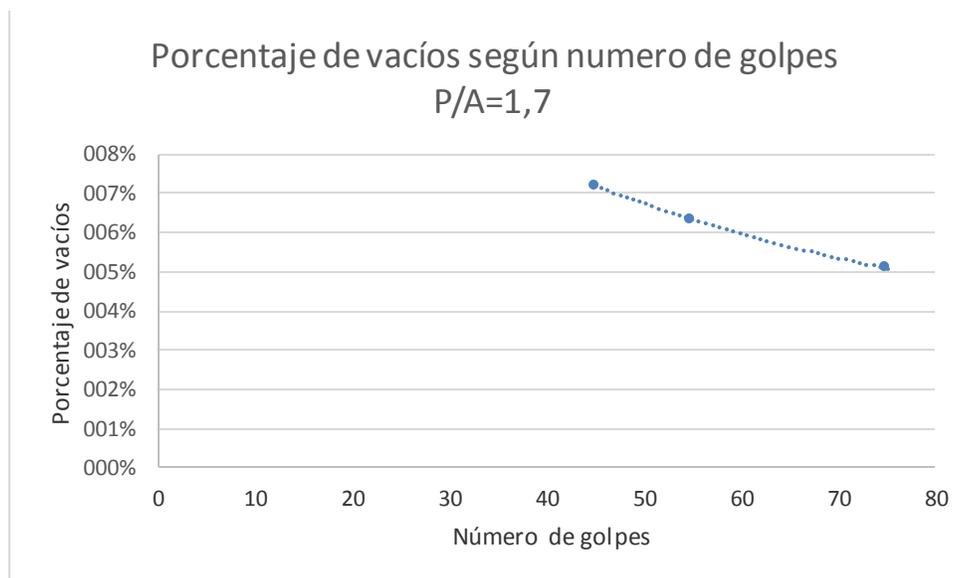


Figura 2. Cálculo de número de golpes para realizar muestras Marshall de mezcla con relación polvo/asfalto efectivo de 1,7

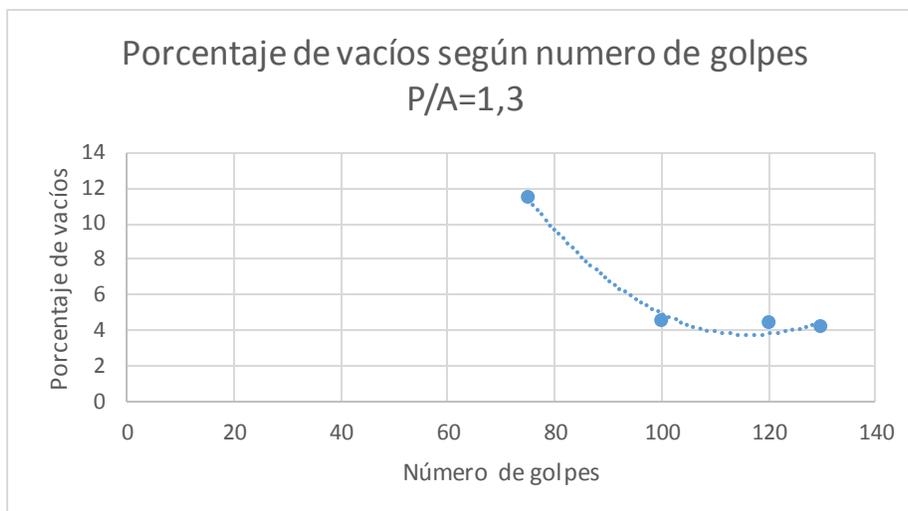


Figura 3. de cálculo de número de golpes para realizar muestras Marshall de mezcla con relación polvo/asfalto efectivo de 1,3

CUADRO 1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS AASHTO T11 Y T27

Número de muestra: IM-PAC-15-067

Fecha de ensayo: 7/27/2015

Masa inicial del agregado **antes** del lavado: 2 437.8 g

Masa del agregado **después** del lavado: 2 190.5 g

Análisis granulométrico AASHTO T27

| Tamiz | Masa Retenida(g) | Masa Pasando(g) | % Pasando | Especificación (%) | Tolerancias (%) |
|-------------------|------------------|-----------------|-----------|--------------------|-----------------|
| 1" (25,00 mm) | 0.0 | 2437.8 | 100.0 | 100 | 100 |
| 3/4"(19,00 mm) | 0.0 | 2437.8 | 100.0 | 100 | 100 |
| 1/2"(12,00 mm) | 21.1 | 2416.7 | 99.1 | 90-100(±5) | 90-98 |
| 3/8"(9,500 mm) | 140.0 | 2276.7 | 93.4 | 70-90(±5) | 80-90 |
| No.4(4,750 mm) | 714.1 | 1562.6 | 64.1 | 45-65(±4) | 45-53 |
| No.8(2,360 mm) | 459.4 | 1103.2 | 45.3 | 28-39(±4) | 29-37 |
| No.16(1,180 mm) | 338.3 | 765.0 | 31.4 | 16-26(±4) | 19-26 |
| No.30(0.600 mm) | 198.3 | 566.7 | 23.2 | 9-19(±4) | 12-19 |
| No.50 (0,300 mm) | 137.6 | 429.1 | 17.6 | 5-16(±4) | 8-16 |
| No.200 (0,075 mm) | 175.6 | 253.6 | 10.4 | 2-8(±2) | 4,5-8,0 |
| Charola | 6.0 | | | | |

CUADRO 2. RESISTENCIA A LA DEGRADACIÓN DEL AGREGADO GRUESO DE TAMAÑO PEQUEÑO POR ABRASIÓN E IMPACTO EN LA MÁQUINA DE ÁNGELES AASHTO T96 / ASTM C131

Número de muestra: IM-PAC-15-067 Fecha de ensayo: 7/27/2015

| Descripción | Unidad | Resultado |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------|
| Tipo de graduación | | C |
| Numero de esferas | unidades | 8 |
| Peso de esferas | g | 3330±25 |
| Peso inicial de la muestra | g | 5000 |
| Peso retenido a 500 revoluciones | g | 3756.7 |
| $\frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso a 500 rev}}{\text{Peso inicial}} \times 100$ | = | 24.9 % |

CUADRO 3. GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO AASHTO T85

Número de muestra: IM-PAC-15-067 Fecha de ensayo: 7/28/2015

| Descripción | Unidad | Resultado |
|-------------------------------------------------|--------|----------------------------------|
| N de espécimen | | 1 2 Promedio |
| Masa Seca del espécimen (A) | g | 1895.5 1896.8 1896.150 |
| Masa Sumergida del espécimen (B) | g | 1228.4 1228.5 1228.450 |
| Masa saturado superficie seca (c) | g | 1936.2 1932.7 1934.450 |
| Temperatura | °C | 25 25 |
| Gravedad específica bruta | | Gbs= 2.686 |
| Gravedad específica saturada en superficie seca | | Gss= 2.740 |
| Gravedad específica aparente | | Ga= 2.840 |
| % absorción | | % absorción= 2.020 |

**CUADRO 4. GRAVEDAD ESPECÍFICA Y
ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO AASHTO T84**

| Número de muestra: | IM-PAC-15-067 | Fecha de ensayo: | 7/28/2015 | | |
|----------------------------------------------|---------------|------------------|-----------|----------|--|
| Descripción | Unidad | Resultado | | | |
| N de espécimen | | 1 | 2 | Promedio | |
| Peso Saturado Superficie seca | g | 500.4 | 500.5 | 500.450 | |
| Peso Picnómetro + muestra + agua | g | 973.3 | 975.6 | 974.450 | |
| Peso Seco | g | 475.3 | 480.1 | 477.700 | |
| Peso Picnómetro con agua | g | 666.7 | 666.7 | 666.700 | |
| Temperatura | °C | 25 | 25 | | |
| Gravedad específica aparente | | Gs= | 2.811 | | |
| Gravedad específica bruta seca | | Gbs= | 2.479 | | |
| Gravedad específica saturada superficie seca | | Gbss= | 2.597 | | |
| % de absorción | | D= | 4.762 | % | |

**CUADRO 5. VISCOSIDAD ROTACIONAL
ASTM D2170**

| Ensayo 1 | 1 | 2 | 3 |
|-------------------------------|-----------|-------|-------|
| Viscosidad Reportada(mPa*s) | 5.50.0 | 550.0 | 550.0 |
| Temperatura(°C) | 135.0 | 135.0 | 135.0 |
| Tamaño de la aguja | 27.0 | 27.0 | 27.0 |
| Velocidad Rotacional(rpm) | 20.0 | 20.0 | 20.0 |
| Torque (%) | 4.4 | 4.4 | 4.4 |
| Viscosidad rotacional (Poise) | 5.5 | 5.5 | 5.5 |
| Ensayo 2 | 1 | 2 | 3 |
| Viscosidad Reportada(mPa*s) | 537.5 | 525.0 | 537.5 |
| Temperatura(°C) | 135.0 | 135.0 | 135.0 |
| Tamaño de la aguja | 27.0 | 27.0 | 27.0 |
| Velocidad Rotacional(rpm) | 20.0 | 20.0 | 20.0 |
| Torque (%) | 4.3 | 4.2 | 4.3 |
| Viscosidad rotacional (Poise) | 5.4 | 5.3 | 5.4 |
| Promedio | 5,4 Poise | | |

| CUADRO 6. DENSIDAD DEL MATERIAL BITUMINOSO ASTM D 70-08 | | | | |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------|-------|--------|--------|
| Descripción | Unidad | 1 | 2 | 3 |
| Masa del picnómetro | g | 35.1 | 35.1 | 35.1 |
| Masa del picnómetro lleno de agua | g | 59.7 | 59.7 | 59.7 |
| Masa del picnómetro + asfalto | g | 50.2 | 50.4 | 50.3 |
| Masa del picnómetro + asfalto + agua | g | 50.2 | 60.2 | 60.2 |
| Densidad relativa | - | 0.6 | 1.0 | 1.0 |
| Temperatura | °C | 25.0 | 25.0 | 25.0 |
| Densidad del agua | Kg/m ³ | 997.0 | 997.0 | 997.0 |
| Densidad | Kg/m ³ | 611.3 | 1031.2 | 1032.8 |
| Densidad | Kg/m ³ | | | 1032.0 |

| CUADRO 7. PUNTO DE INFLAMACIÓN ASTM D 92 | | | |
|-----------------------------------------------------|--------|---------|---------|
| Descripción | Unidad | 1 | 2 |
| Punto de inflamación observado | °C | 268.000 | 270.000 |
| Presión barométrica | Kpa | | |
| Punto de inflamación corregido | °C | 269.000 | |

| CUADRO 8. DUCTILIDAD ASTM D 113-07 | | | |
|-----------------------------------------------|--------|------|------|
| Descripción | Unidad | 1 | 2 |
| Ductilidad de la muestra | cm | +100 | +100 |

| CUADRO 9. GRAVEDAD ESPECIFICA MÁXIMA TEÓRICA DE MEZCLA ASFÁLTICA CON RELACIÓN POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.0 INTE 04-01-03-05 | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------|-------------|-----------|--------|
| Descripción | Unidad | Resultado | | | |
| | | 1 | 2 | | |
| Masa de la muestra seca | g | 1515.5 | 1498.6 | | |
| Masa del contenedor calibrado | g | 7367.9 | 7367.9 | | |
| Masa del contenedor + muestra + agua + tapa | g | 8275 | 8266.2 | | |
| T | °C | 25 | 25 | | |
| Gmm | | 2.491 | 2.496 | | |
| Masa constante | Especimen 1 | | Especimen 2 | | |
| | Tiempo | Resultado | Tiempo | Resultado | |
| | 1 | 2:00 | 1517 | 2:00 | 1500 |
| | 2 | 2:15 | 1516.8 | 2:15 | 1499.6 |
| Wsss (masa saturada superficie seca) | | 1516.8 | g | 1499.6 g | |
| Gmm corregido | | | 2.486 | 2.492 | |
| | GmmPromedio= | 2.489 | | | |

| CUADRO 10. GRAVEDAD ESPECÍFICA BRUTA DE MEZCLA ASFÁLTICA CON RELACIÓN POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.0 INTE 04-01-01-04 | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|------------|--------|--------|--------|--|
| Descripción | Unidad | Resultados | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| N de espécimen | | | | | | |
| Masa seca | g | 1170.7 | 1170.7 | 1167.2 | 1168.8 | |
| Masa sumergida | g | 670.6 | 670.1 | 671 | 669.3 | |
| Masa saturada superficie seca | g | 1172.4 | 1173.6 | 1169.4 | 1171.2 | |
| Gmb | | 2.333 | 2.325 | 2.342 | 2.329 | |
| | Gmb= | 2.332 | | | | |
| | %vacíos= | 6.30% | | | | |

**CUADRO 11. RESISTENCIA A LA TENSIÓN DIAMETRAL RETENIDA DE MEZCLA ASFÁLTICA CON
RELACIÓN POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.0
INTE 04-01-05-05**

| No pastilla saturadas 48 h | W seco (g) | W saturado (g) | V agua abs | V vacíos | % saturación |
|------------------------------|------------|----------------|------------|----------|--------------|
| 1 | 1163.6 | 1186.8 | 23.2 | 30.7 | 75.6 |
| 5 | 1162.8 | 1186.0 | 23.2 | 29.1 | 79.7 |
| 11 | 1162.1 | 1184.8 | 22.7 | 28.8 | 78.8 |
| 12 | 1165.4 | 1188 | 22.6 | 28.3 | 79.9 |
| No pastilla saturadas a 24 h | W seco (g) | W saturado (g) | V agua abs | V vacíos | % saturación |
| 2 | 1157.2 | 1180.2 | 23.0 | 32.9 | 70.0 |
| 3 | 1164.1 | 1187.8 | 23.7 | 33.8 | 70.1 |
| 7 | 1158.4 | 1182.7 | 24.3 | 33.6 | 72.4 |
| 10 | 1166 | 1191 | 25.0 | 34.8 | 71.8 |

**CUADRO 11 (CONTINUACION). RESISTENCIA A LA TENSIÓN DIAMETRAL RETENIDA DE MEZCLA ASFÁLTICA CON RELACIÓN POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.0
INTE 04-01-05-05**

| No pastilla saturadas 48 h | Volumen | Espesor (mm) | Diámetro (mm) | Carga (KN) | Tensión Diametral (kg/cm ²) | Tensión Diametral (kPa) |
|----------------------------------|---------|--------------|---------------|------------|-----------------------------------------|-------------------------|
| 1 | 498.2 | 63.94 | 101.52 | 9.37 | 9.37 | 918.96 |
| 5 | 496.3 | 62.9 | 101.7 | 8.07 | 8.19 | 803.12 |
| 11 | 495.7 | 62.88 | 101.44 | 8.05 | 8.19 | 803.44 |
| 12 | 496.5 | 62.5 | 101.84 | 9.13 | 9.31 | 913.17 |
| Promedio | | | | | | 859.67 |
| Desviación Estándar (KPa) | | | | | | 65.16 |
| No pastilla Saturadas a 24h | Volumen | Espesor (mm) | Diámetro (mm) | Carga (KN) | Tensión Diametral (kg/cm ²) | Tensión Diametral (kPa) |
| 2 | 497.8 | 63.50 | 102.00 | 9.63 | 9.65 | 946.53 |
| 3 | 501.5 | 63.10 | 101.60 | 10.32 | 10.45 | 1024.76 |
| 7 | 499.0 | 63.51 | 101.60 | - | - | - |
| 10 | 503.3 | 64.10 | 101.60 | 9.06 | 9.03 | 885.58 |
| Promedio | | | | | | 952.29 |
| Desviación Estándar (KPa) | | | | | | 479.54 |
| No pastilla Secas | Volumen | Espesor (mm) | Diámetro (mm) | Carga (KN) | Tensión Diametral (kg/cm ²) | Tensión Diametral (kPa) |
| 4 | 498.4 | 63.42 | 101.92 | 12.9 | 12.96 | 1270.53 |
| 6 | 500.1 | 63.40 | 103.44 | 13.28 | 13.15 | 1289.14 |
| 8 | 500.5 | 63.72 | 101.00 | 11.95 | 12.05 | 1182.09 |
| 9 | 498.1 | 64.22 | 101.80 | 13.01 | 12.92 | 1266.89 |
| Promedio | | | | | | 12.77 |
| Desviación Estándar (KPa) | | | | | | 47.72 |
| | | | | 24 h | 48h | |
| Razón de Tensión Diametral | | | | 76% | 69% | |

| CUADRO 12. TENSION DIAMETRAL SEGÚN CONDICION DE MUESTRA PARA MEZCLA CON RELACION POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.0 | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Condición de muestra | Tensión Diametral (kPa) |
| Saturada a 48 h | 859,67 |
| Saturada a 24 h | 952,29 |
| Secas | 1252,16 |

| CUADRO 13. ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL DE MEZCLA ASFÁLTICA CON RELACIÓN POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.0 INTE 04-01-11-06 | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------|
| Espécimen | Estabilidad (KN) | Flujo (mm) |
| 1 | 10.02 | 2.39 |
| 2 | 13.96 | 2.70 |
| 3 | 12.82 | 4.52 |
| 4 | 10.02 | 2.39 |
| Promedio | 11.71 | 3.00 |

| CUADRO 14. MÓDULO RESILENTE DE MUESTRAS SECAS DE MEZCLA ASFÁLTICA CON RELACIÓN POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.0 ASTM D4123 | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|------------------------|
| Temperatura (°C) | Carga aplicada para MR (N) | Módulo resilente (MPa) |
| 5 | 3571.3 | 15260 |
| 25 | 1767.3 | 5217 |
| 40 | 585.0 | 1985 |

| CUADRO 15. MÓDULO RESILENTE DE MUESTRAS ACONDICIONADAS DE MEZCLA ASFÁLTICA CON RELACIÓN POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.0 ASTM D4123 | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|------------------------|
| Temperatura (°C) | Carga aplicada para MR (N) | Módulo resilente (MPa) |
| 5 | 2877.7 | 15961 |
| 25 | 1456.0 | 4992 |
| 40 | 469.3 | 2029 |

**CUADRO 16. GRANULOMETRÍA DE MEZCLA CON RELACIÓN
POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.3**

| Tamiz | %Pasando | Especificación (%) | Tolerancias (%) | Retenido acumulado | % retenido | Peso por malla (g) |
|----------------------------------------|----------|--------------------|-----------------|-----------------------------|------------|--------------------|
| 1" (25,00 mm) | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| 3/4" (19,00 mm) | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| 1/2" (12,00 mm) | 93 | 90-100(±5) | 90-98 | 7 | 0.07 | 280 |
| 3/8" (9,500 mm) | 85 | 70-90(±5) | 80-90 | 15 | 0.08 | 320 |
| No.4(4,750 mm) | 49 | 45-65(±4) | 45-53 | 51 | 0.36 | 1440 |
| No.8(2,360 mm) | 33 | 28-39(±4) | 29-37 | 67 | 0.16 | 640 |
| No.16(1,180 mm) | 23 | 16-26(±4) | 19-26 | 77 | 0.1 | 400 |
| No.30(0.600 mm) | 16 | 9-19(±4) | 12-19 | 84 | 0.07 | 280 |
| No.50(0,300 mm) | 12 | 5-16(±4) | 8-16 | 88 | 0.04 | 160 |
| No.200(0,075 mm) | 7.93 | 2-8(±2) | 4,5-8,0 | 92.07 | 0.0407 | 162.8 |
| Charola | | | | 100 | 0.0793 | 317.2 |
| | | | | Por Corrección por charola= | | 88.75 |
| Relación P/A | 1.3 | N200= | 7,93 | % Pasando | | |
| % asfalto sobre el peso del agregado= | | | 6.5 | % | | |
| % asfalto sobre el peso de la mezcla = | | | 6.1 | % | | |
| P/A= | | | 1,3 | | | |

| CUADRO 17. GRAVEDAD ESPECIFICA MÁXIMA TEÓRICA DE MEZCLA ASFÁLTICA CON RELACIÓN POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.3 INTE 04-01-03-05 | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|---------------|-----------|-------------|-----------|
| Descripción | Unidad | Resultado | | | |
| | | 1 | 2 | | |
| Masa de la muestra seca | g | 1500.9 | 1507.4 | | |
| Masa del contenedor calibrado | g | 7367.9 | 7367.9 | | |
| Masa del contenedor + muestra + agua + tapa | g | 8266.5 | 8271.3 | | |
| T | °C | 25 | 25 | | |
| Gmm | | 2.492 | 2.496 | | |
| Masa constante | | Espécimen 1 | | Espécimen 2 | |
| | | Tiempo | Resultado | Tiempo | Resultado |
| 1 | | 2:00 | 1504.4 | 2:00 | 1517.3 |
| 2 | | 2:15 | 1503.8 | 2:15 | 1514.9 |
| Wsss (masa saturada superficie seca) | | 1503.8 | g | 1514.9 | g |
| Gmm corregido | | | 2.480 | | 2.465 |
| | | GmmPromedio = | 2.473 | | |

| CUADRO 18. GRAVEDAD ESPECIFICA BRUTA DE MEZCLA ASFÁLTICA CON RELACIÓN POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.3 INTE 04-01-01-04 | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|------------|--------|--------|--------|
| Descripción | Unidad | Resultados | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| N de espécimen | | | | | |
| Masa seca | g | 1165.2 | 1164.5 | 1164.2 | 1165.6 |
| Masa sumergida | g | 638.4 | 637.4 | 633.8 | 635.8 |
| Masa saturada superficie seca | g | 1168 | 1167.9 | 1168 | 1170.2 |
| Gmb | | 2.200 | 2.195 | 2.179 | 2.181 |
| | | Gmb= | 2.189 | | |
| | | %vacíos= | 11.47% | | |

**CUADRO 19. RESISTENCIA A LA TENSIÓN DIAMETRAL RETENIDA DE
MEZCLA ASFÁLTICA CON RELACION POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.3
INTE 04-01-05-05**

| No pastilla saturadas 48 h | W seco (g) | W saturado (g) | V agua abs | V vacíos | % saturación | |
|----------------------------------|------------|----------------|---------------|------------|-----------------------------------------|-------------------------|
| 5 | 1169.0 | 1187 | 18.0 | 25.3 | 71.1 | |
| 7 | 1176.1 | 1196.4 | 20.3 | 25.5 | 79.5 | |
| 9 | 1176.2 | 1194.2 | 18.0 | 25.6 | 70.3 | |
| 12 | 1173.1 | 1195.8 | 22.7 | 29.1 | 77.9 | |
| No pastilla Saturadas a 24 h | W seco (g) | W saturado (g) | V agua abs | V vacíos | % saturación | |
| 1 | 1172.0 | 1190.2 | 18.2 | 24.7 | 73.7 | |
| 3 | 1168.7 | 1186 | 17.3 | 24.6 | 70.2 | |
| 4 | 1168.5 | 1186.7 | 18.2 | 25.0 | 72.8 | |
| 6 | 1170.4 | 1191.9 | 21.5 | 28.4 | 75.6 | |
| No pastilla saturadas 48 h | Volumen | Espesor (mm) | Diámetro (mm) | Carga (KN) | Tensión Diametral (kg/cm ²) | Tensión Diametral (kPa) |
| 5 | 498.10 | 62.42 | 102.3 | 7.89 | 8.02 | 786.61 |
| 7 | 501.20 | 63.58 | 101.6 | 7.81 | 7.85 | 769.69 |
| 9 | 501.30 | 63.4 | 101.84 | 7.54 | 7.58 | 743.44 |
| 12 | 503.60 | 64.12 | 101.48 | 7.49 | 7.47 | 732.80 |
| Promedio | | | | | | 758.13 |
| Desviación Estándar (Kpa) | | | | | | 24.51 |
| No pastilla saturadas a 24 h | Volumen | Espesor (mm) | Diámetro (mm) | Carga (KN) | Tensión Diametral (kg/cm ²) | Tensión Diametral (kPa) |
| 1 | 498.70 | 62.36 | 101.90 | 8.01 | 8.18 | 802.48 |
| 3 | 497.30 | 62.30 | 100.70 | 8.38 | 8.67 | 850.37 |
| 4 | 497.60 | 62.46 | 101.18 | 7.83 | 8.04 | 788.76 |
| 6 | 501.80 | 64.00 | 101.44 | 8.54 | 8.54 | 837.43 |
| Promedio | | | | | | 830.09 |
| Desviación Estándar (Kpa) | | | | | | 28.92 |

**CUADRO 19 (CONTINUACIÓN). RESISTENCIA A LA TENSIÓN DIAMETRAL
RETENIDA DE MEZCLA ASFÁLTICA CON RELACIÓN POLVO/ASFALTO
EFECTIVO DE 1.3
INTE 04-01-05-05**

| No pastilla Secas | Volumen | Espesor (mm) | Diámetro (mm) | Carga (KN) | Tensión Diametral (kg/cm ²) | Tensión Diametral (kPa) |
|----------------------------------|---------|--------------|---------------|------------|-----------------------------------------|-------------------------|
| 2 | 496.40 | 62.60 | 101.78 | 9.41 | 9.59 | 940.23 |
| 8 | 499.50 | 63.30 | 101.28 | 9.82 | 9.94 | 975.13 |
| 10 | 497.90 | 62.50 | 101.50 | 10.68 | 10.93 | 1071.78 |
| 11 | 498.50 | 63.64 | 101.10 | 11.89 | 12.00 | 1176.47 |
| Promedio | | | | | 10.61 | 1040.90 |
| Desviación Estándar (Kpa) | | | | | | 106.13 |
| | | | | 24h | 48h | |
| Razón de Tensión Diametral | | | | 80% | 73% | |

**CUADRO 20. TENSIÓN DIAMETRAL SEGÚN
CONDICIÓN DE MUESTRA PARA MEZCLA CON
RELACIÓN POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.3**

| Condición de muestra | Tensión Diametral (kPa) |
|----------------------|-------------------------|
| Saturada a 48 h | 758.13 |
| Saturada a 24 h | 830.09 |
| Secas | 1040.90 |

**CUADRO 21. ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL DE MEZCLA ASFÁLTICA
CON RELACIÓN POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.3
INTE 04-01-11-06**

| Espécimen | Estabilidad (KN) | Flujo (mm) |
|-----------|------------------|------------|
| 17 | 12.34 | 3.93 |
| 18 | 12.47 | 3.19 |
| 19 | 11.69 | 3.68 |
| 20 | 11.23 | 3.39 |
| Promedio | 11.93 | 3.55 |

| CUADRO 22. MÓDULO RESILIENTE DE MUESTRAS SECAS DE MEZCLA ASFÁLTICA CON RELACIÓN POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.3 ASTM D4123 | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Temperatura (°C) | Carga aplicada para MR (N) | Módulo resiliente (MPa) |
| 5 | 3085.5 | 14683 |
| 25 | 1543.0 | 4905 |
| 40 | 524.0 | 1647 |

| CUADRO 23. MODULO RESILIENTE DE MUESTRAS ACONDICIONADAS DE MEZCLA ASFÁLTICA CON RELACIÓN POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.3 ASTM D4123 | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Temperatura (°C) | Carga aplicada para MR (N) | Módulo resiliente (MPa) |
| 5 | 2882.5 | 14657 |
| 25 | 1447.0 | 5193 |
| 40 | 470.0 | 1746 |

| CUADRO 24. GRANULOMETRÍA DE MEZCLA CON RELACIÓN POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.7 | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------------------|-----------------|--------------------|------------|--------------------|
| Tamiz | %Pasando | Especificación (%) | Tolerancias (%) | Retenido acumulado | % retenido | Peso por malla (g) |
| 1" (25,00 m) | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| 3/4"(19,00 mm) | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| 1/2"(12,00 mm) | 93 | 90-100(±5) | 90-98 | 7 | 0.07 | 280 |
| 3/8"(9,500 mm) | 85 | 70-90(±5) | 80-90 | 15 | 0.08 | 320 |
| No.4(4,750 mm) | 49 | 45-65(±4) | 45-53 | 51 | 0.36 | 1440 |
| No.8(2,360 mm) | 33 | 28-39(±4) | 29-37 | 67 | 0.16 | 640 |
| No.16(1,180 mm) | 23 | 16-26(±4) | 19-26 | 77 | 0.1 | 400 |
| No.30(0.600 mm) | 16 | 9-19(±4) | 12-19 | 84 | 0.07 | 280 |
| No.50(0,300 mm) | 12 | 5-16(±4) | 8-16 | 88 | 0.04 | 160 |
| No.200(0,075 mm) | 10.4 | 2-8(±2) | 4,5-8,0 | 89.6 | 0.016 | 64 |
| Charola | | | | 100 | 0.104 | 416 |
| Por Corrección por charola= | | | | | | 187.55 |
| Relación P/A | | N200= | 10.4 | % Pasando | | |
| % asfalto sobre el peso del agregado= | | | | 6.5 | % | |
| % asfalto sobre el peso de la mezcla = | | | | 6.1 | % | |
| P/A= | | | | | | 1.7 |

**CUADRO 25. GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA DE MEZCLA CON
RELACIÓN POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1,7
INTE 04-01-03-05**

| Descripción | Unidad | Resultado | | | |
|---------------------------------------------|--------|----------------|-----------|-------------|-----------|
| | | 1 | 2 | | |
| Masa de la muestra seca | g | 1499.1 | 1497.2 | | |
| Masa del contenedor calibrado | g | 7367.9 | 7367.9 | | |
| Masa del contenedor + muestra + agua + tapa | g | 8262.9 | 8265 | | |
| T | °C | 25 | 25 | | |
| Gmm | | 2.482 | 2.495 | | |
| Masa constante | | Espécimen 1 | | Espécimen 2 | |
| | | Tiempo | Resultado | Tiempo | Resultado |
| 1 | | 2:00 | 1508.4 | 2:00 | 1502.6 |
| 2 | | 2:15 | 1506.3 | 2:15 | 1502 |
| Wsss (Masa saturada superficie seca) | | 1506.3 | g | 1502 | g |
| Gmm corregido | | | 2.452 | 2.475 | |
| | | Gmm Promedio = | 2.464 | | |

**CUADRO 26. GRAVEDAD ESPECÍFICA BRUTA DE
MEZCLA CON RELACIÓN POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.7
INTE 04-01-01-04**

| Descripción | Unidad | Resultados | | | |
|-------------------------------|----------|------------|--------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| N de espécimen | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Masa seca | g | 1171.8 | 1170.2 | 1167.8 | 1171.6 |
| Masa sumergida | g | 671.9 | 673.1 | 670.7 | 677.3 |
| Masa saturada superficie seca | g | 1173.1 | 1171.1 | 1169.6 | 1172.8 |
| Gmb | | 2.338 | 2.350 | 2.341 | 2.364 |
| | Gmb= | 2.348 | | | |
| | %vacíos= | 4.69% | | | |

CUADRO 27. RESISTENCIA A LA TENSION DIAMETRAL RETENIDA DE MEZCLA CON RELACION POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.7 INTE 04-01-05-05

| No pastilla saturadas 48 h | W seco (g) | W saturado (g) | V agua abs | V vacíos | % saturación | |
|------------------------------|------------|----------------|---------------|----------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------|
| 4 | 1164.6 | 1190.2 | 25.6 | 32.0 | 80.0 | |
| 5 | 1162.6 | 1183.7 | 21.1 | 26.7 | 78.9 | |
| 8 | 1169.2 | 1194.2 | 25.0 | 31.4 | 79.5 | |
| 9 | 1167.7 | 1190.2 | 22.5 | 29.0 | 77.5 | |
| No pastilla saturadas a 24 h | W seco (g) | W saturado (g) | V agua abs | V vacíos | % saturación | |
| 1 | 1164.1 | 1190.8 | 26.7 | 34.7 | 76.9 | |
| 6 | 1161.7 | 1184.5 | 22.8 | 29.6 | 77.0 | |
| 10 | 1160.8 | 1185 | 24.2 | 31.2 | 77.6 | |
| 11 | 1153.2 | 1179.5 | 26.3 | 33.4 | 78.8 | |
| No pastilla saturadas 48 h | Volumen | Espesor (mm) | Diámetro (mm) | Carga (KN) | Tensión Diametral (kg/cm ²) | Tensión Diametral (kPa) |
| 4 | 503.9 | 63.9 | 101.18 | 5.35 | 5.37 | 526.79 |
| 5 | 503.9 | 64.7 | 101.8 | 3.97 | 3.91 | 383.72 |
| 8 | 507.3 | 64.5 | 101.6 | 6.82 | 6.76 | 662.54 |
| 9 | 505.4 | 64.7 | 101.22 | 3.42 | 3.39 | 332.46 |
| | | | | Promedio | | 476.38 |
| | | | | Desviación Estándar (Kpa) | | 148.88 |
| No pastilla Saturadas a 24 h | Volumen | Espesor (mm) | Diámetro (mm) | Carga (KN) | Tensión Diametral (kg/cm ²) | Tensión Diametral (kPa) |
| 1 | 507.2 | 65.00 | 101.40 | 6.82 | 6.72 | 658.74 |
| 6 | 504.9 | 64.90 | 101.66 | 5.83 | 5.74 | 562.54 |
| 10 | 506.3 | 65.00 | 101.80 | 5.03 | 4.93 | 483.93 |
| 11 | 501.8 | 64.24 | 101.60 | 6.39 | 6.36 | 623.28 |
| | | | | Promedio | | 614.85 |
| | | | | Desviación Estándar (Kpa) | | 76.57 |

**CUADRO 27 (CONTINUACION). RESISTENCIA A LA TENSION DIAMETRAL
RETENIDA
DE MEZCLA CON RELACIÓN POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.7
INTE 04-01-05-05**

| No pastilla Secas | Volume n | Espeso r (mm) | Diámetro (mm) | Carga (KN) | Tensión Diametral (kg/cm ²) | Tensión Diametr al (kPa) |
|----------------------------|-------------|------------------|---------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------|
| 2 | 496.10 | 63.34 | 101.20 | 9.60 | 9.72 | 953.44 |
| 3 | 503.90 | 64.32 | 101.2 | 9.39 | 9.36 | 918.37 |
| 7 | 499.00 | 63.80 | 101.18 | 8.84 | 8.89 | 871.80 |
| 12 | 496.60 | 63.60 | 101.50 | 9.89 | 9.95 | 975.33 |
| | | | | Promedi o | 9.48 | 929.74 |
| | | | | Desviación Estándar (Kpa) | | 45.19 |
| | | | | 24h | 48h | |
| Razón de Tensión Diametral | | | | 66% | 51% | |

**CUADRO 28. TENSION DIAMETRAL SEGÚN
CONDICIÓN DE MUESTRA PARA MEZCLA CON
RELACION POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.7**

| Condición de muestra | Tensión Diametral(kPa) |
|----------------------|------------------------|
| Saturada a 48 h | 476.38 |
| Saturada a 24 h | 614.85 |
| Secas | 929.74 |

**CUADRO 29. ESTABILIDAD Y FLUJO DE
MEZCLA CON RELACIÓN POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.7
INTE 04-01-11-06**

| Espécimen | Estabilidad (KN) | Flujo (mm) |
|-----------|------------------|------------|
| 8 | 8.33 | 3.18 |
| 9 | 9.92 | 4.03 |
| 10 | 8.93 | 2.93 |
| 11 | 9.08 | 3.11 |
| Promedio | 9.07 | 3.31 |

| CUADRO 30. MÓDULO RESILENTE DE MUESTRAS SECAS DE MEZCLA CON RELACIÓN POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.7 ASTM D4123 | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|------------------------|
| Temperatura (°C) | Carga aplicada para MR (N) | Módulo resilente (MPa) |
| 5 | 2702.5 | 14234 |
| 25 | 1359.5 | 4324 |
| 40 | 471.0 | 1906 |

| CUADRO 31. MÓDULO RESILENTE DE MUESTRAS ACONDICIONADAS DE MEZCLA CON RELACIÓN POLVO/ASFALTO EFECTIVO DE 1.7 ASTM D4123 | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|------------------------|
| Temperatura (°C) | Carga aplicada para MR (N) | Módulo resilente (MPa) |
| 5 | 2692.0 | 13370 |
| 25 | 1337.0 | 4074 |
| 40 | 453.0 | 1207 |

Anexos

Anexo 1: Granulometría original en el diseño de mezcla aportado al MOPT

Anexo 2: Resumen de las pruebas adjuntas en diseño de mezcla aportado por la empresa al MOPT

Anexo 3: Informe de pruebas de laboratorio adjuntas en el diseño de mezcla original aportado al MOPT

| Tamiz | % Pasando | Tolerancias y Especificaciones para Tamaño Máx. Nominal 12,5 mm (Tabla 418-2 CR 2010) | Rangos para la Fórmula de Trabajo |
|--------------|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 19.0 mm | 100 | 100 | 100 |
| 12.7 mm | 93 | 90 - 100(± 5) | 90 - 98 |
| 9.5 mm | 85 | 70 - 90 (± 5) | 80 - 90 |
| Nº 4 | 49 | 45 - 65 (± 4) | 45 - 53 |
| Nº 8 | 33 | 28 - 39 (± 4) | 29 - 37 |
| Nº 16 | 23 | 16 - 26 (± 4) | 19 - 26 |
| Nº 30 | 16 | 9 - 19 (± 4) | 12 - 19 |
| Nº 50 | 12 | 5 - 16 (± 4) | 8 - 16 |
| Nº 200 | 6,2 | 2,0 - 8,0 (± 2) | 4,2 - 8,0 |

| FRACCIÓN GRUESA | RESULTADO | Especificación |
|-----------------------------------------------------------|-----------|--------------------|
| Pérdida por abrasión (AASHTO T 96)** | 18,8 % | 40 % máximo |
| Pérdida por sanidad con sulfato de sodio (AASHTO T 104)** | 10,3 % | 15 % máximo |
| Índice de durabilidad (AASHTO T 210)** | 90 % | 35 % mínimo |
| Partículas Planas o Alargadas (ASTM C 119)* | 1,2 % | 10 % máximo |
| Partículas Friables (AASHTO T 112)** | 0,17 % | Menor o igual a 2% |
| Una o más caras fracturadas (ASTM D 5821)* | 98 % | 95 % mínimo |
| Residuos insolubles en carbonatos solubles (ASTM D 3042) | 97 % | 25 % mínimo |
| Dos o más caras fracturadas (ASTM D 5821)* | 97 % | 90 % mínimo |
| FRACCIÓN FINA | | |
| Pérdida por abrasión (AASHTO T 96)** | 21,5 % | 40 % máximo |
| Pérdida por sanidad (AASHTO T 104)** | 3,6 % | 15% máximo |
| Índice de durabilidad (AASHTO T 210)** | 82 % | 35% mínimo |
| Equivalente de arena (AASHTO T 176**) | 73 % | 50 % mínimo |
| Límites de Atterberg (AASHTO T 89/90)* | NP | NP |

| Método de ensayo | Prueba | Resultado | Límites de especificación | Análisis y fecha | |
|------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|------------------|------------|
| ** ASTM D-70 | Densidad a 15 °C | (1035,0 ± 6,8) kg/m ³ | No Aplica | L.B.A | 2013-11-10 |
| **ASTM D-92 | Temperatura de inflamación | (260 ± 18) °C | Mínimo 232 °C | JCC | 2013-11-10 |
| **ASTM D-2170 | Viscosidad a 135 °C | (455 ± 47) mm ² /s | Mínimo 350 mm ² /s | G.S.S. | 2013-11-10 |
| **ASTM D-2170 | Viscosidad a 165 °C | (116 ± 13) mm ² /s | No aplica | RBS | 2013-10-14 |
| **ASTM D-2171 | Viscosidad a 60 °C | (300 ± 15) Pa*s | (300 ± 60) Pa*s | G.S.S. | 2013-11-10 |
| ** ASTM D-5 | Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s | (54 ± 5,9) 1/10 mm | Mínimo 50 1/10 mm | RBS | 2013-11-10 |
| ** ASTM D-1754 | Pérdida por calentamiento expresado como fracción de asfalto | (0,017 ± 0,003) % | Reportar | PHM | 2013-11-10 |
| ** ASTM D-2171 | Viscosidad post-pérdida 60 °C | (658 ± 33) Pa*s | Máximo 1500 Pa*s | RBS | 2013-11-10 |
| **ASTM D-113 | Ductilidad post-pérdida a 25 °C | (65 ± 20) cm | Mínimo 40 cm | RBS | 2013-11-10 |
| ** Cálculo | Índice de Susceptibilidad Térmica, VTS | 3,6 Unidades | No aplica | G.S.S. | 2013-11-10 |
| ** Cálculo | Relación de Viscosidades Absolutas | 2,2 | No aplica | RBS | 2013-11-10 |
| **ASTM D4057 | Manual de Muestreo para petróleo y Derivados | No Aplica | No Aplica | JCC | 2013-11-10 |

REGULACIÓN: RTCA 75.01.22-04, Tabla IB, Decreto N° 32812-COMEX-MINAE-MEIC, D

Los resultados de los análisis ejecutados cumplen con el Reglamento Técnico Centroamericano.

OBSERVACIONES: * Ensayo acreditado bajo norma. ** Ensayo no acreditado. Acreditación de acuerdo a la norma INTE- ISO/IEC 17025:2005. Ver alcance en www.cca.or.cr. Los valores de punto de inflamación son corregidos a 101,3 kPa. El plan de muestreo se ejecuta de acuerdo al "Instructivo para la

| Cálculo de temperaturas de trabajo | | |
|------------------------------------|--------------|--------|
| | Compactación | Mezcla |
| Máxima | 147 | 159 |
| Mínima | 143 | 154 |

Las temperaturas se calculan de acuerdo a ASTM 1559, se informan como referencia para aplicaciones en diseños de mezclas

Referencias

Robert, F. *et al.* (1996). *HOT MIX ASPHALT MATERIALS, MIXTURE DESIGN, AND CONSTRUCTION*. Estados Unidos: National asphalt pavement association research and education foundation.

Smith, M.R y Collis, J. (1994). *ÁRIDOS NATURALES Y DE MACHAQUEO PARA LA CONSTRUCCION*. España: Editorial The Geological Society, edición en español editada por L.Suárez y M. Regueiro.

Nieto, J. (2010). *CRITERIOS DE VALORIZACIÓN DE CAPAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE PARA CARPETAS ASFÁLTICAS Y RESISTENCIA AL AHUELLAMIENTO*. Tesis de becarios. Escuela de Ingeniería Facultad Regional La Plata, Universidad Tecnológica Nacional. 38 p.

Cáceres, C. (2007). *ANÁLISIS DE LA METODOLOGIA SUPERPAVE PARA EL DISEÑO DE MEZCALAS ASFÁLTICAS EN MEXICO*. Tesis para obtener el título de licenciatura en ingeniería civil. Escuela de ingeniería y ciencias. Universidad de las Américas Puebla. 154p.

Carrasco, F. (2004). *ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE Y MEZCLAS ASFÁLTICAS CON EMULSIONES TIBIAS*. Tesis. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Universidad de Piura.

Muñoz, A. (2015). *Diseño de mezcla usado actualmente por el MOPT*. San José. Comunicación personal.

AASHTO (1993). *Guide for Design of Pavement structures*.

Ministerio de Obras Públicas y Transporte, *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2010)*. (2010). San José, Costa Rica.

Ministerio de Obras Públicas y Transportes, *Manual de construcción para caminos, carreteras y puentes (MC-83)*, 1983. San José, Costa Rica.

Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA 75.01.22:04), *Productos de petróleo, Asfaltos, Especificaciones*, 2005.

Padilla Rodríguez, Alejandro. *Mezclas Asfálticas*. Universidad Politécnica de Cataluña, (en línea); 2004. <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3334/14/34065-14.pdf>.

Poveda, A, *Resistencia a la abrasión del agregado grueso mediante máquina de los ángeles*. Laboratorio de concreto II semestre 2012).

Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. (2004). *Método de ensayo para la determinación de la gravedad específica bruta de mezclas asfálticas compactadas, usando el método de superficie saturado seco*, Costa Rica.

Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica., 2005, *Método de ensayo para la determinación de la gravedad máxima teórica y la densidad de mezclas asfálticas para pavimentos, usando el método de superficie saturado seco*, Costa Rica.

Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. (2004), *Método de ensayo para la determinar el porcentaje de vacíos de aire de mezclas asfálticas densas y abiertas para pavimentos (AASHTO T269-97(1998))*, Costa Rica.

Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. (2005). *Método de ensayo para determinar la resistencia al daño inducido por la humedad en mezclas asfálticas compactadas (Tensión diametral indirecta retenida)*, Costa Rica.

Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica, (2004). *Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de mezclas asfálticas*, Costa Rica.

Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica, 2005, *Método de ensayo para determinar el agua en la resistencia a la compresión de mezclas asfálticas compactadas*, Costa Rica.

Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica, 2005, *Método de ensayo para preparar especímenes de mezcla asfáltica usando el equipo Marshall*, Costa Rica.

Instituto de normas técnicas de costa rica, 2006, *Método de ensayo para estabilidad y flujo Marshall de mezclas asfálticas*, Costa Rica.

Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. (2006), *Método de ensayo para el muestreo de mezclas asfálticas para pavimentos*, Costa Rica.

Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica., 2006, *Método de ensayo determinar la viscosidad del asfalto empleado el viscosímetro rotacional*, Costa Rica.

ASTM. (2007). *Standard test method for ductility of bituminous materials D113*, Estados Unidos.

ASTM. (2007). *Standard test method for desity of semi-solid bituminous materials (Pycnometer Method) D70*, Estados Unidos.

ASTM. (2007). *Standard test method for desity, relative density (Specific gravity), and absorption of coarse aggregate C127*, Estados Unidos.

ASTM. (2007). *Standard test method for desity, relative density (Specific gravity), and absorption of fine aggregate C128*, Estados Unidos.

ASTM. 2006). *Standard test method for resistance to degradation of small size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles Machine C131*, Estados Unidos.

ASTM. (2006). *Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates C136*, Estados Unidos

ASTM. (2006). *Standard test method for modulus test system D7369*, Estados Unidos.

Castro, P. (2015), *Material de clase I semestre 2015*, Cartago, Costa Rica.

Walpole R, Myers W, Myers S, Ye K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. México; Pearson educación. Novena edición.