

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Excelencia que trasciende

DEL VALLE
GRUPO EDUCATIVO

Determinación de los efectos de la incorporación de cal hidratada
como filler activo en una mezcla asfáltica en caliente bajo la
metodología Marshall

Trabajo de graduación presentado por Pablo José Menéndez Pérez para optar
el grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala

2015

Determinación de los efectos de la incorporación de cal hidratada
como filler activo en una mezcla asfáltica en caliente bajo la
metodología Marshall

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Excelencia que trasciende

DELVALLE
GRUPO EDUCATIVO

Determinación de los efectos de la incorporación de cal hidratada
como filler activo en una mezcla asfáltica en caliente bajo la
metodología Marshall

Trabajo de graduación presentado por Pablo José Menéndez Pérez para optar
el grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

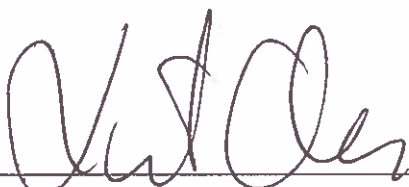
Guatemala

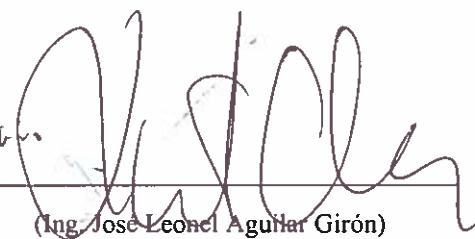
2015

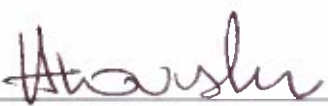
Vo. Bo.

(f): 
(Ing. Hugo González)

Tribunal examinador:

(f): 
(Ing. Roberto Godo Levensen)

(f): 
(Ing. José Leonel Aguilar Girón)

(f): 
(Ing. Hugo González)

Fecha de Aprobación: Guatemala 9 de Diciembre del 2015.

PREFACIO

En el año 2009, el Centro de Investigación y Desarrollo (CI+D) de Cementos Progreso S.A. contó con la colaboración del ingeniero salvadoreño Enrique Edgardo Melara Ruiz para realizar un estudio con el objetivo de comparar los efectos de incluir cal hidratada e hidróxido de calcio en mezclas asfálticas en caliente. La metodología utilizada para realizar el estudio consistió en realizar un diseño de mezcla asfáltica en caliente mediante la metodología Marshall para comparar el desempeño de ambos “fillers” y analizar las reducciones en el porcentaje de desgaste abrasivo de cada mezcla asfáltica aplicando el análisis de caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdidas por desgaste (Norma española NLT-352/86). Como conclusión de este estudio, se determinó que la cal hidratada, posee un desempeño superior al hidróxido de calcio y vuelve más flexible al pavimento asfáltico aumentando su resistencia al desgaste abrasivo que se genera por su uso.

A pesar de los resultados obtenidos, el estudio se limitó a un análisis de efectos abrasivos y muchas interrogantes quedaron pendientes de solucionar. Como estudiante de ingeniería y parte del equipo de colaboradores del CI+D de Cementos Progreso S.A. y Horcalsa se propuso continuar profundizando en la investigación, a quienes se agradece el apoyo no solo económico sino también de recurso humano y técnico brindado para la realización del presente trabajo, el cual permitió incorporar un análisis más exhaustivo para determinar el comportamiento de mezclas asfálticas y establecer las bases para la construcción de un futuro tramo de prueba en escala real, además de las pautas de comportamiento necesarias para realizar un análisis de cambios químicos generados en una mezcla asfáltica.

El presente trabajo es resultado del apoyo económico de Cementos Progreso S.A. junto con la colaboración del laboratorio de asfaltos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala y el laboratorio de control de calidad de la planta asfáltica de la empresa Constructora DISA S.A. de C.V con sede en Quetzaltepeque, El Salvador.

Aprovecho en esta ocasión también para agradecer a todo el personal del CI+D de Cementos Progreso S.A. por su valioso apoyo, amistad y apertura a la transferencia de conocimientos en pro de mejorar la calidad de los materiales para la construcción de una Guatemala mejor y del país en el que todos queremos vivir. En especial a los ingenieros Marco Vinicio Carballo, Ana Miriam Obregón y Hugo González (asesor de la presente investigación), quienes brindaron un seguimiento importante y significaron un gran apoyo durante el desarrollo de todas las actividades referidas con este trabajo.

Al laboratorio de pavimentos asfálticos del CII de la USAC y a la Ing. Dilma Mejicanos por permitirme realizar las pruebas piloto para el diseño de mezclas y familiarización con la metodología de diseño Marshall en sus instalaciones. A constructora DISA S.A. de C.V. por su colaboración, principalmente al equipo de laboratorio y gerente de planta Luis López, por el conocimiento que nos ha permitido adquirir a raíz de su experiencia y el trabajo de su equipo ya que sin su valiosa ayuda este estudio no hubiera podido haberse llevado a cabo. A mi casa de estudios, la Universidad del Valle de Guatemala, por toda la formación de excelencia académica que he recibido y conocimientos que he aprendido para mi formación como profesional.

Finalmente, agradezco a Dios por la culminación de una etapa importante en mi vida la cual ha estado acompañada de un desarrollo profesional y humano sumamente grande en compañía de toda mi familia, especialmente de mis padres, José Luis y Haydee Maryella a quienes debo todo, dedicándoles especialmente este trabajo de graduación y todos los logros personales derivados de mis estudios, ya que con su apoyo e inspirado en su ejemplo de perseverancia, he podido alcanzar cada una de las metas que me he propuesto. A toda mi familia, a mi hermano Luis Andrés, abuelos, tíos y primos quienes me han acompañado de manera muy particular en distintos momentos y a quienes agradezco toda su compañía. A mis compañeros de universidad, en especial a mis amigos de carrera a quienes considero familia, de quienes he aprendido tantas cosas y que me llevo tantos recuerdos.

CONTENIDO

PREFACIO	vi
LISTA DE CUADROS	xi
LISTA DE GRÁFICOS.....	xiii
LISTA DE ECUACIONES	xv
RESUMEN.....	xvi
GLOSARIO.....	xvii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. JUSTIFICACIÓN.....	4
III. OBJETIVOS.....	7
A. Objetivo general	7
B. Objetivos específicos.....	7
IV. MARCO TEÓRICO	8
A. Tipos de pavimentos.....	8
B. ¿Qué es una mezcla asfáltica en caliente?.....	11
C. Proceso de mezclado en planta.....	12
D. Caracterización de mezclas asfálticas	13
E. Tipos de asfaltos.....	18
F. Desgaste y fallas comunes en pavimentos asfálticos.....	22
G. Descomposición química del cemento asfáltico.....	24
H. El proceso de endurecimiento oxidativo del asfalto	26
I. La cal hidratada y su efecto en las mezclas en caliente	27
J. Métodos para la adición de cal hidratada a mezclas asfálticas en caliente (HMA)	31
K. Interacción de la cal con aditivos poliméricos.....	33

L.	Aditivos anti-desnudantes (anti-stripping)	34
M.	Requisitos y pautas para el diseño de mezcla en caliente (HMA)	35
V.	MATERIALES Y METODOLOGÍA	39
A.	Materiales y equipos	39
B.	Metodología	40
C.	Procedimiento	43
VI.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	46
A.	Control de calidad cemento asfáltico	46
B.	Control de calidad de los agregados	47
C.	Ajuste de curva de granulometría y rangos de trabajo	48
D.	Diseño de mezcla asfáltica en caliente sin adición de cal hidratada por el método Marshall	51
E.	Diseño mezcla asfáltica en caliente con adición de 1% cal hidratada por el método Marshall	57
F.	Diseño de mezcla asfáltica en caliente con adición de 2% cal hidratada por el método Marshall	64
G.	Comparación de los parámetros de diseño Marshall entre mezclas asfálticas con cal incorporada	70
H.	Resistencia a la tensión diametral (ITS) de muestras en estado seco	76
I.	Resistencia a la tensión diametral (ITS) de muestras en estado húmedo	77
J.	Resistencia a la tensión (ITS) vs índice de resistencia a la tensión diametral (TSR)	78
K.	Análisis de costos de las materias primas	83
VII.	CONCLUSIONES	91
VIII.	RECOMENDACIONES	93
IX.	BIBLIOGRAFÍA	95
X.	APÉNDICES	99
A.	Resumen de ensayos utilizados en el diseño de mezclas Marshall y ensayos complementarios	99
B.	Fotografías de la fase de pruebas piloto y experimental del proyecto	105
C.	Informes de laboratorio para el control de calidad de las materias primas utilizadas.	109
D.	Reología y carta de viscosidad del cemento asfáltico.	128

E.	Libreta de tabulación de resultados para la fase de diseño bajo la metodología Marshall.	130
F.	Tabulación de resultados ensayo de tensión diametral indirecta y susceptibilidad a la humedad. .	137
G.	Documentos de respaldo e información utilizada para análisis de la información	144

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1: Uso actual de cal hidratada incorporada en mezclas asfálticas en Europa.....	3
Cuadro 2: Estado por rodadura de carreteras al año 2012.	5
Cuadro 3: Clasificación de las mezclas asfálticas en caliente según su granulometría.	11
Cuadro 4: Clasificación general de las rocas usadas como agregado para mezclas.	16
Cuadro 5: Propiedades típicas de la cal hidratada en comparación con los rellenos minerales comerciales.	18
Cuadro 6: Adiciones utilizadas para la modificación de bitumen.	21
Cuadro 7: Métodos de incorporación de cal como filler de mezcla asfáltica.	33
Cuadro 8: Propiedades generales de aditivos comúnmente utilizados como mejoradores de adherencia.	35
Cuadro 9: Requisitos de mezclas diseñadas por método Marshall según tabla 401-1.....	36
Cuadro 10: Porcentaje mínimo de vacíos (VMA) requerido en mezclas.	36
Cuadro 11: Límites permisibles para el agregado grueso establecidos por Caminos.	37
Cuadro 12: Límites permisibles para el agregado fino establecidos por Caminos.	37
Cuadro 13: Gradación de los agregados para pavimentos de concreto asfáltico según ASTM D 3515.	38
Cuadro 14: Granulometría de cal hidratada para adición a mezclas en caliente según AASHTO M17.	38
Cuadro 15: Categorización y codificación de briquetas.	41
Cuadro 16: Ensayos de caracterización de mezclas asfálticas con incorporación de cal como aditivo.	42
Cuadro 17: Clasificación de asfalto por viscosidad según Tabla 2 ASTM D 3381-05.	46
Cuadro 18: Resumen para carta de viscosidad-temperatura para asfalto AC-30 según ASTM D-2493.	46
Cuadro 19: Control de calidad de agregados para mezcla y ajuste de granulometría según libro azul.	47
Cuadro 20: Propiedades físicas y volumétricas de los agregados pétreos.	48
Cuadro 21: Granulometría de los agregados y mezcla combinada con adiciones de cal hidratada.	49
Cuadro 22: Variación de la gravedad específica seca de la mezcla de agregados con la modificación del contenido de cal hidratada.	50
Cuadro 23: Resultados promedio de diseño Marshall de muestra patrón.	56
Cuadro 24: Resumen final para control de diseño de mezcla	57
Cuadro 25: Resultados promedio de diseño Marshall de muestra con 1% de cal hidratada.	63
Cuadro 26: Resumen final para control de diseño de mezcla con 1% de cal hidratada.	63
Cuadro 27: Resultados promedio de diseño Marshall de muestra con 2% de cal hidratada.....	69
Cuadro 28: Resumen final para control de diseño de mezcla con 2% de cal hidratada.....	69
Cuadro 29: Resumen de diseño Marshall para mezclas asfálticas y resultados experimentales.....	70
Cuadro 30: Susceptibilidad a la humedad en ensayo a la tensión indirecta y cálculo del índice TSR.	79

Cuadro 31: Costo de materias primas utilizadas para optimización de diseños	83
Cuadro 32: Costo unitario de mezcla asfáltica en caliente con distintas soluciones de diseño de mezcla. ...	84
Cuadro 33: Resumen de resultados del análisis Costo-Beneficio.....	86

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Días de envejecimiento necesarios para alcanzar el mismo porcentaje de pérdidas por desgaste sin envejecimiento y sin filler (Condición de control) en mezclas con filler incorporado y envejecido.	2
Gráfico 2: Evolución de las carreteras pavimentadas en Guatemala entre 1990-2013.	4
Gráfico 3: Clasificación de la infraestructura vial en Guatemala por tipo de rodadura al año 2013	5
Gráfico 4: Granulometría combinada de los agregados para la muestra patrón (0) sin cal.	49
Gráfico 5: Vacíos con aire presentes en la mezcla en función del contenido de asfalto.	51
Gráfico 6: Vacíos en el agregado mineral en función del contenido de asfalto.	52
Gráfico 7: Vacíos rellenos con asfalto en función de contenido de asfalto	52
Gráfico 8: Gravedad específica de la mezcla compactada en función del contenido de asfalto.	53
Gráfico 9: Gravedad específica teórica máxima en función del contenido de asfalto.	53
Gráfico 10: Flujo en función del contenido de asfalto	54
Gráfico 11: Estabilidad en función del contenido de asfalto.	54
Gráfico 12: Módulo de Marshall en función del contenido de asfalto	55
Gráfico 13: Relación filler-asfalto.	55
Gráfico 14: Densidad de la mezcla como función del contenido de asfalto.	56
Gráfico 15: Vacíos con aire presentes en la mezcla en función del contenido de asfalto.	58
Gráfico 16: Vacíos en el agregado mineral en función del contenido de asfalto.	58
Gráfico 17: Vacíos rellenos con asfalto en función de contenido de asfalto	59
Gráfico 18: Gravedad Bulk de la mezcla compactada en función del contenido de asfalto.	59
Gráfico 19: Gravedad específica teórica máxima en función del contenido de asfalto.	60
Gráfico 20: Flujo en función del contenido de asfalto	60
Gráfico 21: Estabilidad en función del contenido de asfalto.	61
Gráfico 22: Módulo de Marshall en función del contenido de asfalto	61
Gráfico 23: Relación filler-asfalto.	62
Gráfico 24: Densidad de la mezcla como función del contenido de asfalto.	62
Gráfico 25: Vacíos con aire presentes en la mezcla en función del contenido de asfalto.	64
Gráfico 26: Vacíos en el agregado mineral en función del contenido de asfalto.	64
Gráfico 27: Vacíos rellenos con asfalto en función de contenido de asfalto	65
Gráfico 28: Gravedad Bulk de la mezcla compactada en función del contenido de asfalto	65
Gráfico 29: Gravedad específica teórica máxima en función del contenido de asfalto	66
Gráfico 30: Flujo en función del contenido de asfalto	66

Gráfico 31: Estabilidad en función del contenido de asfalto.	67
Gráfico 32: Módulo de Marshall en función del contenido de asfalto	67
Gráfico 33: Relación filler-asfalto.....	68
Gráfico 34: Densidad de la mezcla como función del contenido de asfalto.	68
Gráfico 35: Comparativo de densidades.....	71
Gráfico 36: Comparativo de vacíos	71
Gráfico 37: Comparativo vacíos en el agregado mineral	71
Gráfico 38: Comparativo de vacíos rellenos de asfalto	71
Gráfico 39: Comparativo de gravedad Bulk.....	72
Gráfico 40: Comparativo de gravedad Rice	72
Gráfico 41: Comparativo Flujo	72
Gráfico 42: Comparativo de Estabilidad	72
Gráfico 43: Comparativo de filler/asfalto.....	73
Gráfico 44: Comparativo de módulo Marshall.....	73
Gráfico 45: Tensión diametral de muestras compactadas a 15 golpes en condición seca	77
Gráfico 46: Tensión diametral de muestras compactadas a 15 golpes en condición húmeda	77
Gráfico 47: Comparación de la tensión diametral en condición seca vs húmeda.....	78
Gráfico 48: Cambios en el índice a la tensión indirecta bajo efectos del daño por humedad con la adición de cal hidratada.....	80
Gráfico 49: Índice de resistencia a la tensión.	81
Gráfico 50: Cambio del TSR de las dosificaciones con relación a la muestra patrón.	82
Gráfico 51: Costos unitarios de mezcla con incorporaciones de aditivos y filler mineral.....	84
Gráfico 52: Análisis del costo-beneficio de la resistencia a tensión indirecta (ITS) de briquetas de asfalto calculado a través de la Ecuación 4.	86
Gráfico 53: Análisis costo-beneficio del cambio en la resistencia a la tensión indirecta (ITS) de briquetas de asfalto calculado a través de la Ecuación 5.....	87
Gráfico 54: Relación costo/beneficio de los resultados obtenidos para el TSR de las distintas dosis calculado a través de la Ecuación 4.	88
Gráfico 55: Relación costo-beneficio 2 de las dosificaciones en función del cambio en el precio unitario de la tonelada de mezcla asfáltica en caliente y el cambio en el TSR observado en la mezcla calculado a través de la Ecuación 5.	89

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación	Página
Ecuación 1: Gravedad específica de la mezcla de agregados	50
Ecuación 2: Cálculo de la resistencia a la tensión diametral.	76
Ecuación 3: Cálculo del índice de resistencia a la tensión diametral	79
Ecuación 4: Relación Costo-Beneficio 1 para analizar el desempeño de materias primas contra los valores de resistencia a tensión diametral y el valor de susceptibilidad a la humedad.	85
Ecuación 5: Relación Costo-Beneficio 2 respecto al costo añadido de la mejora en el desempeño a la tensión indirecta y susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas con respecto al cambio en el daño por humedad	85

RESUMEN

A nivel mundial, el cemento asfáltico es el material más utilizado para la construcción de carreteras. En los últimos años, la optimización de los procesos de refinación del crudo ha ocasionado una disminución en la calidad del asfalto el cual se obtiene de la destilación del petróleo y es utilizado como material cementante en mezclas asfálticas en caliente. Debido a esta disminución en la calidad del ligante, la industria para la producción de mezclas asfálticas se ha visto obligada a mejorar las propiedades de las mezclas asfálticas para aumentar su vida útil realizando incorporaciones de polímeros y aditivos que corrijen los comportamientos y el desempeño de un pavimento. Como respuesta a esta necesidad, en la presente investigación se analizaron los cambios generados por la incorporación de cal hidratada en proporciones controladas sobre el peso de los agregados. En el estudio se analizan las propiedades volumétricas, la estabilidad-deformación y la susceptibilidad de la mezcla asfáltica al daño por humedad. Para ello, se fabricaron un total de 90 probetas asfálticas fabricadas bajo la metodología Marshall incorporando diversos contenidos de cal hidratada.

Al final de la investigación se pudo encontrar que añadir cal hidratada en dosificaciones entre un 1.5%-2% sobre el peso del agregado en seco permite reducir la cantidad requerida de cemento asfáltico asfalto para cumplir con los requisitos de volumen de vacíos en el diseño, además de volver más flexible una mezcla. Dentro de los hallazgos de este trabajo, también se pudo comprobar la acción “anti-stripping” de incorporar cal hidratada con la que casi se llegó a igualar el desempeño de un aditivo líquido usado para reducir los daños por efectos de humedad en la mezcla asfáltica. La investigación queda abierta a su validación utilizando la metodología de diseño “Superpave” y otros ensayos mecánicos que permitan caracterizar de mejor manera la mezcla asfáltica en caliente. Al final del trabajo se presentan las conclusiones principales de la experimentación y las principales recomendaciones que deben tomarse en cuenta para hacer uso de esta solución. Los ensayos de agregados, diseños de mezcla y ensayo de probetas se realizan usando como referencia las normativas ASTM, AASHTO, SIECA y COGUANOR.

GLOSARIO

Adhesividad: Es la propiedad que posee el asfalto de resistir a la separación del aglutinante en contacto con los agregados bajo el efecto de acciones exteriores, por ejemplo, en presencia de agua (Instituto Salvadoreño del Asfalto, 2012).

Aditivo Morelife 5000: Aditivo líquido color café oscuro a base de aminos agregado en una dosificación fija con respecto al peso de asfalto en un diseño de mezcla con el objetivo de mejorar las propiedades de adherencia de la interfase bitumen-agregado. Se agrega como un aditivo anti-desvestimiento que reduce los efectos que produce la presencia de humedad en una mezcla asfáltica en caliente.

Análisis espectrofotométrico: La espectrofotometría es una técnica de análisis óptico que utiliza haces del espectro electromagnético para captar la cantidad de energía que un compuesto absorbe o transmite en función de longitudes de onda del rango UV y de luz visible. Este permite determinar la concentración en una solución, determinar estructuras moleculares y grupos funcionales específicos de un compuesto. Es un procedimiento no rutinario que permite una observación más profunda de las causas y efectos de cambios químicos experimentados por el ligante bituminoso (Bianchetto H. e., 2008).

Asfaltenos: Son fracciones de hidrocarburo de alto peso molecular, precipitada por medio de un solvente parafínico de nafta, usando una proporción específica de solvente-asfalto. Es un componente de la estructura físico- química del asfalto, constituyendo los núcleos de hidrocarburos más pesados. A los asfaltenos los rodean las resinas, que constituyen la fase intermedia de dicha estructura y finalmente, ocupando el espacio restante, se encuentran los aceites. Proporcionan al asfalto su color y dureza (Instituto Salvadoreño del Asfalto, 2012).

ATPB: Siglas utilizadas para hacer referencia a una base permeable tratada con Asfalto (“Asphalt treated Permeable Bases”). Es una base permeable que se utiliza por debajo de carpetas asfálticas en caliente densas y de SMA, con el objetivo de facilitar la evacuación de agua por debajo de la superficie. Los pavimentos con este tipo de base requieren de un sistema de drenaje incorporado para evacuar el agua de la estructura (FHWA, 2001).

Ductilidad: Esta propiedad física se refiere a la habilidad de una sustancia de ser estirada o estrechada en forma delgada sin romperse. Aun cuando la ductilidad se considera como una característica importante del cemento asfáltico en muchas de sus aplicaciones, la presencia o ausencia de ductilidad es generalmente

considerada más importante que el mismo nivel de ductilidad que este posee (Instituto Salvadoreño del Asfalto, 2012).

Emulsión: Una emulsión puede definirse como una dispersión fina de un líquido en otro los cuales están unidos entre sí por un agente emulsificante que tiene funciones tanto hidrofóbicas como hidrofílicas. En el caso de una emulsión asfáltica

Emulsión MC: Se refiere a emulsiones asfálticas de curado medio.

Emulsión RC: Se refiere a una emulsión de curado rápido (“Rapid curing”).

Emulsión SC: Se refiere a emulsiones asfálticas de curado lento (“Slow curing”).

Ensayo al Cantabro: Este ensayo hace referencia al procedimiento estándar de ensayo para la caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste NLT-352/86. El procedimiento estándar permite determinar el valor de la pérdida por desgaste abrasivo de mezclas bituminosas abiertas con un TMNA de 25mm empleando la máquina de Los Ángeles (MOP Paraguay, 2011).

EVA: El Etil-Vinil-Acetato es un modificador de asfaltos que mejora la resistencia a las roderas de las mezclas asfálticas, disminuye la susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura y mejora su comportamiento a altas temperaturas. Se utiliza en climas calientes, en mezclas asfálticas para carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales (Maxil, 2014).

Grado de penetración: Es una medida de la dureza y la consistencia del asfalto. El grado de penetración mide la consistencia de un material bituminoso expresado como la distancia en décimas de milímetro (0,10 mm) que una aguja estándar penetra verticalmente en una muestra de material bajo condiciones especificadas de carga, tiempo y temperatura Esta se realiza a través de la ejecución del ensayo ASTM D5 en el cual se mide a 25°C cual es la distancia penetrada por una aguja de 100g de peso una muestra de bitumen (ASTM, 2013). El grado de penetración es utilizado para caracterizar y explicar los cambios en la consistencia del asfalto debido a variaciones en la temperatura.

ITS: La resistencia a la tracción indirecta (“Indirect Tensile Strength”) se refiere al valor de resistencia que soporta una probeta asfáltica al someterla al ensayo ASTM D 6931. Los valores de la ITS se pueden utilizar para evaluar la calidad relativa de las mezclas bituminosas en conjunto con otras pruebas de laboratorio usadas en el diseño de mezclas para poder estimar el potencial de ahuellamiento o fractura de un pavimento. Los resultados pueden ser utilizados también para determinar el potencial de daño por humedad que puede

sufrir un pavimento en campo cuando los resultados se obtienen para especímenes en condiciones de humedad como sin someterlos a esta condición (ASTM, 2013).

MAC: Siglas utilizadas para referirse a una mezcla asfáltica en caliente.

Mastico asfáltico: Mezcla pastosa de constitución diversa que sirve como interfaz de relleno y pega del agregado grueso en una mezcla asfáltica (Instituto Salvadoreño del Asfalto, 2012). El mastico está constituido por la mezcla de ligante asfáltico con el polvo o filler mineral presente en una mezcla.

Maltenos: Fracción aceitosa, estable y ligera del asfalto que está formada por resinas y aceites, que se separan de los asfaltenos por floculación o empleando un éster del petróleo (Instituto Salvadoreño del Asfalto, 2012).

OGCF: Conocida por sus siglas mezclas de gradación abierta de alto nivel de fricción superficial (“Open Graded Friction Courses”), es una mezcla asfáltica de pavimentación dosificada en planta que posee un alto volumen de vacíos lo cual permite que el agua de lluvia que entra en contacto con esta superficie pueda ser drenada a lo largo de la carretera y hacia afuera del hombro. Este tipo de mezcla se caracteriza por tener una curva granulométrica discontinua con un alto porcentaje de partículas de agregado grueso. Este tipo de mezcla evita la acumulación de agua en la carpeta de rodadura a la vez que aumenta el potencial de adherencia de las llantas a la misma con una reducción del ruido que se produce al transitarla (FHWA, 2001).

PAV: “Pressurized Aging Vessel”, cuando se usan estas siglas se hace referencia al recipiente normalizado según ASTM D 6521 que permite mediante alta presión y temperatura oxidar el ligante asfáltico. En este ensayo, la cámara a presión permite simular los cambios que ocurren en la reología del ligante debido a la oxidación del mismo a lo largo de todo su periodo de servicio. Los residuos de esta práctica acondicionada pueden ser usados para estimar las propiedades físicas o químicas de ligantes asfálticos después de varios años de envejecimiento en servicio en el campo (ASTM, 2013).

PG: Hace referencia a la categoría de clasificación por grado de desempeño (Performance Grade) de un ligante asfáltico la cual indica las temperaturas máxima y mínima promedio de 7 días a la que se recomienda utilizar un ligante. Esta clasificación pretende discriminar entre ligantes basándose en los cambios en los esfuerzos, deformaciones y propiedades físicas fundamentales del material provocados por diferentes temperaturas de servicio y condiciones de oxidación para clasificar un ligante en conformidad con la norma ASTM D 6373 (ASTM, 2013).

PPA: Siglas para referirse a los ácidos poli-fosfóricos (“Polyphosphoric acid”). Se incluyen para aumentar la durabilidad de los asfaltos.

RAP: “Reclaimed Asphalt Pavements”, Son pavimentos asfálticos que contienen como materia prima agregados y material pulverizado de carpetas asfálticas recicladas los cuales han sido sometidos a un proceso de molienda y pulverización previo a su reutilización en una carpeta de rodadura (FHWA, 2001).

Riego de liga: Consiste en la acción de aplicar una capa de emulsión asfáltica uniforme sobre una superficie de asfalto existente con el objetivo de garantizar la buena adherencia entre la capa antigua y la capa de nueva de asfalto a colocar en un pavimento.

Rutting: Conocido como ahuellamiento, el término se refiere al estado de falla estructural de un pavimento flexible en el que debido a las condiciones de temperatura y demandas de carga en condiciones de servicio, la carpeta de rodadura se deforma tanto que se supera el límite de las deformaciones elásticas permisibles en el mismo, ocasionando la formación de surcos en la carpeta de rodadura los cuales pueden ser percibidos por un conductor al hacer uso de una carretera y que pueden presentar un riesgo en el manejo a través de la misma.

RTFOT: Se utilizan estas siglas para hacer referencia al método estándar de ensayo para el efecto del calor y el aire en una película de asfalto en movimiento o ensayo del horno rotatorio de película delgada (“Rolling Thin Film Oven Test”). La metodología contenida dentro de la norma ASTM D 2872, detalla los procedimientos y equipo que deben de utilizarse con el objetivo de poder simular el proceso de oxidación que sufre el ligante asfáltico durante su proceso de calentamiento y mezclado en planta para la producción de mezclas. El método pretende simular estas condiciones para el posterior estudio de los cambios en las propiedades fundamentales de un ligante asfáltico como la viscosidad, volatilidad del asfalto y otras propiedades reológicas (ASTM, 2013).

SB: El Estireno-Butadieno es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas tanto a altas como a bajas temperaturas. Está construido con base en bloques de estireno y es utilizado en mezclas asfálticas de aplicación en carpetas delgadas y carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito y vehículos pesados, climas fríos y cálidos, así como en emulsiones que usen tratamientos superficiales (Maxil, 2014).

SBS: Siglas utilizadas para referirse al polímero estireno-butadieno-estireno, es un material polimérico termoplástico, sólido a temperatura ambiente, donde el estireno provee rigidez al polímero, pero con la consecuencia que individualmente es quebradizo. El butadieno provee de elasticidad al SBS puesto que es capaz de absorber energía. Por tanto, la molécula de SBS tiene propiedades visco-elásticas mejoradas (Villegas, Aguiar, Loria, & Navas, 2012).

SMA: “Stone matrix asphalt” Conocida como una mezcla asfáltica en caliente especial, requiere de un riguroso control de calidad de los materiales y producción para obtener las propiedades de desempeño para las que fue diseñada. Utiliza agregados de piedra triturada con alta resistencia a la abrasión y arenas trituradas. Utilizan una mezcla de arena triturada, fillers minerales y aditivos (como pueden ser fibras o polímeros) que producen una matriz rígida lo cual eleva la resistencia al ahuellamiento de una carpeta asfáltica (FHWA, 2001).

Stripping: Este tipo de falla de la mezcla asfáltica ocurre cuando el sitio de pega entre el cemento asfáltico y el agregado se rompe debido al efecto de acciones externas tales como cargas por uso de la carpeta de rodadura o debido a la presencia de humedad. Además de ser un fenómeno químico, también juegan un papel importante en la manifestación de este efecto las características ambientales, el calor, las lluvias, los ciclos de congelamiento y deshielo (cuando ocurren) y el tránsito (Lee, 2007).

Surfactante: También referido como emulsionante, emulgente o agente tenso-activo, es un producto necesario para la preparación de una emulsión y para mantener estable la dispersión del asfalto y el agua. El surfactante es usualmente un detergente que se añade a un líquido para aumentar su capacidad dispersiva reduciendo su tensión superficial. La cantidad de emulsificante varía entre 0.5% a 1.0% en peso respecto a una emulsión. De acuerdo con la cantidad de emulsificante, las emulsiones pueden dividirse por su grado de coagulación (Instituto Salvadoreño del Asfalto, 2012).

TMNA: Las siglas se refieren al término tamaño máximo nominal del agregado, este hace referencia a el tamiz inmediatamente inferior al que pasa el 100% del material, es decir, primer tamiz en el que se retiene material en un análisis granulométrico en conformidad con ASTM C136 (COGUANOR, 2011).

TSR: Siglas para referirse a el índice de resistencia a la tensión (“Tensile Strength Ratio”).

VFA: Los vacíos llenos de asfalto (“Voids Filled with Asphalt”) matemáticamente se refieren a la relación entre el volumen de asfalto efectivo y el volumen de vacíos presente en la mezcla compactada de agregado mineral. Es una relación análoga al concepto de grado de saturación de un suelo (Anguas, 2005).

VMA: El término vacíos en el agregado mineral (“Voids in Mineral Aggregate”) matemáticamente se refiere a la relación entre el volumen de asfalto efectivo más el volumen de aire y el volumen total de la mezcla compactada. Es una relación análoga al concepto porosidad de un suelo (Anguas, 2005).

I. INTRODUCCIÓN

El uso de la cal en mezclas asfálticas calientes se remonta a la década de 1910 iniciando su implementación en Estados Unidos donde se ha demostrado desde hace años que la incorporación de cal mejora la resistencia a la humedad en las mezclas asfálticas. A pesar de este antecedente, actualmente en nuestro país esta investigación y práctica no se ha tratado a profundidad. Estudios previos han mostrado que la presencia de mezclas y lechadas con cal reducía los cambios generados en el asfalto debido a la humedad. Dentro de los beneficios que proporciona la cal a una mezcla asfáltica se pueden mencionar que:

- Aumenta la resistencia a la rotura de mezclas calientes.
- Mejora la dureza y la resistencia ante el crecimiento de fracturas a bajas temperaturas.
- Modifica la reacción de oxidación que ocurre en la carpeta asfáltica reduciendo el endurecimiento con el correr de los años.

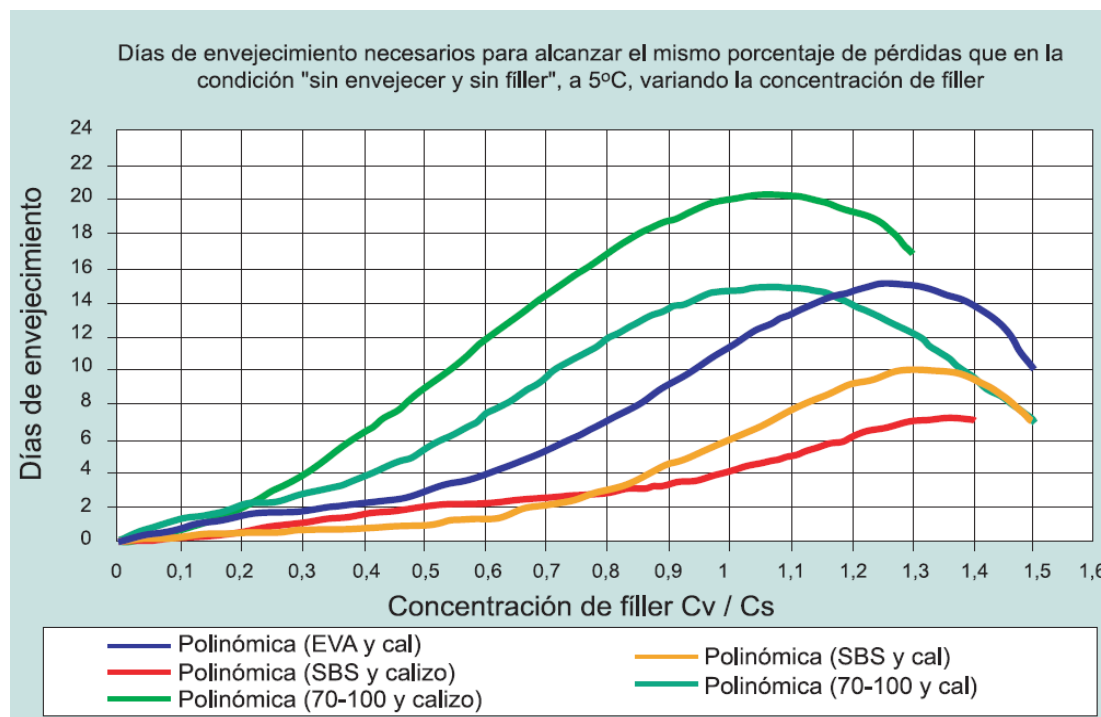
En el año 2009, basados en estudios previos y documentación de Estados Unidos, el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso realizó un estudio sobre el uso de cal Horcalza como aditivo en mezclas de asfálticas observando buenos resultados para el estudio exploratorio sobre el mejoramiento de sus propiedades a través del uso de la cal. Los resultados de laboratorio realizados a las mezclas asfálticas en caliente con las diferentes dosificaciones de cal horcalza indican estadísticamente que los parámetros de diseño Marshall de estabilidad, flujo y resistencia a la tracción indirecta (Tensile Strength Ratio), son mejorados, prediciendo con ello un mejor desempeño de las mezclas asfálticas en campo.

Sin embargo, el principal beneficio respecto al uso de cal en mezclas asfálticas es el aumento en la vida útil de una carretera en el largo plazo. Esto se debe a que la cal hidratada funciona como un aditivo anti-desvestimiento (“anti-stripping”) que aumenta la resistencia a la humedad en las mezclas asfálticas. Además de esto, la cal hidratada también puede ser incorporada a mezclas asfálticas que son fabricadas con asfaltos modificados, donde según investigaciones como la guiada por (Lime Organization, 2003), sus resultados de desempeño en campo han sido superiores, pues las grietas, fisuras y hundimientos son más tardíos en aparecer en comparación con las mezclas asfálticas convencionales sin la incorporación de aditivos.

Cuando la cal es agregada a una mezcla en caliente, esta reacciona con los agregados endureciendo los espacios vacíos entre la piedra y el betún. Además de reaccionar con el agregado, la cal reacciona con el asfalto formando sales insolubles que repelen el agua. Las fallas usuales de agrietamiento y hundimiento en asfaltos ocurren debido a que la humedad separa los aglutinantes de la mezcla. Todos los aglutinantes de un asfalto son muy sensibles a las condiciones de exposición climática a la que se someten, además de las cargas de rodadura y uso de la carpeta. Un estudio realizado por (Bianchetto H. e., 2007) demuestra que, en pruebas de desgaste por envejecimiento y abrasión, las pérdidas abrasivas de material se incrementan a temperaturas bajas y medias. Sin embargo, cuando hay presencia de grandes concentraciones de cal adicionada a la mezcla (sin pasar los límites de concentración crítica), las pérdidas abrasivas se ven disminuidas, siendo muy notorio

este efecto a bajas temperaturas. En otras palabras, abrasivamente una mezcla asfáltica con contenido de cal sometida a envejecimiento se comporta del mismo modo que una mezcla asfáltica sin cal que se encuentra completamente nueva y no sometida a un desgaste. Tal efecto puede observarse claramente en el Gráfico 1 donde se muestra que sumada a la acción de polímeros la cal cambia el comportamiento de abrasión de una mezcla asfáltica, comportamiento que motiva a investigar más sobre la incorporación de cal en una mezcla HMA (“Hot Mix Asphalt”).

Gráfico 1: Días de envejecimiento necesarios para alcanzar el mismo porcentaje de pérdidas por desgaste sin envejecimiento y sin filler (Condición de control) en mezclas con filler incorporado y envejecido.



(Bianchetto H. e., 2007)

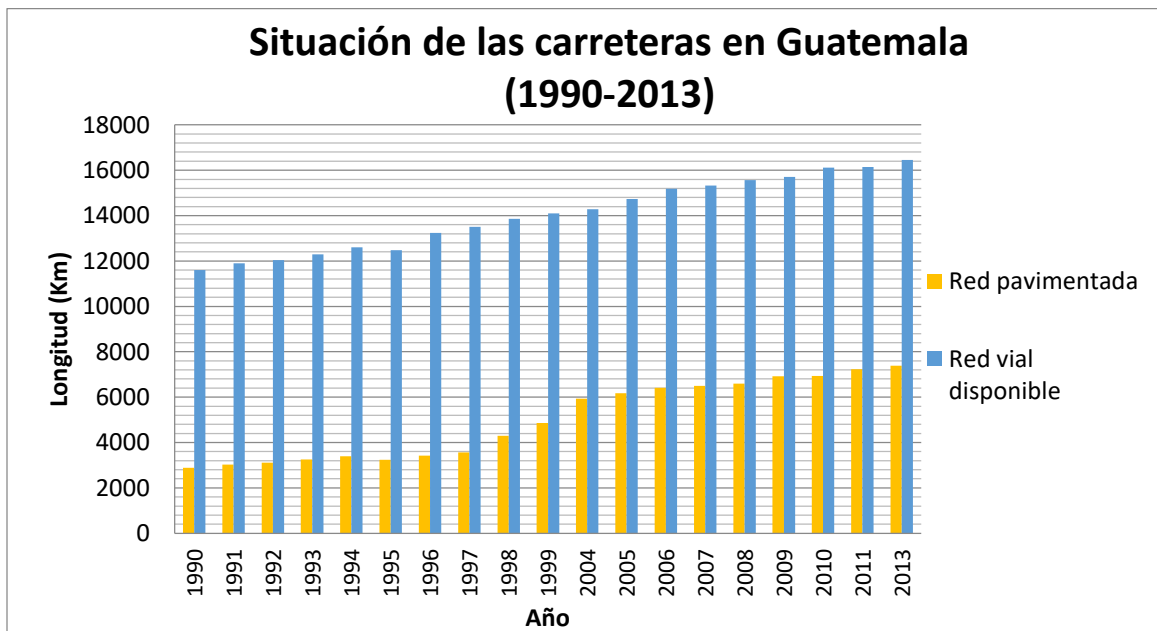
La fatiga y las bajas temperaturas son factores que deterioran un asfalto y la cal contribuye a reducir esta incidencia debido a la formación de enlaces polares cuando la cal entra en contacto con el asfalto y la piedra. A pesar de que la cal mejora las propiedades de envejecimiento y resistencia a la humedad, valores de concentración altos pueden ser contraproducentes en las mezclas asfálticas, pues la concentración de mucha cal rigidiza el mastico asfáltico haciendo que las mezclas asfálticas sean susceptibles a fallas por agrietamiento. Por este motivo es de suma importancia controlar la concentración del material con el objetivo de impedir que el asfalto pierda las propiedades de un buen material usado en la construcción de carreteras.

El uso de la cal como una adición en mezclas asfálticas se encuentra difundido en los Estados Unidos y Europa, siendo el primero el que más lo utiliza para evitar el agrietamiento de sus carreteras debido a cambios de temperatura y presencia de humedad. En Estados Unidos se estima que aproximadamente el 10% de las mezclas asfálticas utilizadas en pavimentación contienen pequeñas dosificaciones de cal hidratada y

II. JUSTIFICACIÓN

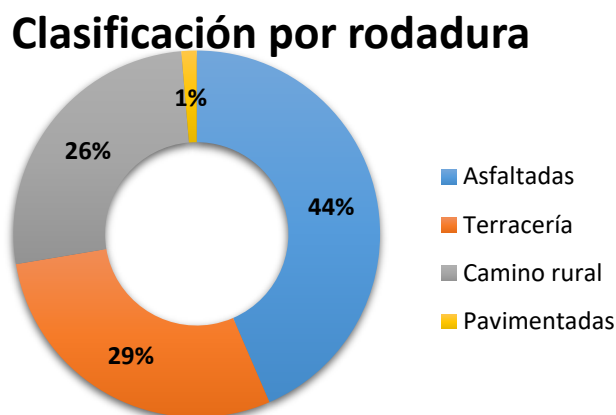
Guatemala es un país en vías de desarrollo que invierte entre US\$ 280-400 Millones/año en proyectos de mejoramiento de carreteras a nivel nacional, teniendo un gasto presupuestado para el año 2014 de US\$ 412.55 millones. Información obtenida del reporte anual del estado de las carreteras preparado por (CIV, 2013) muestra que la red vial nacional de Guatemala cuenta con una longitud de 16,456 Km de carreteras, la cual se descompone en un 44% de carreteras construidas con cemento asfáltico, 1% construida con caminos pavimentados de concreto y el restante 55% de la red en vías no pavimentadas. A pesar de los esfuerzos monetarios que se invierten en la mejora de las condiciones de los pavimentos en Guatemala, uno de los más grandes retos ha sido siempre el poder mantener las vías pavimentadas en buenas condiciones, pues cada vía año con año presenta deterioros que conllevan a intervenciones de reparación que limitan la posibilidad de invertir en pavimentar las vías que aún no han sido pavimentadas. Como puede observarse en el Gráfico 2, a pesar de haber una tasa de crecimiento en la red vial pavimentada cada año, aún haya una gran cantidad de caminos que requieren atención. Uno de los gastos más grandes que debe de realizarse al construir una carretera ocurre años después de que se comenzó a utilizar en donde empiezan a aparecer daños a la estructura del material ocasionada por los cambios de temperatura y desgaste por uso, lo cual obliga a realizar rehabilitaciones. Por este motivo, surge la interrogante de qué medidas pueden tomarse en cuanto a los materiales de construcción y su buen uso para contribuir al desarrollo sostenible y a mejorar la economía del país al generar soluciones para el largo plazo que requieran de menor mantenimiento y que tengan mayor vida útil.

Gráfico 2: Evolución de las carreteras pavimentadas en Guatemala entre 1990-2013.



(BID, 2014) y (CIV, 2013)

Gráfico 3: Clasificación de la infraestructura vial en Guatemala por tipo de rodadura al año 2013 .



(CIV, 2013)

Cuadro 2: Estado por rodadura de carreteras al año 2012.

Estado de carreteras	Longitud (Km)	% De red vial
Asfaltadas	7159,900	43.5%
Terracería	4747.400	28.8%
Camino rural	4326.630	26.3%
Pavimentadas	222.100	1.3%
Red vial total	16456.0	

(CIV, 2013)

Numerosos estudios realizados en el extranjero y consultas de documentos científicos sobre el mejoramiento del desempeño de mezclas asfálticas, indican que la cal puede asumir un papel sumamente importante en el mercado de pavimentos de asfalto a nivel centroamericano, un mercado en el que aún no se ha explotado su uso. En comparación con otros materiales usados para la construcción de carreteras, actualmente es bajo el uso del concreto como material constituyente de la red vial pero su participación cada día es mayor. Este aumento en la demanda y la competitividad de las soluciones constructivas requiere una mejora continua en el uso de los materiales y una modernización de los procesos productivos de mezclas. Se ha observado que la cal puede ingresar dentro del mercado de asfaltos como una adición de relleno activo para el mejoramiento de sus propiedades físicas y químicas respecto al desgaste pues se ha demostrado que prolonga la vida útil del mismo y reduce considerablemente los costos de mantenimiento a un mediano plazo.

El uso de los aditivos en mezclas asfálticas en caliente permite mejorar de manera considerable las propiedades que tendría la mezcla por sí sola y el caso de la utilización de cal hidratada como aditivo no es la excepción. “La experiencia en campo observada por las Agencias Norteamericanas Estatales asegura que el uso de la cal como un aditivo en dosificaciones de entre 1-1.5 % (basado en el peso del agregado seco) en la mezcla incrementa la durabilidad de las mezclas asfálticas” (EULA, European Lime Association, 2010).

Por esta razón, la presente investigación se realiza con el objetivo de fundamentar el uso de la cal como adición mineral de mezclas asfálticas en caliente para hacer carreteras más sostenibles y contribuir al crecimiento de Guatemala mediante la preservación y aumento en la vida útil de la red vial.

Existen numerosos estudios de pruebas físicas sobre el mejoramiento de la resistencia al envejecimiento de asfaltos con la adición de cal hidratada, sin embargo, cuando se tratan de explicar químicamente los efectos producidos por su incorporación son pocas las referencias existentes que brindan una explicación sobre el mejoramiento de los ritmos de envejecimiento oxidativo del asfalto. Por este motivo la presente investigación propone determinar un contenido óptimo de cal para la realización de estudios futuros por parte de otros investigadores como una serie de foto-espectrometrías infrarrojas. Este tipo de análisis permitiría analizar los cambios a un nivel microscópico que ocurren con los grupos orgánicos funcionales presentes en una mezcla asfáltica al incorporar cal hidratada en ella.

(Bianchetto H. e., 2008) observó una reducción en la tasa de oxidación del asfalto debido a cambios en la presencia de grupos funcionales como alcoholes, aldehídos, ácidos y sulfóxidos presentes utilizando una técnica de análisis espectrofotométrico por transmitancia. El análisis realizado en esta fase de la investigación se limitó a determinar las proporciones óptimas para el trabajo con cal hidratada y describir cualitativamente algunos cambios observados sin realizar un análisis químico.

En cuanto al diseño de los experimentos del estudio para motivar el uso de la cal como aditivo de asfalto en Centroamérica, las pautas de diseño del manual para la construcción de carreteras y puentes de Caminos, los manuales de SIECA y el instituto del asfalto son tomados en cuenta para cumplir los requisitos de calidad de agregados, granulometría, diseño y poseer estándares de respaldo a nivel regional. Por tanto, en la presente investigación, se utilizaron ensayos de laboratorio normalizados con el objetivo de controlar las variables interventoras en el desempeño del asfalto debido a la inclusión de la cal como aditivo de una mezcla en caliente para determinar la dosificación de cal óptima, así como algunos de los beneficios que esta genera.

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general

- Estudiar la influencia de la adición de cal a mezclas asfálticas para observar y explicar los cambios que esta produce en las propiedades volumétricas, físicas y mecánicas de mezclas asfálticas en caliente (“Hot Mix Asphalt”) de graduación densa.

B. Objetivos específicos

- Evaluar el desempeño de la cal hidratada como adición de relleno reactivo en una mezcla asfáltica realizada en caliente bajo los parámetros de estabilidad, deformación y susceptibilidad a la humedad.
- Determinar si la adición de cal hidratada modifica el contenido de asfalto óptimo a utilizar en una mezcla a través de la comparación de parámetros de diseño por la metodología Marshall.
- Establecer si hay una relación entre el porcentaje de cal presente en la mezcla y el módulo de rigidez de Marshall para el grupo de muestras en estudio.
- Optimizar el uso de la dosificación de cal hidratada en una mezcla de asfalto en caliente para controlar el costo de producción y materias primas en una planta de mezclado.
- Encontrar si existe una relación entre el porcentaje de cal hidratada y los cambios en la susceptibilidad a la humedad de una mezcla, representados por el índice a la tensión indirecta (“Indirect Tensile Strength”) de muestras en condiciones de humedad controlada.
- Comparar el desempeño de la cal hidratada con respecto a un aditivo líquido anti-desvestimiento (“anti-stripping”) a través del ensayo de los efectos de la humedad en una mezcla de cemento asfáltico para pavimentación ASTM D 4867.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Tipos de pavimentos

Una carretera es una obra de infraestructura vial constituida por distintas capas de material diseñadas con el objetivo de cumplir con las demandas geométricas y requisitos de diseño de tráfico en un proyecto. Un pavimento está constituido por una superficie de rodamiento, una base, una sub-base (únicamente en el caso de pavimentos de asfalto) y una sub-rasante. “El pavimento tiene la finalidad de proporcionar una superficie de rodamiento que permita el tráfico seguro y confortable de cualquier vehículo a velocidades operacionales deseadas y bajo cualquier condición climática” (MINECO, 2013). Uno de los aspectos más críticos de su diseño es la capa de rodamiento pues esta se encuentra en contacto directo con diversas condiciones de tráfico vehicular además de estar en contacto con el medio ambiente. Debido a esto la superficie de rodamiento puede variar su espesor dependiendo de las condiciones de tránsito a las cuales va a ser sometido además de requerir estabilidad para evitar los daños por el impulso de rodaduras y la capacidad de resistir el desgaste abrasivo producido por el tránsito de vehículos en movimiento. Otra función de la carpeta asfáltica, además de su aporte estructural en la resistencia de una carretera, es la de aislar las sub-capas del paso del agua. Por este motivo, todo pavimento posee ciertas pautas de diseño que son requisito para resistir a las demandas climáticas y de utilización a las que se ve sometido. Algunas de las características que se toman en cuenta para su diseño son:

- La capacidad de carga que puede soportar debido al tránsito de vehículos.
- La capacidad de drenaje de agua que debe poseer.
- La geometría de la carretera.
- El acabado superficial y condiciones que determinan la textura y seguridad que brinda una capa de pavimento al generar una fricción con los neumáticos.
- La capacidad de incorporarse a otros pavimentos previamente construidos.
- La edad de servicio.
- Los costos de construcción y mantenimiento.

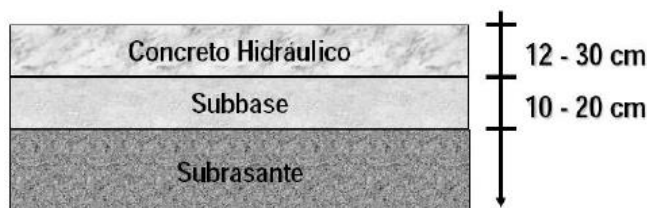
Dependiendo de la localización y uso de un pavimento existen distintas demandas de diseño que un pavimento debe satisfacer. Por ejemplo, en Centro América la entidad encargada que regula la construcción de estas obras es SIECA (Secretaría de Integración Económica Centroamericana) la cual establece lineamientos generales de diseño que deben cumplirse, pautas que son comentadas más adelante.

Estos requisitos se realizan con el objetivo de realizar obras de calidad y que signifiquen un beneficio y herramienta de desarrollo para los vecinos cercanos a estos proyectos. Las aplicaciones de los pavimentos son numerosas y van desde autopistas de alto desempeño hasta caminos peatonales.

Dentro de los pavimentos existen dos grandes grupos, los pavimentos rígidos y los pavimentos flexibles. A pesar de realizar la misma función, cada uno posee características propias que demandan emplear distintas pautas en el diseño. A continuación, se distinguen las características y rasgos principales de cada uno de estos grupos.

1. Pavimentos rígidos. Un pavimento rígido se encuentra compuesto por una superficie constituida de concreto hidráulico. Esta superficie forma una losa que se encuentra apoyada sobre una capa de sub-base que a su vez descansa sobre una capa de suelo compactado llamada sub-rasante. En un pavimento rígido, la losa de concreto cumple con los requisitos de resistencia estructural apropiados de tal manera que no ocurra una falla debido a las cargas aplicadas sobre esta superficie. Este tipo de pavimento posee la propiedad de transmitir esfuerzos muy bajos a sus capas inferiores presentes debido a la alta rigidez que posee. “La resistencia estructural depende principalmente de la losa de concreto y en algunas ocasiones presenta un armado de acero que va de acuerdo con el futuro uso de dicho pavimento” (MINECO, 2013).

Figura 2: Sección transversal típica de un pavimento rígido.



(MINECO, 2013)

Debido a la rigidez de la rodadura construida con concreto, esta trabaja como una losa larga que trabaja a flexión que soporta la demanda de tránsito, esta capa distribuye las cargas sobre la sub-base que a su vez envía un esfuerzo muy bajo a la sub-rasante. El motivo por el que no son utilizadas más capas en su base reside en que el mayor aporte estructural de la carretera lo da la losa de concreto que, además, debe soportar el desgaste abrasivo por el paso del tránsito y las cargas generadas por su utilización. Este comportamiento es una de las principales ventajas que presenta el concreto en cuanto a comportamiento estructural al compararlo con el de un asfalto.

2. Pavimentos flexibles. Los pavimentos de carácter flexible son aquellos constituidos por una carpeta asfáltica a base de material bituminoso como ligante y agregados constituidos por gravas trituradas, arenas y filleres de relleno. Tal y como puede observarse en la Figura 3, (de abajo hacia arriba) la estructura de un pavimento asfáltico está conformada por una sub-rasante conformada por suelo compactado a la que le sigue una sub-base y base compuesta de material granular con arenas combinadas en proporciones

definidas de tal manera que estas funcionan como soporte estructural de una carretera. El propósito de cada una de las capas que lo constituyen es absorber las demandas de carga y distribuir las cargas de tráfico a la sub-rasante.

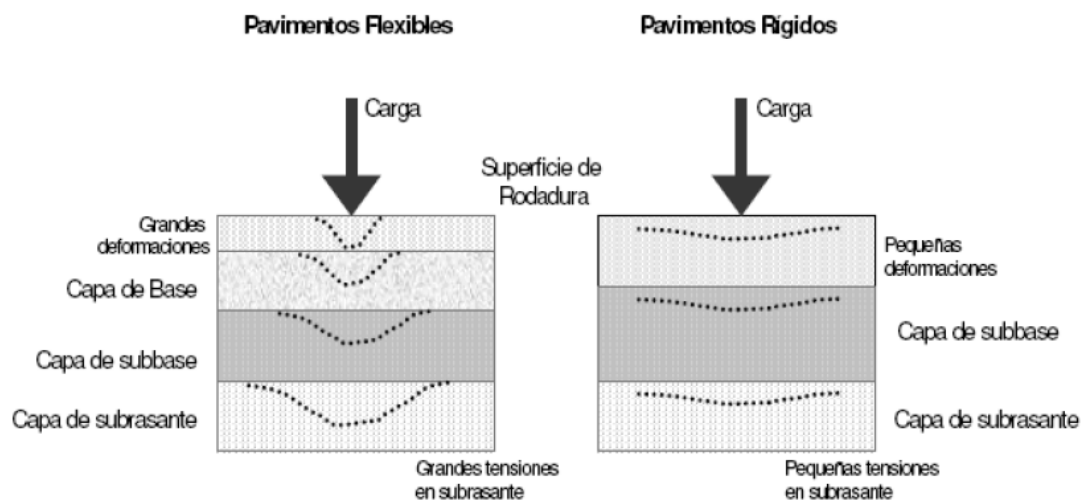
Figura 3: Sección transversal típica de un pavimento flexible.



(MINECO, 2013)

De la calidad de diseño de cada una de las capas depende la capacidad que tiene un asfalto de soportar las demandas de tránsito a lo largo de toda su vida útil. Usualmente las carreteras de este tipo se diseñan con el propósito de alcanzar una vida útil de hasta 20 años, sin embargo, requieren del mantenimiento constante para cumplir con su edad de vida útil. En cuanto su función estructural, en comparación con los pavimentos de concreto hidráulico estos pavimentos están contruidos con materiales poco rígidos, más débiles y en consecuencia más deformables. Debido a esto, la última capa de un pavimento asfáltico, la sub-rasante, sufre una demanda de carga mayor. Por este motivo, la estructura de un pavimento asfáltico incorpora la capa extra de sub-base debido a la necesidad de soportar una deformación más grande.

Figura 4: Comparativo de la distribución de esfuerzos ante las demandas de carga soportadas por cada base constituyente en pavimentos flexibles y rígidos.



(MINECO, 2013)

Un pavimento flexible está constituido por el agregado, el betún como ligante y adiciones o aditivos preservantes que mejoran las propiedades de las mezclas. “Según las propiedades del agregado pétreo de una mezcla, un asfalto puede clasificarse como un mastico, mortero, macadam y concreto asfáltico. Si la temperatura de mezclado se considera, estas pueden dividirse en mezclas en frío y mezclas en caliente. Respecto a contenido de aire, las mezclas son densas si poseen un valor menor al 6%, semi-densas si el valor oscila entre 6-12%, abiertas si su contenido esta entre el 12-18% y porosas si el valor es superior al 20%. La granulometría de los agregados también permite caracterizar a las mezclas como de granulometría continua o discontinua.” (Anguas, 2005). El uso de las mezclas asfálticas en caliente se encuentra extendido de gran manera alrededor de todo el mundo y las dosificaciones de sus materiales constituyentes dependen mucho de los requisitos de diseño de la mezcla. Sin embargo, de manera general en distintas literaturas es típico observar que las mezclas densas contengan entre un 93-97% de agregado y un 3-7% de bitumen con pequeñas incorporaciones de material de relleno (filler) o aditivos.

B. ¿Qué es una mezcla asfáltica en caliente?

Las mezclas asfálticas en caliente o HMA (Hot Mixed Asphalt) son mezclas que requieren del calentamiento de sus materiales constituyentes para ser mezclados de manera homogénea y poder manipularlos. En el caso del bitumen, este se calienta hasta llevarlo a estado líquido alcanzando una viscosidad de diseño según la naturaleza y clasificación del asfalto para asegurar su trabajabilidad durante el mezclado y la colocación pues a temperatura ambiente, el betún se endurece y no puede moldearse fácilmente. La porosidad y permeabilidad de una mezcla asfáltica en caliente endurecida es determinada por lo granulometría de sus agregados y controlada a través de la compactación durante su construcción. Los requisitos de un proyecto determinan el tipo de mezcla que debe diseñarse. Por ejemplo, como puede observarse en el Cuadro 3, la gradación de los agregados no será la misma si la carretera en la que va a colocarse una mezcla será o no sometida a un flujo de tráfico pesado y recurrente o se requiere que drene de manera fácil el agua de lluvia. Debido a esto pueden clasificarse las mezclas por gradación como:

Cuadro 3: Clasificación de las mezclas asfálticas en caliente según su granulometría.

	Granulometría densa	Granulometría abierta	Granulometría escalonada
Tipo de mezcla asfáltica en caliente (HMA)	Convencional: Poseen un TMNA 12.5mm—19mm y son de granulometría bastante continua lo que asegura poco uso de asfalto.	OGFC: densas y porosas con una superficie de fricción grande y reductoras de ruido son granulometrías de TMNA 12.5mm—19mm.	Escalonada: Posee poco contenido de piedras de tamaño intermedio que se vuelve impermeable al ser compactado

Continuación Cuadro 3

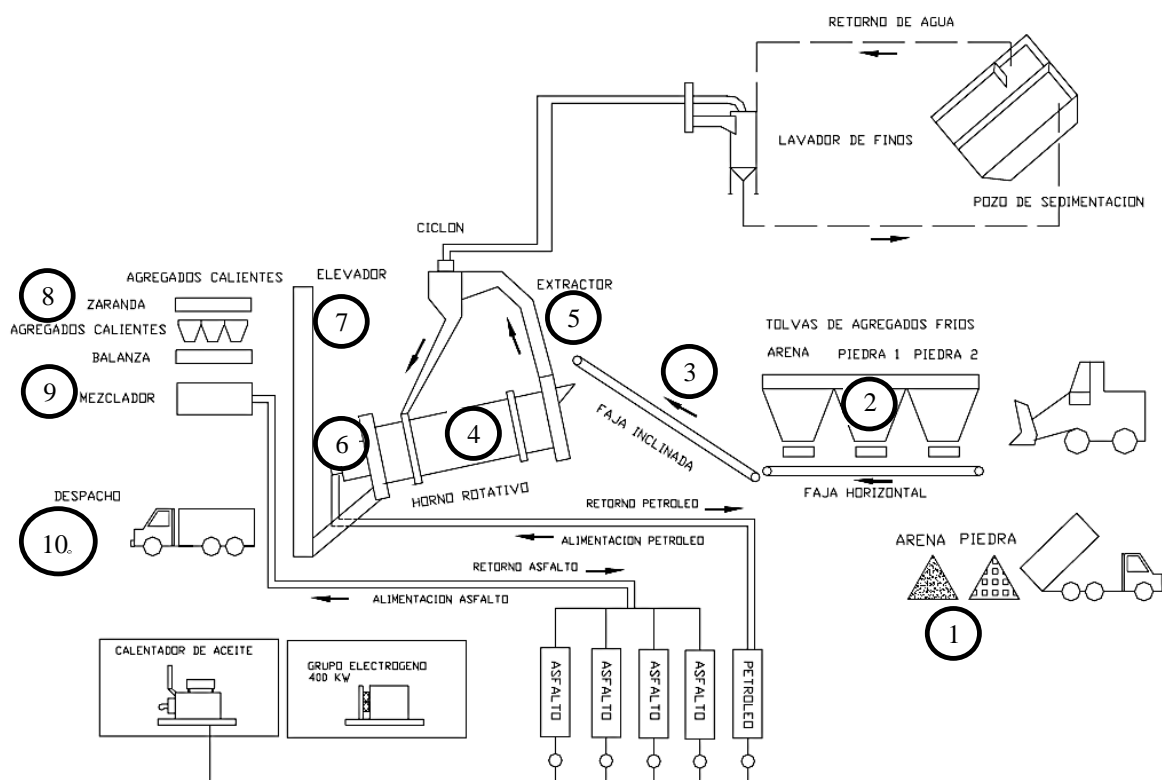
	Granulometría densa	Granulometría abierta	Granulometría escalonada
Tipo de mezcla asfáltica en caliente (HMA)	Piedras grandes: TMNA 25mm-37.5mm.	Base Permeable (ATPB): poseen una base tratada con asfalto y son porosas con TMNA mayor a 25mm.	Mastico de piedra asfáltica (SMA): forma un macizo que requiere la adición de relleno en cantidades para ajustar la curva a un 8-10% que pasa No. 200.
	Arena-Asfalto: TMNA menor a 9.5mm y usa más asfalto que las otras.		

(FHWA, 2001)

Una mezcla en caliente es susceptible a los cambios de temperatura, los cuales pueden alterar la elasticidad del material y el ritmo de envejecimiento de una carretera. Por este motivo en todo ensayo realizado en una mezcla se debe controlar rigurosamente la temperatura de las muestras para hacer posible la comparación de los resultados obtenidos. En cuanto a la terminología utilizada dentro de las mezclas asfálticas es necesario conocer lo siguiente: Cuando se hace referencia a un mastico, este se refiere a una matriz de masa pastosa formada por la mezcla de asfalto con arena o relleno fino, el cual constituye el material presente en la interfaz de pega en los agregados de una mezcla. Cuando se trata de un filler, este material es todo polvo mineral que pasa el tamiz No. 200.

C. Proceso de mezclado en planta

El proceso para la producción de mezcla asfáltica en caliente dentro de una planta se realiza luego de la caracterización completa de las materias primas y el diseño de las dosificaciones a mezclar. El procedimiento inicia por el despacho de agregado a las tolvas de dosificación de los materiales. Seguidamente, el material es dosificado por peso en una proporción correspondiente a la óptima para el diseño de mezcla y transportado por fajas hacia un horno rotativo con un tambor para el mezclado de los materiales. En este horno, el agregado se homogeniza y es calentado por un quemador que evapora el contenido de agua presente en los agregados. La llama del quemador produce un desprendimiento del material más fino que es succionado por un extractor encargado de transportar el material fino hacia un depósito en donde luego se incorpora a la mezcla a través de un sistema de re-inyección. Una vez que los agregados están calientes se incorpora asfalto a la mezcla de agregados en una dosis pre-establecida. Por último, todo el material es mezclado y pesado en una balanza de manera previa a la descarga de la mezcla en camiones para el despacho a obra. A continuación, se presenta un esquema del proceso para la producción de mezcla asfáltica en caliente:

Figura 5: Proceso de mezclado en planta asfáltica¹

D. Caracterización de mezclas asfálticas

1. El bitumen. El bitumen o asfalto es un material ligante formado debido al proceso de destilación utilizado en la refinación de petróleo. Este material es de origen orgánico en donde la mayor parte de sus componentes constitutivos están formados por aceites, resinas y asfáltenos. Los aceites brindan las propiedades de plasticidad y movilidad al material haciendo al asfalto trabajable. Las resinas aportan la propiedad ligante de endurecimiento al asfalto mientras los asfáltenos proporcionan la dureza. El bitumen constituye un material color café oscuro que por sus propiedades dota de consistencia, ductilidad y aglomeración a una mezcla. El material ligante se encuentra en estado líquido a altas temperaturas y es susceptible a los cambios de temperatura. Por este motivo, a excepción de las mezclas para colocación en frío (temperatura ambiente), la aplicación de este material en carreteras se realiza a elevadas temperaturas ya que a temperatura ambiente el material se torna en un sólido que no puede moldearse y se requiere alcanzar cierta trabajabilidad para manejarlo. Químicamente el bitumen es un compuesto que no pierde sus propiedades ante la presencia de álcalis, bases y ácidos, pero es muy susceptible a la oxidación debido a su naturaleza orgánica.

¹ Figura obtenida de: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_130_181_83_1180.pdf

En Centroamérica, los principales tipos de asfalto utilizados en la industria están constituidos por el AC-20² y AC-30 cuyas designaciones provienen de la clasificación por viscosidad según la norma ASTM D 338. Existen distintos sistemas de clasificación los cuales se tratan en este trabajo más adelante. Las propiedades del betún pueden dividirse en:

- Adhesividad: se refiere a la facilidad con que el betún se añade a la superficie de los agregados formando una única unidad.
- Susceptibilidad térmica: se refiere a la facilidad con la que el comportamiento físico del bitumen es modificado debido a cambios de temperatura. Por ejemplo, la viscosidad del material es la que determina la temperatura de mezclado del asfalto ya que esta se ve modificada con los cambios térmicos.
- Plasticidad: es la capacidad que posee el betún o un pavimento asfáltico en resistir a deformaciones originadas por las distintas demandas de tráfico en el día sin surgir deformaciones de manera permanente. Es una medida de la capacidad de almacenar energía deformativa de manera elástica sin perder la forma del pavimento.
- Viscosidad: se refiere a la oposición que presentan las partículas constituyentes del cemento asfáltico a desprenderse. Esto se produce debido a la fricción interna entre las partículas y a la afinidad química que estas poseen.
- Envejecimiento: debido a la naturaleza orgánica del asfalto, este compuesto tiene a oxidarse debido a la presencia de oxígeno en el aire perdiendo así las propiedades adhesivas y químicas que posee el betún. Este fenómeno de degradación ocurre debido a la radiación solar y humedad

a. Clasificación por desempeño. La clasificación de estos asfaltos es especificada por grado de desempeño según ASTM D 6373 que categoriza a los asfaltos según las temperaturas mínima y máxima de diseño para su implementación en obra. Según (Salazar, 2011), la clasificación de estos especifica los requisitos que deben cumplirse para el punto de inflamación, temperatura a la que se alcanza una viscosidad de 3 Pa*s y su módulo de corte $G^*/\sin(\delta)$. Además, incluye valores de pérdida de masa, rigidez de fluencia y tensión directa que el asfalto debe de cumplir al someterlo a ensayos luego de que el material se oxida por el método RTFOT (ASTM D2872) y PAV (ASTM D6521).

b. Clasificación por viscosidad. La especificación se realiza según la clasificación de viscosidad alcanzada por el material ligante a una temperatura de 60°C donde en su código de clasificación AC-###, el valor ## indica la viscosidad dinámica del asfalto en hectoPoises (hP). La norma ASTM D 3381 M-12 indica los requisitos de viscosidad a 60°C y 135°C, el punto de inflamación, la solubilidad del asfalto en tri-

² En Guatemala actualmente los principales proveedores de asfalto para mezclas en caliente son Puma Energy y Perenco. La carta de caracterización del asfalto se incluye en el anexo 4.

cloroetileno, su gravedad específica a 25°C, el índice de penetración y los cambios de masa generados por su ensayo en RTFOT que debe cumplir cada asfalto para entrar dentro de una categorización AC por viscosidad. De manera general, en Centroamérica se maneja la clasificación por viscosidad AC-20 y AC-30 para aplicación como material ligante en mezclas asfálticas vírgenes y modificadas con polímero variando en una gama de grados de desempeño que son PG-70-22, PG-76-22 y PG-82-22.

c. Clasificación por penetración. Esta clasificación especificada por la norma ASTM D 946M-09a se realiza según el grado de penetración que se mide para el asfalto a 25°C aplicando una carga apuntalada en una aguja normada con una masa de 100 g a 5 segundos (ASTM D 5M-13). Es importante indicar que el grado de penetración de un asfalto no es equivalente a su grado de desempeño (PG), el primero se refiere a la penetración en el material para su clasificación y la otra a las temperaturas límites de diseño para el asfalto en condiciones de campo y funcionamiento.

d. Clasificación de emulsiones asfálticas por fraguado

- Emulsiones de fraguado rápido (RC): son emulsiones constituidas por la combinación de asfalto diluido en productos destilados del petróleo como la gasolina los cuales se encargan de acelerar su procedimiento de endurecimiento. Este fenómeno produce que los valores de penetración originales para una muestra sean muy cercanos a la penetración del residuo luego de la destilación.
- Emulsiones de fraguado medio (MC): las emulsiones de fragua media poseen una mayor fluidez pues son usualmente mezclados con diésel que se evapora a una velocidad baja. Usualmente los residuos luego del fraguado permiten cubrir el agregado con polvo de graduación fina que asegura la calidad de una mezcla.
- Emulsiones de fraguado lento (SC): las emulsiones de fragua lenta son materiales que se destilan con fracciones volátiles ligeras que se encuentran separadas en gran medida.

2. Los agregados

a. Procedencia y origen de los agregados. El diseño de una mezcla asfáltica en caliente requiere de un análisis completo de agregados y de un control de calidad exhaustivo ya que pequeños cambios en este material son capaces de modificar las dosificaciones óptimas con las cuales se realiza un diseño. En Guatemala predomina el basalto y la caliza como materiales presentes en el agregado para construcción.

Cuadro 4: Clasificación general de las rocas usadas como agregado para mezclas.

Clase/Grupo	Clasificación		Propiedades	Ejemplos
Metamórficas	Esquisto		- Forma angulosa. - Útiles cuando no poseen mica. - Peso específico muy elevado.	Filita, pizarra y esquisto.
Ígneas	Ácidas	Granito	- Usualmente se presentan de manera alterada - Son abrasivas y nada pulibles - Son frágiles y no se adhieren al asfalto.	Gneis, granito
		Porfídicas	- Baja adhesividad - Majo desgaste durante el pulido	Riolita, dacita y porfirita
	Básicas	Gabro	- Son rocas muy durables - Elevada resistencia y buen comportamiento mecánico.	Dioritas, peridotita y sienita.
		Basalto	- Buena adhesividad y bajo desgaste. - Color oscuro - Elevada resistencia mecánica	Andesitas, ofitas y basaltos
Sedimentarias	Básicas	Caliza	- Muy buena adherencia. - De fácil extracción en Guatemala.	Mármol, dolomita, caliza

(Moreno, 2011)

b. El filler mineral. Debido al proceso de lavado por el que pasan los agregados durante el ciclo de producción de mezclas asfálticas en caliente, todo el material arcilloso y partículas menores a los 0.075 mm se pierden. Esta pérdida del material que usualmente constituye entre el 1-5% en peso de una mezcla en caliente, deja espacios vacíos ocasionando una mezcla más porosa luego de la compactación. Con el objetivo de rellenar estos espacios, la industria utiliza distintos materiales de relleno para cubrir los espacios generados por la pérdida del material fino durante el lavado los cuales son conocidos como “fillers”. Tal y como menciona (Lee, 2007)³, todos los fillers deben de incluirse en una mezcla de asfalto de manera consistente y en proporciones correctas; de otro modo las propiedades de la mezcla pueden ser afectadas de manera negativa. Una cantidad excesiva de relleno usualmente reduce el volumen de espacios vacíos en el agregado mineral (VMA⁴) hasta un punto en donde ya no puede agregarse asfalto para obtener una mezcla más durable. Además, si el tamaño de las partículas añadidas a la mezcla es menor a 10µm, el filler actúa como una extensión del asfalto debido a que el espesor de las películas asfálticas formadas en mezcla de gradación densa de asfalto mezclado en caliente es menor a las 10µm.

Dentro de los materiales utilizados se encuentran el polvo de roca, las cenizas volantes, sílice, cemento y cal como es en el caso de nuestro interés. La adición de filler a una mezcla usualmente reduce la deformación originada por la aplicación de una carga debido a la rigidización del mástico de asfalto. Dentro

³ El trabajo realizado por Lee se basó en la investigación de los efectos de la cal hidratada en el desempeño de mezclas asfálticas en caliente utilizando pruebas y técnicas de modelaje avanzado como la medición del módulo dinámico |E*| para medir la rigidez, el ensayo tri-axial de deformaciones permanentes por carga repetitiva (TRLPD) para evaluar el rutting y el ensayo de tensión directa para evaluar el agrietamiento por fatiga en mezclas asfálticas en caliente.

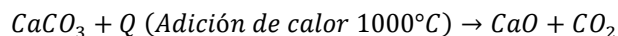
⁴ Siglas para la designación de los vacíos en el agregado mineral, “Voids in Mineral Aggregate”.

de los efectos del filler en una mezcla asfáltica se encuentran la reducción del contenido óptimo de asfalto requerido, un incremento en la densidad de la mezcla (dependiendo de la gravedad específica de los materiales) y un aumento en la estabilidad a la deformación (Brown, 1989).

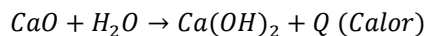
La adición de un filler debe realizarse de manera gradual para no alterar el proceso de calentamiento del asfalto y provocar choques térmicos producidos por la transferencia de calor. Uno de los filleres comerciales más utilizado es el polvo de roca. Debido a sus propiedades inertes y la ausencia de contaminantes arcillosos este material es utilizado usualmente como materia prima de relleno para la fabricación de mezclas en caliente.

c. La cal hidratada. La cal es un compuesto químico constituido por Di-hidróxido de calcio que proviene de una serie de reacciones provenientes del carbonato de calcio. Su aspecto es un polvo blanco inodoro soluble en agua. La cal tiene una procedencia de origen calizo la cual ha sido calcinada y posteriormente “apagada” con el uso de agua para su hidratación.

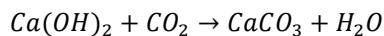
La cal posee un ciclo de reacciones químicas que se puede separar en tres partes: la primera parte corresponde a la calcinación, la segunda parte a la hidratación y la tercera parte del ciclo a la re-carbonatación. El proceso inicia con la calcinación de roca caliza extraída de canteras donde se han realizado estudios de exploración para conocer el principalmente el contenido de Magnesio en la materia prima de molienda con la que se inicia el proceso de producción de la cal. La roca caliza constituida por carbonato de calcio se calcina a temperaturas entre 900-1000 °C en una reacción química que se describe a continuación:



La temperatura aplicada a la piedra caliza genera el desprendimiento de oxígeno para formar óxido de calcio y la liberación de dióxido de carbono. Esta cal es conocida por su nombre común como cal viva, la cual al entrar en contacto con el agua e incluso con la humedad del ambiente, reacciona de manera exotérmica y violenta. Esta cal viva posteriormente entra en un proceso de hidratación controlada en la que el óxido de calcio se convierte en hidróxido de calcio el cual se distribuye comercialmente como cal hidratada.



La cal hidratada, también conocida como hidrato de calcio, cal caustica o cal apagada, debe de protegerse de la re-carbonatación ya que el ciclo de la cal vuelve a iniciar con la incorporación de dióxido de carbono para formar nuevamente carbonato de calcio a través de la siguiente reacción:



La cal posee diferentes aplicaciones en la industria azucarera para el control del proceso de producción, control de los residuos de destilación, regulación de pH en aguas y captura de impurezas precipitándose en lodos, desulfuración de aceros durante su conformación, impermeabilizante, aislante y material para la estabilización de suelos y tratamiento de arcillas. Además, la cal puede ser utilizada como

un filler aditivo que mejora las propiedades de mezclas asfálticas con uso en creciente aumento alrededor de todo el mundo.

En cuanto a su granulometría, la cal hidratada posee material el cual en promedio el 85% del material en peso pasa el tamiz normado ASTM No.200 (0.075mm) por este motivo es que puede incorporarse como material de relleno en una mezcla asfáltica. La distribución granulométrica del material cumple con la norma ASTM C 204 para ser utilizada como filler de mezclas asfálticas por lo que es interesante estudiar los efectos y cambios que esta produce al incluirse como adición de una mezcla asfáltica. En cuanto a la modificación de mezclas asfálticas, la cal hidratada es la más utilizada a pesar de que la dolomita también se menciona como un posible filler.

Una de las razones por las cuales la cal clasifica como filler es que posee características físicas aproximadas a las de un filler mineral, siendo estas propiedades las siguientes:

Cuadro 5: Propiedades típicas de la cal hidratada en comparación con los rellenos minerales comerciales.

Propiedad	Cal Hidratada	Filler Mineral
Densidad de partícula (mg/m ³)	2.2	2.6-2.9
Porcentaje de vacíos en estado compactado	60-70	28-45
Número Bituminoso	100-120	40-50
Masa en Keroseno (mg/m ³)	0.3	0.5-0.9
Superficie específica Blaine (cm ² /g)	>10000	7000
Área superficial específica (cm ² /g)	1.5x10 ⁵ - 2.0 x10 ⁵	1.4 x10 ⁴ - 9.5 x10 ⁴
Valor de Azul de Metileno (g/kg)	<1	0-20

(Lesuer, D; Petit, J; Ritter, J, 2012)

En cuanto al costo de la cal, en 2014 el producto se cotizaba en el mercado a un valor aproximado de 150.00 US\$/Ton siendo tres veces más cara que la cal dolomítica la cual se vende comercialmente a 51.00 US\$/Ton. Este aspecto supone un encarecimiento de la mezcla diseñada que debe de balancearse con los costos del filler inerte utilizado normalmente junto con los costos de rehabilitación y mantenimiento.

E. Tipos de asfaltos

La necesidad de obtener asfaltos con un alto desempeño y el avance en investigaciones ha permitido la modificación del material cementante con el objetivo de obtener un comportamiento superior al convencional. El uso de bitumen modificado ofrece una solución que permite reducir la frecuencia del mantenimiento requerido lo que genera tiempos de servicio largos para una carretera. Sumado a estos avances y al auge de la preservación ambiental y reducción de la contaminación, se ha propuesto el reciclado de asfaltos para obtener agregados que puedan re-utilizarse en la construcción de carreteras. Los avances en la tecnología de los materiales han permitido la adición de polímeros compatibles con el ligante los cuales

modifican el comportamiento físico y la viscosidad de diseño para una mezcla. Dentro de los tipos de asfaltos que existen según su proceso de diseño y mezcla son los siguientes:

1. Asfaltos convencionales. Estos tipos de asfaltos se encuentran conformados por agregados pétreos, asfalto virgen sin adiciones y aditivos líquidos o en polvo. Los asfaltos convencionales son los más utilizados para la construcción de carreteras y dentro de este grupo de mezclas es posible dividirlos en mezclas asfálticas en caliente (HMA) y mezclas asfálticas en frío. Esta distinción entre ambos tipos se debe a que para una se requieren altas temperaturas para colocarse y compactarse en obra mientras que la otra no requiere de temperatura alta para ser colocado en campo. Una mezcla convencional de asfalto, en función de su peso total, está constituida por entre un 93%-97% de agregados pétreos en combinación granulométrica controlada y entre un 7-3% de cemento asfáltico.

2. Asfaltos emulsificados. Las emulsiones asfálticas poseen una polaridad, es decir pueden ser de carácter aniónico o catiónico y están constituidas por una mezcla de emulsificantes con asfalto que permiten colocar las mezclas a temperaturas bajas, menores a 90°C. Por este motivo las emulsiones asfálticas pueden ser clasificadas como mezclas en frío. La idea de las emulsiones asfálticas es permitir la colocación de carpetas asfálticas con la adición de agua.

Uno de los principales problemas de este tipo de mezclas y el motivo por el que se utilizan únicamente en caminos con un bajo nivel de tránsito de diseño es que la mezcla usualmente no consigue cumplir con parámetros de estabilidad, por lo tanto, cargas excesivas provocarían la falla por agrietamiento o deformación de un pavimento emulsificado. Por este motivo, el uso de las emulsiones en proyectos de pavimentación asfáltica se limita a riegos de liga que sirven como interfaz de pega entre dos capas adyacentes compuestas de distinto material asfáltico o en riegos de imprimación que se colocan sobre una superficie no asfáltica para preparación de las capas subyacentes que si poseerán asfalto. Otro uso de las emulsiones asfálticas es en mezclas de arena-asfalto las cuales se usan como sellante o “slurry seal” de la carpeta de rodadura para evitar el ingreso de agua a esta y su deterioro.

3. Asfaltos reciclados (RAP). Como es notable en el sector de la construcción, la creciente demanda en la utilización de agregados ha reducido su disponibilidad en los principales bancos y canteras alrededor del mundo. Este hecho ha obligado a la búsqueda de nuevas soluciones que reduzcan costos y permitan obtener material de aporte estructural que cumplan con los requisitos mínimos de calidad para el diseño de una obra de infraestructura dentro de las que se encuentran involucradas las mezclas cementantes. Cuando a un tramo carretero se le realiza un proceso de rehabilitación o este ha llegado al final de su ciclo de vida útil, es muy difícil conseguir espacio para el vertido del material que ya no va a utilizarse, además de tener un costo elevado para el desecho y transporte del material. En comparación con material nuevo, la reutilización de agregados de una capa asfáltica reduce el contenido de asfalto óptimo necesario a utilizar en una mezcla, es decir, ya no se requiere más del 5% de contenido de asfalto para realizar la mezcla sino un contenido entre 1-3% para cumplir con los requisitos de diseño. Esto se debe a que, al momento de reciclar el agregado, este posee espacios vacíos que ya se encuentran rellenos con asfalto por lo que la cantidad de asfalto efectivo

de la mezcla tiende a ser la cantidad de asfalto adicionado pues ya no se absorbe la misma cantidad de bitumen que absorbería un agregado en estado virgen.

La mayoría de reglamentos constructivos incluyen restricciones en cuanto a los porcentajes de material reciclado que pueden utilizarse en una mezcla asfáltica en caliente. Por ejemplo (SIECA, 2004), en el manual centroamericano de especificaciones para la construcción de carreteras y puentes limita el porcentaje de material reciclado que puede usarse en una mezcla asfáltica a un porcentaje de 50% sobre el peso de la mezcla recuperada respecto al total de la mezcla además de los requisitos de aditivo rejuvenecedor y ligante asfáltico requerido.

El asfalto reciclado puede utilizarse tanto en mezclas calientes (HMA) como frías (CMA) y el proceso puede realizarse tanto in-situ como en plantas especializadas. Para las mezclas asfálticas en caliente, tanto en campo como en planta, en el procedimiento de reciclado se reutiliza todo el material del asfalto envejecido el cual se calienta mediante quemadores y se tritura para cumplir con una gradación de partículas determinada. Durante el proceso de mezclado, a este material se le adicionan agentes químicos que rejuvenecen la mezcla además de la inclusión del contenido de asfalto el cual es mucho menor al utilizado para la mezcla original. En el caso de las mezclas asfálticas en frío, el proceso de reciclado incluye la trituración del material para luego mezclarse con un aglomerante hidráulico (usualmente cemento) que se vuelve a poner en funcionamiento una vez se ha endurecido (Quesada, 2006) . En conclusión, la principal ventaja de este sistema es que permite la utilización del material utilizado en un proyecto previo para reparar, dar mantenimiento o construir tramos carreteros reduciendo el costo de los materiales a utilizar.

4. Asfaltos modificados. No todos los polímeros poseen una alta compatibilidad con el asfalto y de esta compatibilidad es que depende el buen desempeño de una mezcla con la adición de materiales poliméricos. Según su composición química⁵, usualmente los asfaltos menos compatibles con la incorporación de polímeros son aquellos con un bajo contenido de fracciones de aromáticos y resinas mientras que los más compatibles son aquellos que poseen un contenido bajo de asfaltenos y saturados. Un polímero es un compuesto químico formado por la unión de grandes cadenas monoméricas de sustancias con alto peso molecular. Un polímero puede clasificarse como compatible cuando adicionado al bitumen, no puede determinarse la presencia de este a simple vista y microscópicamente se observa que éste forma una sola interfaz homogénea con el betún.

En una mezcla asfáltica el bitumen es responsable de las propiedades visco-elásticas de un pavimento lo que determina muchos aspectos sobre el comportamiento de una carretera, en especial de las deformaciones permanentes a las que se verá sometida y el agrietamiento que puede originarse en la misma. De manera general un asfalto tiende a deformarse de manera irreversible a medida que pasa el tiempo y esta deformación depende de la viscosidad del asfalto. Ante este efecto, los polímeros contribuyen a reducir las deformaciones en el asfalto y a modificar su viscosidad para aumentar su grado de desempeño (“Performance Grade”)

⁵ Los detalles de la estructura química de un asfalto se explican en la sección G de este documento.

haciéndolo más resistente y duradero. La adición de polímeros en una mezcla mejora el comportamiento del asfalto ante los esfuerzos y cambios de temperatura a los que se somete un pavimento durante su servicio. Distintos modificadores son utilizados con el objetivo de obtener una mejora en estas propiedades dentro de las cuales se encuentran:

Cuadro 6: Adiciones utilizadas para la modificación de bitumen.

Tipo de Modificador	Ejemplo
Polímeros elastómeros termoplásticos	Estireno-Butadieno-Estireno (SBS), Estireno-Butadieno-Caucho (SBR), Estireno-Isopreno- Estireno (SIS), Copolímero Isobutano- Isopreno (IIR)
Polímeros termoplásticos	Etil-Vinil-Acetato (EVA), Etil-Metil-Acetato (EMA), Etil-Butil-Acetato (EBA), polipropileno atáctico (APP), polietileno (PE), Polipropileno (PP), Cloruro Polivinilo (PVC), Poliestireno (PS)
Polímeros termo-endurecibles	Resina epóxica, resina de poliuretano, resina acrílica, resina fenólica
Modificadores químicos	Compuestos Organo metálicos, Azufre, lignina
Fibras	Celulosa, Silicato Alumino-Magnésico, Fibra de vidrio, asbesto, polyester en fibra, fibra de polipropileno
Adhesivos	Aminas
Antioxidantes	Fenoles, órgano-zinc
“Fillers”	Carbón negro, Cal hidratada, cal dolomítica, cenizas volantes (“fly-ash”)

(Read & Whiteoak, 2003)

a. Asfaltos con polímero SBS y asfaltos con polímero EVA. El asfalto es un material visco-elástico en el que sus propiedades físicas y químicas se ven influenciadas en gran medida por la temperatura a la que se encuentra el material. Esta propiedad relacionada con la capacidad de un fluido de resistir esfuerzos tangenciales a su superficie varía de manera inversamente proporcional con la temperatura a la que se encuentra el asfalto. La viscosidad es una medida de la resistencia que posee un fluido a los esfuerzos cortantes los cuales producen una deformación en este. La viscosidad además de variar con la temperatura, puede variar dependiendo de los años de servicio a los que se ha visto sometido un asfalto. El envejecimiento foto-oxidativo y la volatilización de sus compuestos, puede alterar la viscosidad del asfalto modificando tanto si los esfuerzos a los que se somete se encuentran dentro del comportamiento en el rango elástico o plástico.

Este tipo de polímero es formado por bloques de estireno. Los modificadores poliméricos SBS mejoran el comportamiento de las mezclas asfálticas tanto a bajas como altas temperaturas. El proceso de modificación de un asfalto base con la incorporación de un polímero se realiza durante el proceso de mezcla

de alto corte y de la homogenización del asfalto con el polímero a una temperatura de mezclado de entre 180°C - 190°C. Las dosificaciones de polímero se realizan en función del volumen del tanque de mezcla usualmente sin sobrepasar una concentración de 5% de polímero. Según (Wulf, 2008), los efectos que se buscan obtener con la modificación del asfalto son:

- Aumenta la viscosidad, dependiendo de la cantidad y el tipo de polímero.
- Disminuye la penetración del asfalto.
- Aumenta el punto de ablandamiento entre 8-12 °C y aumenta el punto de inflamación.
- Disminuye la susceptibilidad a los cambios de temperatura.
- Sube de uno a dos grados la clasificación PG del asfalto.
- Eleva la recuperación elástica del asfalto hasta arriba de 30%.
- Eleva el módulo de resiliencia del material.
- Amplio rango de temperaturas para manejo y almacenamiento.
- Mayor rango de plasticidad.
- Mayor cohesión.
- Mayor resistencia al envejecimiento.

F. Desgaste y fallas comunes en pavimentos asfálticos

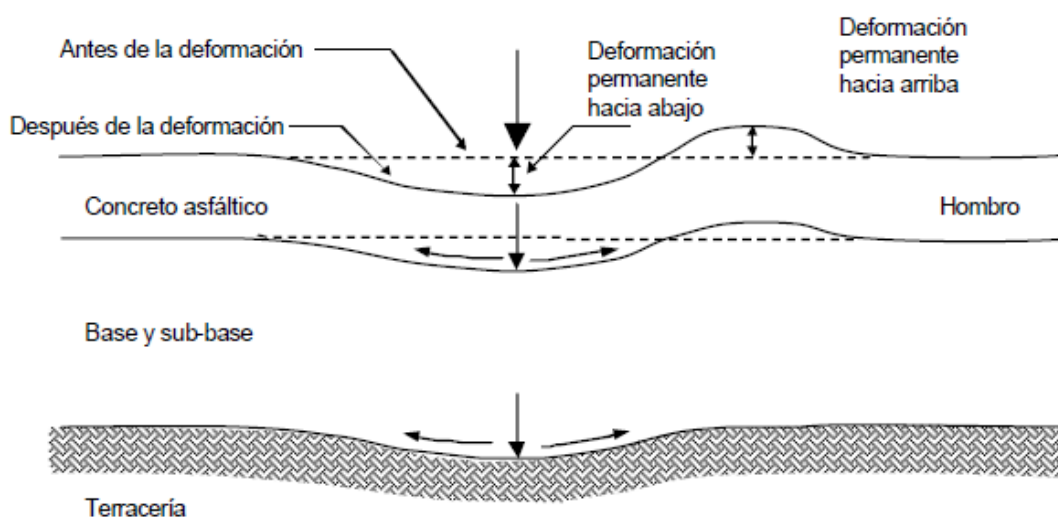
Como se ha mencionado, la característica de los pavimentos asfálticos es que poseen un comportamiento elástico que permite la deformación de una sección de losa. Debido al paso del tiempo, los ataques químicos, la variabilidad de las temperaturas durante el día y los ciclos de carga a los que se ve sometido un pavimento, sus materiales constituyentes tienden a fallar debido a su desgaste. Numerosos estudios y observaciones realizadas respecto al desempeño en caminos asfálticos caracterizan los daños que un macizo asfáltico puede llegar a sufrir. Los principales daños que ocurren en un asfalto y que deben tomarse en cuenta al realizar un diseño de mezcla son:

- Rutting o “Ahuellamiento”: debido al comportamiento elástico de una mezcla asfáltica, las altas temperaturas a las que se somete una carpeta asfáltica plastifican el material lo que permite a esta deformarse con facilidad. Debido a las demandas de tráfico pesado y trenes de carga elevados, los pavimentos asfálticos sufren de una deformación cada vez que las llantas pasan sobre él. El ahuellamiento es una deformación permanente e irreversible causada en el pavimento cuando su límite de la elasticidad se ve excedido por los esfuerzos y desplazamiento progresivo de los materiales ante la acción de cargas repetidas sobre la capa de pavimentación o sobre las capas bases del pavimento flexible (Lee, 2007).

Se ha demostrado que la magnitud de las deformaciones depende no solo del bitumen utilizado y su susceptibilidad a cambios en la temperatura del medio ambiente sino también, debido a la naturaleza de las capas de estabilización que se encuentran por debajo de la carpeta asfáltica. Las causas asociadas a este desgaste son el porcentaje de vacíos con aire menor al 4% y mayor al 8%, la viscosidad baja del material ligante, la consolidación de las bases de la carpeta, la frecuencia de la carga aplicada y la geometría de los agregados.

Cuando la compactación de las capas base es mala, el paso del tránsito se encarga de realizar la consolidación faltante lo cual, dependiendo de la carencia de consolidación, puede ocasionar asientos diferenciales en zonas del tramo carretero que pueden formar surcos de gran tamaño los cuales generen inconvenientes al manejar y ocasionar puntos de agrietamiento.

Figura 6: Mecanismo por deformación plástica en un asfalto.



(Anguas, 2005)

- Stripping “Desvestimiento”: este tipo de daño ocurre debido al desprendimiento de los agregados del aglomerado a causa de granulometría abierta de la carpeta y la presencia de agentes no ligantes entre el asfalto y el agregado. Los factores que más influyen en el surgimiento de este desgaste es la presencia de polvo recubriendo el agregado, la acumulación de agua dentro y fuera de los agregados. Las soluciones más convenientes para el control de este desgaste radican en secar bien el agregado antes de realizar su mezcla y controlar el porcentaje de vacíos presentes con el propósito de permitir regular el flujo de agua y permeabilidad de la carpeta.
- Agrietamiento por fatiga: este tipo de falla es generada por la aplicación de un esfuerzo de tensión al pavimento mucho mayor a la resistencia de la mezcla. Además, cuando el drenaje de la carretera no es el más adecuado, las capas inferiores se saturan de agua y sufren un descenso en su resistencia.

Esta falla en la mezcla asfáltica ocurre debido a que las piezas individuales de la superficie de pavimento son desprendidas por la acción del tráfico.

El agrietamiento de una carretera usualmente es descrito de acuerdo a su geometría y con el paso del tiempo se ha podido asociar a estas dos causas: las causas de carácter asociado a la carga y el no asociado a ellas (Lee, 2007).

En cuanto a la primera causa, este efecto se origina debido a la fatiga de los materiales los cuales ante una carga repetida se fracturan. La fractura de un material ocurre cuando un material es sometido a esfuerzos superiores a su capacidad de tracción. Por lo tanto, el control en la gradación del agregado, el espesor de capas y el contenido del asfalto son variables que usualmente se controlan para reducir al mínimo estas fallas. Por otra parte, en referencia a las causas no asociadas a las cargas, las bajas temperaturas y el agrietamiento de las subcapas asfálticas son las causas que generan fisuras y grietas. Cuando la temperatura desciende, el asfalto y la mezcla completa tienden a contraerse lo que genera tensiones en la mezcla que pueden terminar con la formación de regiones de fisuramiento que fueron originadas por el desgaste del asfalto debido a su envejecimiento y susceptibilidad a la humedad. El agrietamiento por fatiga, conocido también como agrietamiento “piel de cocodrilo”, aparece de manera abundante en pavimentos en los que el espesor es inadecuado para las cargas a las cuales se va a someter. Cuando se diseña para evitar este tipo de falla, la clave es obtener una mezcla que permita el correcto drenaje del agua y evitar el contacto de esta con la sub base evitando la propagación de fracturas.

- Endurecimiento por oxidación: debido a la composición orgánica de las moléculas del asfalto, la presencia de oxígeno origina una reacción química de oxidación que modifica la composición estructural de las mismas. Cuando el asfalto reacciona con el aire este se vuelve más rígido y frágil originando un endurecimiento por envejecimiento oxidativo. “La oxidación se produce más rápidamente a altas temperaturas. Es por ello que parte del endurecimiento ocurre durante el proceso de producción al momento de calentar el cemento asfáltico antes de mezclarlo y compactarlo. Esta propiedad explica por qué es más crítica la oxidación en climas cálidos o desérticos” (Anguas, 2005).

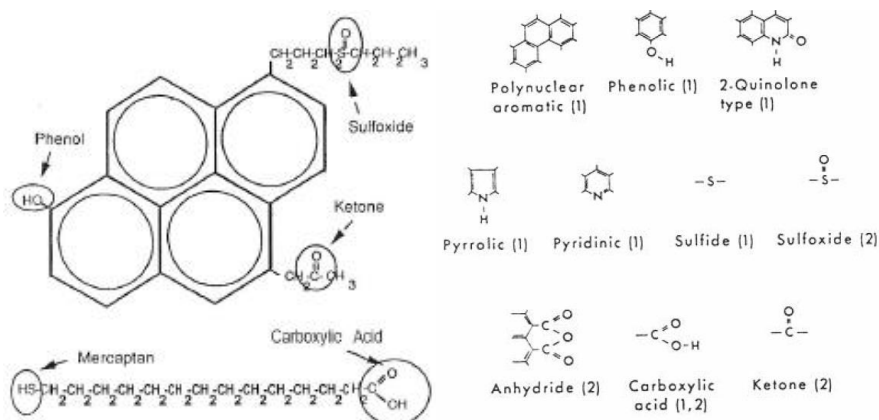
G. Descomposición química del cemento asfáltico

Desde el punto de vista químico, un asfalto está constituido por una estructura compleja de hidrocarburos, sales orgánicas y metales. La composición química del asfalto puede separarse en cuatro grandes grupos conocidos como los asfaltenos, resinas, maltenos y carbonos aromáticos. Estos constituyentes en conjunto brindan a un betún sus propiedades físicas y químicas. Según (Mercado, Bracho, & Avendaño, 2008), la estructura de los asfaltenos, está determinada por las condiciones de elaboración del asfalto y tienden a poseer un elevado peso molecular originado debido a la naturaleza coloidal del compuesto. Por su

parte, las resinas se encuentran disueltas en el crudo de petróleo y poseen un peso menor al de los asfaltenos. Dentro del betún, las resinas controlan la ductilidad del material y su fluidez. La fluidez de este compuesto es baja debido a que forma una pasta de color claro que propicia la interacción entre los asfaltenos y maltenos. Los maltenos, son aceites que a temperatura ambiente se encuentran en estado líquido y le confieren a un asfalto tanto adhesividad como ductilidad.

La composición química del asfalto es un factor que determina la calidad de la adhesión cuando este entra en contacto con el agregado. “El ligante asfáltico está compuesto por varias fracciones moleculares pertenecientes a grupos hidrocarburos como los alifáticos y aromáticos (arenos). Estos tipos de carbonos presentes en asfaltos son muy susceptibles a la oxidación y cuando esta ocurre el producto de la reacción genera cetonas y ácidos carboxílicos (oxidación severa). Los ácidos carboxílicos pueden convertirse en sales de Sodio o Calcio al reaccionar con estos formando anhídridos. Otros tipos de moléculas presentes en el asfalto son los grupos funcionales fenoles, quinolonas (presentes abundantemente en asfaltos envejecidos), sulfóxidos y metales como la porfirina” (Lee, 2007). En general la química que constituye el asfalto es descrita por moléculas sumamente complejas dentro de las cuales asumen un papel elementos como el oxígeno, nitrógeno, azufre incluyendo algunos metales como hierro, níquel y vanadio. La molécula más simple que lo constituye es una molécula alifática de enlaces carbón-carbón rodeados por hidrógenos. En la figura 7 se ilustra la estructura compleja de dos moléculas orgánicas con sus respectivos grupos funcionales que pueden encontrarse en el betún de mezclas asfálticas.

Figura 7: Grupos multifuncionales de moléculas orgánicas y grupos funcionales presentes en el asfalto. Los grupos (1) se encuentran naturalmente mientras que los (2) se forman durante el proceso de oxidación.

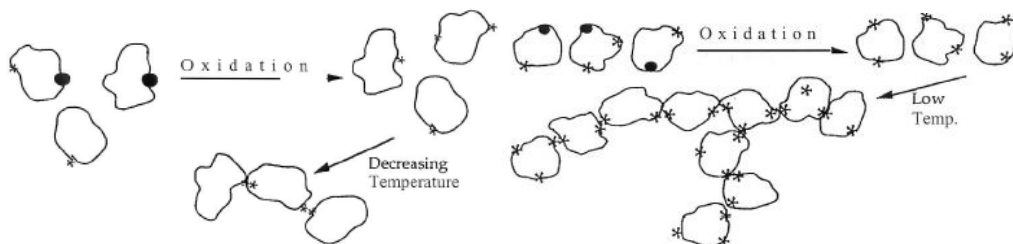


(Little D. J., 2010)

Los enlaces formados por las moléculas asfálticas son de carácter covalente sin embargo la presencia de redes polares de moléculas alrededor de los enlaces brinda las propiedades de elasticidad a una mezcla. En cuanto al fenómeno de endurecimiento y envejecimiento oxidativo, según comenta (Little D. J., 2010) las moléculas que poseen una gran influencia en el proceso son las de carácter orgánico debido a que las moléculas polares de asfalto generan cambios significativos a nivel físico y es necesario que estas interactúen

entre sí para formar estructuras de enlace. A continuación, en la Figura 8 se muestra como la oxidación de moléculas con un solo sitio activo resulta en la reducción de la tasa de oxidación mientras que el proceso en moléculas con sitios activos múltiples forma una red completa de interacciones a medida que la temperatura desciende y el material se vuelve más rígido y pierde sus propiedades elásticas.

Figura 8: Efecto de los sitios activos originados por los compuestos orgánicos en el proceso oxidativo.



(Little D. J., 2010)

Las moléculas, formadas producto de la oxidación, son moléculas de carácter polar y contribuyen a brindarle polaridad a todo el sistema molecular. A nivel general, los grupos funcionales determinan las características de la interacción betún-agregado. La resistencia generada en el espacio intersticial depende de la tendencia general de los grupos funcionales a ser absorbidos por parte del agregado. Usualmente los compuestos polares absorbidos por el agregado, como los ácidos carboxílicos y anhídridos, suele ser desplazados con mayor facilidad ante la presencia de agua. Mientras mayor es la resistencia al desplazamiento del agua mayor presencia de fenoles, cetonas y piridinas de base nitrogenada.

H. El proceso de endurecimiento oxidativo del asfalto

Por su estructura molecular los asfaltos son clasificados como compuestos orgánicos por lo que ante la presencia de oxígeno estos tienden a oxidarse. En el caso del asfalto, los componentes moleculares saturados, asfaltenos, aromáticos y resinas que constituyen el betún se ven alterados por el proceso de oxidación durante el mezclado, puesta en obra y durante el periodo de servicio de una carretera debido a la acción del oxígeno en el aire, los cambios en las temperaturas de mezclado, las condiciones de clima y medioambientales lo que incide en el comportamiento de un pavimento flexible.

La tasa de oxidación del asfalto en una mezcla es mucho mayor durante el proceso de mezclado que durante su vida útil. Este factor debe ser tomado en consideración ya que es el tiempo de exposición en planta influye mucho en el desarrollo de la reacción oxidativa del bitumen. Un estudio realizado por (Brock, 2008) demuestra que durante el mezclado cuando el asfalto se expone a oxígeno este se oxida a prácticamente cualquier temperatura y la tasa de reacción es muy sensible a cambios en la misma, duplicándose el ritmo de oxidación por cada incremento de 14°C en la temperatura de mezclado a temperaturas por encima de los 93 °C. Por este motivo se busca que en plantas la temperatura de mezclado sea la más baja posible y el tiempo de mezclado el más rápido para reducir el efecto oxidativo que supone el mezclado.

En (Brock, 2008) también se menciona que, durante la fase de vaciado y compactación de una mezcla asfáltica en caliente en campo, la reducción de la tasa de oxidación es uno de los motivos por los cuales el diseño de la mezcla se especifica con una densidad alta y cantidad de vacíos reducida. Muchas veces a pesar que se cumplen estos requisitos, se ha observado que cuando se vacía en carretera asfalto con un grado de penetración PG 60-65, el asfalto luego de una oxidación por espacio de 10-15 años llega a un grado de penetración PG 10-15. En este punto deteriorado, el asfalto se ha rigidizado tanto que este se torna extremadamente quebradizo y susceptible a grietas.

Tal y como comenta (Vargas, 2010), en estudios realizados en el año 2002 sobre cinética de reacciones y cambios en la composición de asfaltos durante envejecimiento con calentamiento y en presencia de aire, se ha encontrado que la fracción de saturados se mantiene, el contenido de aromáticos desciende y el de asfaltenos se incrementa gradualmente durante el proceso de envejecimiento continuo. Además, cada tipo de asfalto absorbe cantidades distintas de oxígeno mostrando que cada uno se oxida a un ritmo distinto.

“El proceso de envejecimiento va acompañado de un incremento en la fracción de los asfaltenos. Esto implica que el envejecimiento está asociado a un proceso de oxidación que provoca el aumento en la polaridad de la mezcla y una disminución en la fracción de aromáticos ocasionada por el rompimiento de los anillos durante la oxidación” (Reyes, 2012). La disminución de los compuestos aromáticos y de resinas puede ser responsable del endurecimiento que se observa en muestras.

Por este motivo, determinar el cambio en la composición química del asfalto debido a la adición de cal y su efecto en reducir la tasa oxidativa antes y después de su colocación en campo, permite la construcción de pavimentos sostenibles en los que la recurrencia de los períodos de mantenimiento puede verse reducida de manera considerablemente y reducir los costos asociados.

I. La cal hidratada y su efecto en las mezclas en caliente

Se dice que la cal hidratada mejora las propiedades de una mezcla asfáltica en caliente debido a su componente inerte y activo en una mezcla. Cuando se hace referencia a la presencia de la cal como inerte, se dice que dentro de una mezcla esta juega un componente de relleno sumamente importante que permite reducir la cantidad de espacios vacíos en la mezcla y modificar sus propiedades de rigidez. Por otra parte, cuando se habla de un comportamiento activo, la cal produce numerosos efectos beneficiosos en una mezcla asfáltica dentro de los que tanto el betún como el agregado sufren de modificaciones químicas que alteran las propiedades físicas y el desempeño del asfalto.

En cuanto a la reducción de las fallas por desgaste y fatiga del asfalto, la presencia de cal hidratada en una mezcla reduce los efectos climáticos y de utilización que se producen en una carretera. Por ejemplo, el daño por humedad ocurre cuando los enlaces entre el betún y el agregado se rompen debido a la presencia de agua en el espacio intersticial generando fallas prematuras, una pérdida de resistencia y de durabilidad de una mezcla asfáltica. Esta separación provoca la falla temprana del asfalto debido a la pérdida de su resistencia y

rigidez. El agua por ser un compuesto polar es incluida en el asfalto debido a la atracción de sus moléculas por parte de los compuestos orgánicos. Los asfaltos ya envejecidos tienden a incluir agua en ellos de manera más fácil ya que la oxidación polariza la mezcla haciéndola más susceptible al ingreso de agua.

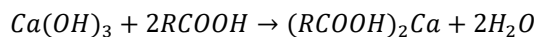
Una de las razones por las que ocurre el fenómeno de stripping en el asfalto es la evaporación de agua atrapada en los espacios vacíos de las mezclas densas las cuales al carecer de un buen drenaje inducen a este defecto. Si el asfalto es permeable, el agua posee una ruta de escape que no genera presiones residuales, sin embargo, si no hay una ruta de salida para el agua, la presión generada por la evaporación de esta puede generar el desprendimiento del agregado y el asfalto. La mejora en la adhesión entre el asfalto y el agregado debido a la presencia de cal hidratada reduce el desnudamiento (Stripping), además que repele el agua presente debido a la formación de sales insolubles de calcio que se forman durante la reacción con ácidos carboxílicos presentes en el asfalto lo que evita la captura de agua y su posterior evaporación. Este fenómeno usualmente genera presiones residuales las cuales facilitan el desprendimiento de los agregados.

En cuanto al ahuellamiento (rutting), tal y como comenta (Little D. E., 2001) resultados obtenidos en Texas para estudios de abrasión y desgaste por ensayo de la rueda de Hamburgo en distintas mezclas con distinta naturaleza de los agregados y distintos asfaltos clasificados por grado de desempeño (“Performance Grade”) demuestran que la adición de cal en 1% reduce la profundidad del surco formado por el ensayo en un 50% sin hacer una distinción del tipo de asfalto que se utilice. Este mejoramiento equivale a elevar un nivel el grado de desempeño PG del asfalto con la simple adición de cal. La capacidad de deformación de un asfalto es influenciada por la rigidez del mismo por lo que inclusión de cal hidratada en una mezcla aumenta la cohesión y facilita los ciclos elásticos de deformación-recuperación expresados como una tasa deformativa por el paso de trenes de carga sobre la carpeta asfáltica. La viscosidad es un factor que influye poco en la resistencia al ahuellamiento si los agregados utilizados en una mezcla poseen una buena gradación, angular y con textura rugosa. En realidad, el efecto de reducción en el ahuellamiento se logra rigidizando el asfalto y es aquí donde la cal juega el papel importante.

Por otro lado, las grietas y fracturas de la capa asfáltica ocurren cuando aparecen formaciones de microfisuras en un material sumamente rígido. Cuando estas se originan la cal presente en una mezcla intercepta y redistribuye la ruta de la fisura a través de la configuración geométrica microscópica formada por las partículas pequeñas de cal. No obstante, a pesar que la adición de un filler rigidiza el asfalto, la adición de cal hidratada mejora la resistencia a la fatiga al formar un mastico menos susceptible a los cambios térmicos y que se puede adaptar de mejor manera a ellos. Por ejemplo, cuando hay una disminución en la temperatura, una mezcla asfáltica se contrae y puede rigidizarse tanto que pueden originarse fisuras en toda su estructura. Cuando la cal está presente en una mezcla, esta tiene el efecto de actuar como rigidizante únicamente a altas temperaturas ya que en bajas temperaturas esta permite la relajación de la mezcla funcionando como un elemento que genera un balance de rigidez. En cuanto a este efecto (Lee, 2007) comenta que, ante el aumento de la temperatura y relajamiento del asfalto, este es más susceptible a las deformaciones, pero el efecto rigidizante de la cal se ve magnificado lo cual contrarresta este ablandamiento y reduce las deformaciones.

De modo análogo, cuando el asfalto se contrae debido a la reducción de la temperatura, el efecto rigidizante de la cal se acentúa, lo que permite un relajamiento de la mezcla. En resumen, la presencia de cal en una mezcla contrarresta los efectos de contracción y retracción debidos a los ciclos de cambio de temperatura permitiendo disipar la energía y esfuerzos térmicos generados en lugar de ocasionar su fractura.

1. Efecto en el betún. Al entrar en contacto con el betún, la cal hidratada como ingrediente activo posee la propiedad de reducir la presencia de agentes de endurecimiento por el envejecimiento debido a la interacción de los compuestos polares presentes los cuales reducen la oxidación de carboxilos y el ritmo de oxidación del asfalto. Además de esta propiedad, en un estudio sobre el efecto de la cal en el desempeño del asfalto, (Hao & Hachiya, 2003) mencionan que los efectos de desgaste generados por la presencia de humedad también son reducidos. Es conocido que la presencia de humedad en una mezcla promueve la pérdida de los agregados y en consecuencia de la resistencia de un asfalto. El mecanismo de la reducción de los efectos contraproducentes por la presencia de humedad interactúa con el proceso de endurecimiento envejecimiento oxidativo para mejorar los espacios entre el asfalto y el agregado. Tal y como puede observarse a continuación, cuando entra en contacto con el betún, la cal hidratada reacciona únicamente formando agua como producto de la reacción.



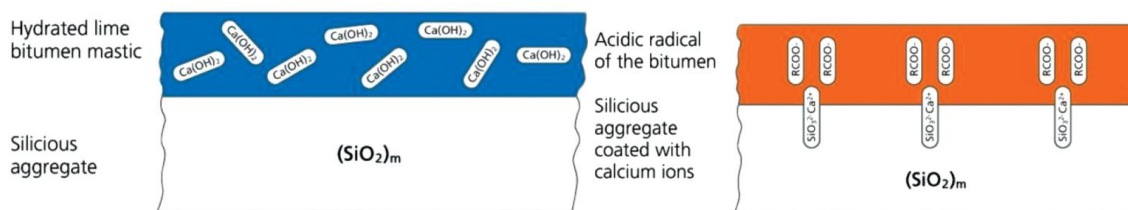
Lo que sucede con la cal hidratada es que esta “adhiera los ácidos carboxílicos a 2 quinolonas dentro del betún con la formación de sales de calcio orgánicas insolubles; este proceso evita que se den las condiciones para la reacción con la superficie de Sílice formando espacios resistentes al agua. Este fenómeno deja sitios activos en la superficie del agregado volviendo el ligante resistente al agua” (Lee, 2007). Otro factor que modifica la presencia de cal hidratada es la viscosidad del asfalto en la mezcla. Los resultados de rigidización que se han observado en numerosos estudios demuestran que es posible aumentar el grado de desempeño (PG) al incorporar cal hidratada. Tal y como se sabe esta categorización clasifica el cemento asfáltico dependiendo de las condiciones de temperatura a las cuales va a ser sometido. Según (Little D. J., 2010) a bajas temperaturas la cal hidratada es menos activa químicamente y esta actúa únicamente como relleno en una mezcla sin volverla frágil. Por otra parte, al aumentar la temperatura del asfalto, la cal se vuelve más activa y las propiedades del asfalto se ven mejoradas de manera considerable, es por esto que se puede decir que el PG del betún es mejorado permitiendo al asfalto trabajar de buena manera en un rango más amplio de temperaturas.

2. Efecto en el agregado. En una mezcla asfáltica la calidad de los agregados constituye uno de los requisitos de diseño más importantes que deben de cumplirse. Tanto la granulometría del material como sus propiedades de resistencia y adhesividad son parámetros para el control de calidad muy a tomar en consideración. En una mezcla asfáltica y de manera general, no es lo mismo utilizar un agregado que procede de piedra incluida dentro de un proceso de trituración que un material proveniente de un río. En el material de río las partículas del agregado tienden a ser más redondeadas y con superficies lisas que las superficies angulares y ásperas de la piedra triturada. Estas propiedades geométricas y de la superficie del agregado

determinan el grado de cohesión que tendrá una mezcla al incorporarse el material y la adhesividad de sus materiales constituyentes. Debido a la naturaleza orgánica del asfalto además de estos factores, la composición química de la superficie de pega del agregado mineral constituye un aspecto importante en cuanto a la creación de un área de pega adecuada, efecto el cual la cal contribuye a generar.

Por ejemplo, las piedras calizas forman una mejor superficie de pega con el ligante asfáltico que las gravas que poseen sílice. Este efecto se origina debido a que el asfalto posee surfactantes aniónicos y catiónicos los cuales se unen de manera muy fuerte a los iones calcio cuando la piedra es de origen calizo. Sin embargo, cuando el bitumen interactúa con piedras de origen silíceo, únicamente los surfactantes catiónicos se adhieren a los átomos de sílice originando un enlace más débil que como ocurre con el caso de las calizas. Tal y como identificaron (Ishai & Craus, 1977), la cal hidratada en el agregado permite la precipitación de los iones calcio presentes en el mastico sobre la superficie del agregado para formar enlaces muy fuertes entre aniones y cationes formando una estructura más rígida y resistente. Esta interacción particular puede comprenderse de mejor manera analizando la figura 9.

Figura 9: Interacción de los iones $\text{SiO}_3^{2-} - \text{Ca}^{+2}$ generada por la presencia de cal hidratada en la interface betún-agregado.



(Ishai & Craus, 1977)

Además de esta cadena de enlaces que la cal forma, en presencia de agua el carbonato de calcio presente se precipita en la mezcla (ya sea que llueva durante el proceso de colocación o que se utilice agua para marinar el agregado durante su fase de mezcla en planta) creando una superficie más rugosa que favorece la adhesión.

Por otra parte, cuando los agregados utilizados en una mezcla son de mala calidad y son de origen arcilloso pueden generar problemas de adhesión. Sin embargo, al incluir cal, el contenido de material arcilloso ya no presenta un inconveniente en el área de pega para la reacción agregado-asfalto ya que la cal evita la floculación de la arcilla. Lo que ocurre cuando la cal entra en contacto con las moléculas de betún es que al mezclarse con el agregado, esta desplaza los ácidos presentes en la superficie aumentando el efecto de pega de los surfactantes presentes y empaquetando toda arcilla que interfiera entre la superficie de contacto asfalto-agregado.

J. Métodos para la adición de cal hidratada a mezclas asfálticas en caliente (HMA)

Existen diversos métodos para la incorporación de la cal durante el proceso de mezclado de planta en asfaltos. Tal y como menciona (National Lime Association, 2003) desde los años 80, Estados Unidos ha utilizado distintas metodologías para la incorporación de cal en productos asfálticos dentro de las cuales pueden mencionarse la adición pura de cal hidratada a la mezcla, la incorporación como parte de un filler, el mezclado con agregados secos o húmedos, la preparación de lechadas con cal y el marinado de los agregados. Cada metodología posee distintas consideraciones que deben ser tomadas en cuenta. Por tanto, el método a seleccionar para su incorporación queda usualmente a criterio del jefe de planta tomando en cuenta cualquier especificación que sea aplicable a la misma. Según (EULA, European Lime Association, 2010) los procedimientos de incorporación pueden dividirse de manera general en 3 grandes grupos:

1. Adición de cal hidratada pura. Este método utiliza la incorporación de un silo a la planta asfáltica el cual está dedicado al almacenamiento de cal hidratada. La instalación de este sistema consiste en la interconexión del silo con el sistema existente en la planta a través de un tornillo transportador que deposita el material de manera directa al tambor de mezclado. A pesar de la facilidad de este mecanismo, muchas veces presenta el inconveniente de no permitir distribuir de manera homogénea la cal hidratada en la mezcla de manera previa al mezclado y de ocasionarse pérdidas del material. Sin embargo, en corrección a este comportamiento, es posible agregar deflectores circulares en el punto de la incorporación de cal hidratada para mejorar la manera en que esta se adiciona y reducir el polvo que se genera durante el proceso. Para este método es importante tener en mente que la cal hidratada posee una densidad aparente menor a la de un filler convencional y que los silos deben de poseer una capacidad de almacenamiento por lo menos igual a la de un camión de transporte de material. Adicionalmente, se pueden agregar filtros en el silo para evitar pérdidas de material.

2. Adición de cal hidratada mezclada con un filler mineral. La cal hidratada también puede agregarse en una planta de asfalto utilizando el mismo silo que se destina para el almacenamiento de filler mineral. Para ello, es necesario que esta se mezcle con el filler previo al ingreso del material a la planta a manera de una pre-mezcla. Como resultado de la implementación de esta metodología y estudios realizados, según menciona (EULA, European Lime Association, 2010), en Europa la cal hidratada destinada para el pre-mezclado con filler mineral, se especifica en función del contenido de hidróxido de calcio en peso.

3. Otros métodos alternativos para añadir cal hidratada. Además de los mencionados, en Estados Unidos, métodos alternativos de incorporación han sido puestos en práctica. La mayoría de estos utilizan una mezcladora de circulación forzada para mezclar la cal hidratada con el agregado. De esa manera es posible añadir cal hidratada a los agregados cuando estos se encuentran en estado húmedo usado un mezclador para homogenizar o de manera similar, en lugar de utilizar agregados humedecidos, pueden emplearse lechadas de cal hidratada la cual se adiciona a los agregados secos utilizando un sistema especial de inyección.

Por último, el método de marinado consiste en el tratamiento de las pilas de acopio de los agregados marinándolos por períodos de 24-48 horas para luego incorporarlos de manera normal en el proceso de la planta. Esta metodología se ha demostrado que es efectiva para el tratamiento de agregados con presencia de materiales arcillosos. Sin embargo, es importante no extender mucho el tiempo de tratamiento a los agregados en las pilas de acopio ya que se corre el riesgo de que la cal hidratada presente sufra de una reacción de recarbonatación.

En resumen, todos los métodos mencionados han sido validados comprobando que la incorporación de cal hidratada mejora el desempeño de las mezclas asfálticas al reaccionar con el agregado y el asfalto de una mezcla en caliente. A pesar de esto, la selección de la metodología de incorporación posee una influencia en el efecto a esperar del tratamiento con cal hidratada. Además, este se debe probar de manera previa a su implementación en una planta y tomando en cuenta los costos asociados a cada opción de incorporación

Figura 10: Agregado para mezcla asfáltica luego de impregnación con cal.



(National Lime Association, 2003)

Cuadro 7: Métodos de incorporación de cal como filler de mezcla asfáltica.

Método de adición	Descripción	Beneficios	Debilidades
Seco en agregado seco	El método consiste en agregar cal hidratada dentro del tambor de mezcla justo después de haber añadido el asfalto. Las dosificaciones utilizadas usualmente se encuentran dentro del 1-3%	No se requiere de equipo sofisticado o caro para su adición. El “filler” logra dispersarse tanto en la mezcla como en el agregado para formar un material homogéneo.	Hay generación de polvo y pérdida de material en planta con la necesidad de implementar un sistema contra pérdidas. El contenido de cal no puede ajustarse de manera separada en un “filler”.
Seco en agregado húmedo	Utilizando un dosificador se agrega entre 1-3% de material y se somete a un amasado previo a ingresar al tambor de la mezcla. Requiere de 48 horas y mantener una humedad de 2-3% en el agregado antes de secarlo.	Permite un control simplificado de la dosificación y ajuste. Permite apilar el material y separarlo de la producción para disponer de él y distribuirlo.	Requiere más energía debido al secado requerido previo al mezclado. Puede recubrir de manera inadecuada el agregado de las arcillas modificando su superficie.
Lechada	Se añade al agregado en lechada antes de realizar el mezclado con el objetivo de marinarlo.	Mejor cobertura del agregado aun cuando está contaminado. Se evita la segregación y pérdida de cal.	Se requiere el uso de equipo especializado y secar el agregado lo que eleva el costo y tiempo de producción

(National Lime Association, 2003)

K. Interacción de la cal con aditivos poliméricos

En los últimos años los avances en el descubrimiento de polímeros han fomentado su utilización como materiales constructivos. Por sí solos los ligantes asfálticos muchas veces no presentan las propiedades requeridas para un proyecto sobre una adecuada resistencia a las deformaciones o excesiva rigidización que puede ocasionar fisuras y fracturas. Ante estas situaciones los aditivos poliméricos modifican el asfalto para mejorar sus propiedades. El efecto principal es el cambio en la relación de temperatura-viscosidad lo que mejora su comportamiento tanto a altas como a muy bajas temperaturas. Dentro de los motivos por los cuales se adicionan polímeros a los asfaltos se encuentra la necesidad de mejorar el comportamiento ante la fatiga, aumentar la cohesión interna, reducir la susceptibilidad térmica y aumentar la resistencia al envejecimiento.

De manera beneficiosa está comprobado que la adición de cal hidratada como filler de la mezcla, tal y como evidenció (Bianchetto H. e., 2007), permite numerosas mejoras en el desempeño del asfalto las cuales son atribuidas a la incorporación de polímeros. Dentro de los polímeros más utilizados en el diseño de mezclas asfálticas se encuentra la incorporación de co-polímero de Etil-Vinil-Acetil (EVA), Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) y estireno Butadieno (SB) teniendo como efectos principales la reducción en la penetración del asfalto, una reducción en la susceptibilidad térmica y un incremento del punto de ablandamiento.

(EULA, European Lime Association, 2010) menciona numerosos estudios donde se ha confirmado que la cal hidratada junto con los polímeros modificadores de asfalto actúa entre sí de manera sinérgica obteniendo comportamientos muy interesantes del ligante respecto a su viscosidad. Sin embargo, la modificación con polímeros es algo extremadamente caro en comparación con el uso de cal hidratada como aditivo lo cual permite plantear preguntas como qué modificación es la que más vale la pena utilizar. Por ejemplo, en Francia, B. Brulé mostró que con un asfalto poroso con un contenido de 7% de co-polímero EVA modificando el asfalto se obtenían las mismas pérdidas al cántabro que con el 1% de cal adicionada al bitumen y ensayado bajo la misma prueba. Además, en cuanto al rutting, P. Cramer encontró que bajo el ensayo de HWTD (“Hamburg Wheel Tracking Device” AASHTO T324) una mezcla SMA (“Stone Mastic Asphalt”) modificada con polímero obtenía los mismos resultados de ahuellamiento que una mezcla con 1.4% de cal hidratada. En Norte América, los ácidos polifosfóricos (PPA) se están utilizando con la finalidad de rigidizar los asfaltos y es una tecnología en creciente uso y desarrollo.

A pesar de la naturaleza ácida de estos compuestos, se ha llegado a pensar que la interacción de estos materiales con la cal hidratada anularía por completo su efecto, sin embargo, información publicada recientemente por T. Arnold mostró que la modificación de asfaltos combinando PPA con cal hidratada al 1% no modifico los resultados de ahuellamiento en el ensayo HWTD. Por lo tanto, basados en las investigaciones mencionadas, se concluye que las propiedades modificadoras poliméricas pueden alcanzarse de manera más barata utilizando cal hidratada como filler, además de tener la posibilidad de combinar ambos materiales para elevar más aún el desempeño y resistencia mecánica del asfalto.

L. Aditivos anti-desnudantes (anti-stripping)

El daño por humedad es una de las razones más comunes por la que una mezcla asfáltica falla y pierde sus propiedades. Usualmente los efectos de daño por humedad en una mezcla se ponen en evidencia al observar el desprendimiento del agregado debido a una superficie efectiva de adherencia mala en la que la presencia de humedad debilita el área de contacto y en consecuencia desprende el agregado grueso del mastico asfáltico. Existen distintos aditivos dentro de los que se encuentran:

Cuadro 8: Propiedades generales de aditivos comúnmente utilizados como mejoradores de adherencia.

Aditivo	Morlife 5000	Gripper L /Shell Bond
Fabricante	Dow Chemical Company	Kao Chemical Europe
Aspecto y consistencia	Líquido café oscuro	Líquido amarillo
Densidad	9.1 lb/gal	-
Gravedad Específica	1.09	-
Punto de pour	12°C (10°F)	-
Punto de Flash	145°C (293 °F)	-
Dosis recomendada	0.25 - 1% / Peso Asfalto	0.2 – 1.0 % /Peso Asfalto

(MeadWestvaco Corporation, 2012) y (Kao Chemicals S.A., 2004)

M. Requisitos y pautas para el diseño de mezcla en caliente (HMA)

El diseño de una mezcla asfáltica se realiza en función de las demandas de tránsito a las que se verá sometido un asfalto al momento de endurecerse. Las bases para el diseño de estos pavimentos flexibles requieren tomar en cuenta la frecuencia de aplicación de carga y sus respectivos ciclos. En el caso de las mezclas asfálticas los controles más importantes que deben realizarse se refieren al porcentaje de vacíos llenos de aire, el grado de compactación de la mezcla y su rigidez. En general, para el diseño de las mezclas existen diferentes metodologías dentro de las que se encuentran la metodología Hveen, Marshall y “superior performing asphalt pavements” conocida por sus siglas en inglés como SUPERPAVE. La primera metodología es antigua y suele ser utilizada para el diseño de mezclas densas, por su parte la metodología Marshall a pesar de haber sido creada en 1939 es una de las más utilizadas requiriendo únicamente el equipo para compactación y ensayo de las briquetas fabricadas. Por último, la metodología SUPERPAVE del año 1993 se basa en el análisis volumétrico de las mezclas y su categorización en función de niveles de demanda de tránsito para el diseño. La metodología utiliza distintos ensayos con máquinas específicas para la caracterización de los agregados y el betún según su grado de desempeño. En Guatemala, la adopción del sistema SUPERPAVE ya es evidente, sin embargo, por su facilidad y bajo costo de ensayo, la metodología Marshall sigue siendo la más utilizada y difundida para el diseño de mezcla. A nivel centroamericano, a pesar que cada país posee una normativa para el diseño de carreteras, (SIECA, 2004) ha dictado las pautas generales de requisitos para el diseño de mezclas asfálticas en caliente. Tanto para la metodología Marshall como para la metodología SUPERPAVE, existen requisitos mínimos que deben cumplirse respecto a los agregados, el ligante asfáltico y el desempeño de la mezcla realizada. A continuación, se muestran los requisitos de diseño propuestos:

Cuadro 9: Requisitos de mezclas diseñadas por método Marshall según tabla 401-1.

Parámetros de diseño	Mezcla Marshall
(a) Marshall (AASHTO T245)	
1. Estabilidad (kN)	8-20
2. Flujo (1/100cm)	20-40
3. Vacíos en la mezcla (%)	3-5
4. Vacíos de agregado mineral (%) mín	Ver tabla 3 (Tabla 401-2 SIECA).
(b) Inmersión-Compresión (AASHTO T 165/T 167)	
1. Resistencia a compresión (MPa) mín	2.1
2. Resistencia retenida (%) mín	75
3. Vacíos en especímenes de prueba (%)	6-8
(c) Tensión indirecta (AASHTO T 383)	
1. Resistencia retenida (%) mín	75
2. Saturación de los especímenes de prueba (%)	55-80
3. Vacíos en los especímenes de prueba (%)	6-8
(d) Razón Polvo/Asfalto Efectivo ⁶	0.6-1.3

(SIECA, 2004)

Los porcentajes mínimos de vacíos especificados por el manual centroamericano de diseño para el buen desempeño de una mezcla en función del tamaño nominal de los agregados se muestran a continuación:

Cuadro 10: Porcentaje mínimo de vacíos (VMA) requerido en mezclas. Valores en función de la metodología de diseño según tabla 401-2.

Tamaño nominal del agregado		Porcentaje mínimo de vacíos	
mm	in	Marshall	Superpave
2.36	No .8	21.0	-
4.75	No. 4	18.0	-
9.5	3/8	16.0	15.0
12.5	½	15.0	14.0
19	¾	14.0	13.0
25	1	13.0	12.0
37.5	1 ½	12.0	11.0
50	2	11.5	10.5

(SIECA, 2004)

⁶ La tasa es la razón que incluye el porcentaje en peso de aditivos no líquidos, como cal, relleno mineral y material que pasa el tamiz No.200 respecto a la cantidad de asfalto efectivo en una mezcla (Asfalto efectivo = Asfalto Total - Asfalto Absorbido).

Además de los requisitos de la mezcla, previo a realizarla se requiere un control de calidad de los agregados y del betún de tal manera que pueda asegurarse un buen desempeño de los materiales. Para el agregado grueso (Material retenido en tamiz No. 4) es necesario verificar las siguientes condiciones y calificarlo como un buen agregado para utilizarse en una mezcla en caliente.

Cuadro 11: Límites permisibles para el agregado grueso establecidos por Caminos.

Ensayo para control del agregado grueso	Límites permisibles
Abrasión de los ángeles (AASHTO T 96)	40% Máximo
Desintegración en sulfato de sodio a 5 ciclos (AASHTO T 104)	12% Máximo
Caras fracturadas en 1 cara	90% Mínimo
Caras fracturadas en 2 caras	75% Mínimo
Partículas planas o alargadas	8% Máximo

(Caminos, 2001)

Para el Agregado fino:

Cuadro 12: Límites permisibles para el agregado fino establecidos por Caminos.

Ensayo para control del agregado	Límites permisibles
Equivalente de arena (AASHTO T 176)	35% Máximo
Índice de plasticidad (AASHTO T 90)	4% Máximo
Graduación N°2 o N°3	90% Mínimo

(Caminos, 2001)

La granulometría de los agregados controla el contenido de vacíos en una mezcla y usualmente es una granulometría basada en los requisitos de diseño para ciertas condiciones de servicio de un pavimento. A pesar de ello, los manuales de diseño de (Caminos, 2001) y (SIECA, 2004) proponen ciertas granulometrías⁷. Las curvas de granulometría presentadas a continuación pertenecen a mezclas densas de concreto asfáltico.

⁷ Existen ciertas diferencias entre las curvas de granulometría propuestas por SIECA y CAMINOS por lo que se sugiere optimizar la curva para satisfacer el criterio requerido en un proyecto.

Cuadro 13: Gradación de los agregados para pavimentos de concreto asfáltico según ASTM D 3515.

Tamaño del tamiz	Porcentaje en masa que pasa el tamiz designado (AASHTO T 27 y T11)					
	Graduación designada y tamaño máximo nominal					
	A(50.8 mm)	B(38.1 mm)	C(25.4 mm)	D(19.0 mm)	E(12.5 mm)	F(9.5 mm)
	2"	1 ½"	1"	¾"	½"	3/8"
63.00 mm	100					
50.00 mm	90-100	100				
38.10 mm	-	90-100	100			
25.00 mm	60-80	-	90-100	100		
19.00 mm	-	56-80	-	90-100	100	
12.50 mm	35-60	-	56-80	-	90-100	100
9.50 mm	-	-	-	56-80	-	90-100
4.75 mm	17-47	25-53	29-59	35-65	44-74	55-85
2.36 mm	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67
0.30 mm	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23
0.075 mm	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10

(Caminos, 2001)

Es importante indicar que además de los requisitos mínimos de diseño mencionados, cuando hay incorporación de material de relleno mineral (filler) como ocurre cuando se incorpora cal, (Caminos, 2001) sugiere cumplir los requisitos de granulometría para la cal hidratada mostrados a continuación.

Cuadro 14: Granulometría de cal hidratada para adición a mezclas en caliente según AASHTO M17.

Estándar (mm)	Tamiz No.	Porcentaje total que pasa un tamiz de abertura cuadrada (AASHTO T 37)
0.600	30	100 %
0.300	50	95-100 %
0.075	200	70-100 %

(Caminos, 2001)

V. MATERIALES Y METODOLOGÍA

A. Materiales y equipos

- 20 Kg de Cal hidratada Horcalsa® Tipo S.
- 150 Kg de agregado grueso de ¾”.
- 150 Kg de agregado grueso de ½”.
- 200 Kg de agregado fino clasificado como arena triturada.
- 6 galones de bitumen de clasificación AC-30 Tabla II según ASTM D 3381.
- 1 Balanza analítica Ohaus® con capacidad de 3000 ± 0.01 g y balanza analítica Ohaus® con capacidad de 30000 ± 0.1 g.
- 1 Termómetro digital infrarojo Hioki® (con rangos de medición de -60 a 550 °C) y termómetro análogo.
- 1 Pila a temperatura ambiente para la inmersión de probetas con su canasta de soporte.
- 1 Pisón compactador de briquetas Marshall con su respectivo pedestal normado según ASTM D 6926.
- 1 Picnómetro con su bomba al vacío, con sello hermético y con capacidad de soportar presión de vacío con un manómetro capaz de medir presiones $0-760 \pm 0.5$ mmHg con su válvula de purga y marco de soporte en conformidad con ASTM D 2041.
- 1 Juego de moldes de acero con tapa de fondo para compactación de probetas Marshall en conformidad con ASTM D 6926.
- 1 Extractor de testigos y especímenes compactados en laboratorio.
- 1 Baño en maría para acondicionamiento de las probetas de mezcla asfáltica con un control de temperatura de hasta 90 ± 1 °C.
- 1 Marco de prueba y máquina para ensayo de estabilidad en briquetas por método Marshall en conformidad con ASTM D 6927 con su respectivo anillo de carga y deformímetro calibrado para la medición del flujo. Además, anillo de carga para resistencia indirecta a la tensión (IDT) de Lottman conforme a ASTM D 6931.
- 1 Horno Despatch® con capacidad de mantener una temperatura de 110 ± 1 °C.

B. Metodología

Debido a que se quería evaluar el mejoramiento en las propiedades de una mezcla y el desempeño en susceptibilidad al daño producido por la humedad, el experimento se diseñó con el objetivo de analizar los parámetros volumétricos, la rigidez de la mezcla y conocer el desempeño de estas en condiciones de presencia de agua. Las únicas variables que se alteraron para realizar cada diseño de mezcla fueron el contenido de cal hidratada y el contenido de asfalto (tipo AC-30) en la mezcla. Para ello, se dejaron fijos los parámetros de temperatura de mezclado y compactación, tipo de cemento asfáltico utilizado, granulometría de referencia, energía de compactación y los tiempos de tanto ensayo como acondicionamiento de muestras. Los métodos de diseño y acondicionamiento para el desgaste en condición de presencia de agua se realizaron siguiendo las sugerencias del manual de métodos para el diseño de mezclas asfálticas en caliente del Instituto Estadounidense del Asfalto, Manual “MS-2” y las especificaciones para el control de calidad de materias primas tanto del Manual Centroamericano para diseño de Pavimentos como del Manual de Especificaciones Generales para la construcción de carreteras de la dirección de Caminos. Para cumplir con los objetivos planteados, se completó la fabricación de 54 briquetas asfálticas para el diseño de tres mezclas bajo la metodología Marshall. Cada una de las mezclas a diseñar poseía distinto porcentaje de cal hidratada (0%, 1% y 2%), un grupo de cinco posibles dosificaciones de asfalto (ensayando especímenes desde el 4% al 6% en incrementos de 0.5%) y una bachada para validar la selección del contenido óptimo de asfalto para cada diseño la cual fué escogida a través de la interpolación de los gráficos utilizados para determinar el valor óptimo de asfalto en cada uno de los diseños de mezcla, tal y como recomienda el manual MS-2. Con esta información fue posible realizar el diseño de cada mezcla usando como ayuda para la selección del contenido óptimo de asfalto, el comportamiento en parámetros de resistencia y volúmenes de cada grupo de probetas. Además, la investigación completó la fabricación de un grupo extra de 36 probetas con el objetivo de comparar los efectos de distintas dosis de cal hidratada y un aditivo líquido a base de amina para reducir los daños por la humedad en un pavimento asfáltico. En total, se fabricaron 90 especímenes para su ensayo.

Tal y como puede observarse en el Cuadro 15, la fase experimental se dividió en dos partes: la primera consistió en el diseño de mezclas a distinto contenido de cal hidratada para determinar el contenido de asfalto óptimo para cada mezcla y la segunda fase consistió en evaluar el desempeño en tensión indirecta (“Indirect Tensile Strength”) de distintas dosis de cal con respecto a una muestra patrón y con aditivo líquido. La codificación asignada a cada probeta para fines de identificación durante los ensayos de ambas fases se presenta a continuación:

Cuadro 15: Categorización y codificación de briquetas. Clasificación hecha según el contenido de cemento asfáltico, cal hidratada, aditivo líquido y condición de desgaste a la que se sometieron las muestras.

Fase 1: Diseño de mezcla por el método Marshall				Fase 2: TSR de dosificaciones con aditivo				
Código	Contenido de asfalto	Código	Contenido de cal	Código	Aditivo	Dosis	Código	Condición
A	4.0%	0	0%	C0	Ninguno	0.0%	S	Seca
B	4.5%	1	1%	C05	Cal Hidratada	0.5%	H	Húmeda
C	5.0%	2	2%	C1		1.0%		
D	5.5%			C15		1.5%		
E	6.0%			C2		2.0%		
				M3	Morlife 5000®	0.3%		

Para la primera fase de ensayos, se realizaron tres diseños de mezcla utilizando respectivamente contenidos de cal hidratada de 0%, 1% y 2% sobre el peso del agregado con rangos de contenido de asfalto en incrementos de 0.5% para valores entre el 4-6%. En total, para esta fase, se fabricaron un total de 45 briquetas compactadas a 75 golpes por cara para las que se obtuvieron los parámetros volumétricos y de estabilidad-flujo de Marshall. Respecto a la curva granulométrica de la mezcla, se utilizó como referencia la granulometría tipo B según ASTM D 448 ajustada a los requisitos constructivos del FOVIAL, El Salvador, para mezcla de TMN ¾". La granulometría escogida correspondió a los tamaños de partículas usualmente empleados dentro de la industria de producción de mezclas asfálticas en caliente en El Salvador junto con los tamaños nominales de 1/2" y 3/4" debido a que todo el modelo de trabajo se adecuó pensando en establecer una dosis de diseño para construir en un futuro dos tramos de prueba para evaluar la alternativa aquí planteada. Esta parte del experimento sirvió para determinar las curvas de comportamiento respecto a cambios volumétricos y de resistencia de las mezclas con distinto contenido de cal hidratada y asfalto. De este modo es posible correlacionar los comportamientos e interpolar entre curvas para determinar la influencia de adicionar cal hidratada en una mezcla asfáltica en caliente.

En cuanto a la segunda fase, referida al acondicionamiento de las muestras en presencia de humedad, se fabricaron un total de seis probetas para cada juego de las condiciones con incorporación de cal hidratada en valores entre 0-2% con incrementos de 0.5% y aditivo líquido anti-desvestimiento en dosis de 0.3% sometiendo la mitad de las muestras a daño por humedad y el resto manteniéndolas en estado seco a temperatura ambiente. En total, se fabricaron 36 probetas compactadas a 15 golpes en las que el contenido de asfalto se mantuvo constante utilizando como valor el contenido óptimo de asfalto determinado para el diseño de mezcla sin incorporación de cal hidratada de la primera fase. El motivo de esta decisión fue que, según la literatura consultada, debido a la adición de cal hidratada el contenido de asfalto óptimo tiende a reducirse debido al comportamiento de filler de la cal hidratada.

Las condiciones para simulación de presencia de humedad en la mezcla se lograron sometiendo cada briqueta a una presión de saturación de 525 mm Hg y baño en agua a temperatura controlada de 60°C por 1 día de inmersión. El interés de este acondicionamiento reside en que se pretendía analizar la influencia de la presencia de humedad en la resistencia de una mezcla asfáltica en caliente y el efecto potencial de la cal en la reducción de los daños generados a un largo plazo por esta condición de desgaste. Al final de esta fase, se realizó una comparación del desempeño entre el rango de valores dosificados para cal hidratada y un análisis comparativo con respecto a un aditivo líquido mejorador de adherencia.

A grandes rasgos, el experimento diseñado permite con poco material obtener una muestra representativa del comportamiento de la mezcla asfáltica en caliente con el objetivo de ensayarla y observar los cambios en sus propiedades físicas dependiendo de la concentración de cal agregada como aditivo. Para controlar el comportamiento de las distintas variables involucradas en el diseño se propuso el uso de las siguientes normas para realizar los ensayos de control:

Cuadro 16: Ensayos de caracterización de mezclas asfálticas con incorporación de cal como aditivo.

Material de ensayo	Ensayo	Normas			Variable obtenida
		ASTM	AASHTO	COGUANOR	
Agregado y cal	Granulometría	C 136-06	T 27 - T 11	NTG 41010 h1	Curvas de ajuste granulométrico y MF
Agregado grueso	Determinación de partículas planas y alargadas	D 4791-10		NTG 41010 h12	Planicidad (%)
Agregado grueso	Estabilidad al desgaste por sulfato de sodio/magnesio	C 88-05	T 104	NTG 41010 h6	Desgaste (%)
Agregados	Densidad aparente e índice de vacíos	C 29	T 19	NTG 41010 h2	Densidad de los agregados
Agregado grueso	Densidad relativa y absorción del grueso	C 127	T 85	NTG h41010 h8	% Absorción de grueso (%)
Agregado fino	Densidad relativa y absorción del fino	C 128	T 84	NTG h41010 h9	Absorción de fino (%)
Agregados	Humedad del agregado	C 566-97	N/A	NTG h41010 h19	Contenido de humedad (%)
Agregado grueso	Abrasión en máquina los ángeles	C 131	T 96	-	Material de pérdida desgastado (%)
Agregado fino	Equivalente de arena	D 2419	T 176	-	Equivalente Arena (%)
Asfalto	Penetración	D 5	M 20	-	Penetración (dmm)
Asfalto	Punto de ablandamiento	D 36	T 53	-	Temperatura de ablandamiento (°C)
Asfalto	Viscosidad Brookfield	D 4402-06	TP 48	-	Viscosidad dinámica cP
Asfalto	Gráfico de viscosidad-Temperatura	D 2493 - 01		-	Temperaturas de mezcla y compactación (cP/°C)
Asfalto	Ductilidad	D 113	T 51 - 00	-	Elongación (cm)

Continuación Cuadro 16

Material de ensayo	Ensayo	Normas			Variable obtenida
		ASTM	AASHTO	COGUANOR	
Asfalto	Solubilidad en tricloretileno	D 2042	-	-	Material soluble e insoluble (%)
Asfalto	Envejecimiento en horno rotatorio de película delgada (RTFOT)	D 1754	T 179	-	Pérdida de masa (%)
Mezcla HMA	Fabricación de briquetas Marshall/ estabilidad-fluencia	D 1559	T 245-97	-	P (Kgf) y d (mm), módulo Marshall (Kgf/mm)
Mezcla HMA	Gravedad específica en condición SSS	D 2726 o D1188	T 166 o T 275	-	Gmb
Mezcla HMA	Porcentaje de vacíos llenos de aire	D 3203-88	-	-	Va
Mezcla HMA	Gravedad específica teórica máxima	D 2041	T209	-	Gmm
Mezcla HMA	Efectos de la humedad en mezclas asfálticas en caliente	D 4867			St (kPa) y TSR (%)

C. Procedimiento

1. Muestreo completo de los agregados y control de calidad.
2. Muestreo del asfalto y análisis de reología del asfalto para control de calidad.
3. Análisis de los resultados del muestreo y selección de materias primas a utilizar.
4. Ajuste de curva granulométrica para cumplir con los requisitos de SIECA/CAMINOS y FOVIAL, El Salvador.
5. Fabricación de serie de briquetas por método Marshall (ASTM D1559) para el diseño de 3 mezclas asfálticas en caliente con contenido de 0%, 1% y 2% de cal hidratada.
6. Ensayo del grupo de briquetas en parámetros volumétricos y de estabilidad-flujo Marshall.
7. Análisis volumétrico y del comportamiento mecánico de las mezclas diseñadas.
8. Fabricación y acondicionamiento en condiciones de humedad (ASTM D 4867) de probetas con adiciones de cal hidratada y aditivo líquido.
9. Ensayo de diseño mecánico de resistencia a la tensión indirecta retenida de Lottman (ASTM 6831) para grupo de briquetas para calcular el TSR de susceptibilidad a la humedad.
10. Análisis del comportamiento en tensión indirecta (“Indirect Tensile Strength”) e índice a la tensión (“Tensile Strength Ratio”).

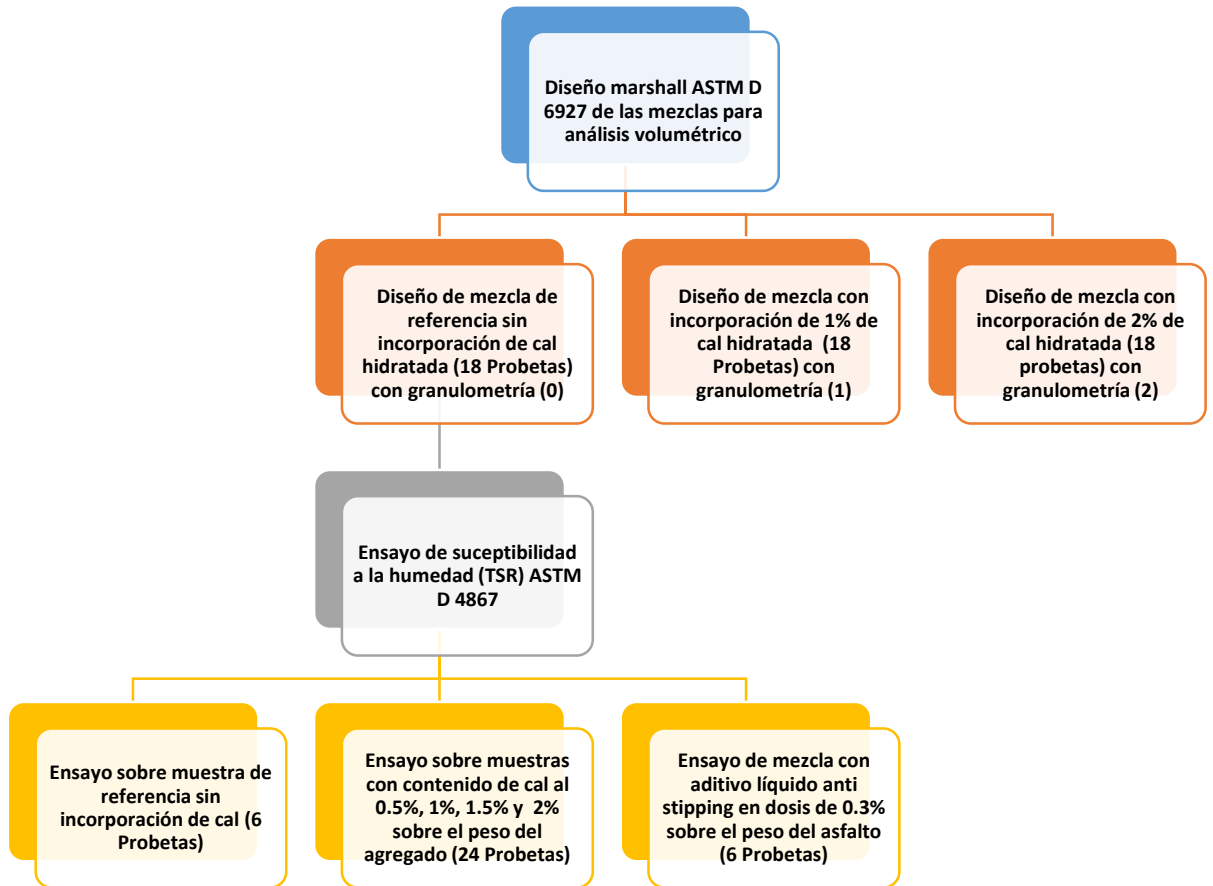
11. Selección de la dosificación óptima de cal hidratada basada en el análisis volumétrico, elástico y de susceptibilidad a la humedad de las mezclas estudiadas.

El procedimiento para el diseño experimental de la investigación inició con el muestreo completo del agregado que iba a utilizarse en conformidad con las mezclas de granulometría especificadas por el libro azul para mezclas HMA. Si las curvas granulométricas de material de cantera no cumplían con los requisitos del manual esta granulometría debía ajustarse. Una vez que se poseía este material, se llevó a cabo el diseño de mezcla tomando en cuenta la inclusión de cal hidratada como adición. Para el diseño se plantearon 3 condiciones de contenido de cal correspondientes al 0%, 1% y 2%. Una vez que se poseían las mezclas con su respectivo contenido de cal, se continuó por fabricar todas las muestras para la realización de los ensayos destructivos propuestos. En esta fase fue de suma importancia cuidar la fabricación y homogeneidad de cada probeta ya que para cada condición únicamente se utilizaron 3 especímenes por el hecho que replicar más muestras duplicaría el volumen de probetas a muestrear. Para ello fue importante controlar la temperatura de mezclado y compactación de la mezcla de acuerdo con la carta de viscosidad del asfalto AC-30 utilizado.

Todos estos datos generados se procesaron para analizar la influencia de la adición de cal hidratada y el comportamiento de distintos contenidos de asfalto con respecto a los valores volumétricos y de resistencia a la prueba de estabilidad y flujo de Marshall. De este modo fue posible determinar patrones de comportamiento para el asfalto y posteriormente realizar la segunda fase del proyecto.

La segunda fase requirió de la fabricación de 6 juegos de probetas con 6 especímenes cada uno en los que se comparó con respecto a una muestra de referencia el desempeño de 4 dosificaciones de cal hidratada y una de aditivo líquido anti-desvestimiento a base de aminas, con respecto a su resistencia a la tensión diametral. Esta segunda fase se estructuró de tal manera que fuera posible determinar cambios en la resistencia por un amplio rango de contenidos de cal hidratada y además obtener información con respecto a alguna condición de daño o desgaste a los que se somete una mezcla asfáltica, escogiendo el daño por humedad como propiedad a investigar. Para ello la mitad del juego de probetas se sometió a inmersión y saturación mientras el resto de muestras se conservaron en estado seco. Para ambas condiciones se procedió a realizar un ensayo de tensión indirecta con el cual se pudo describir el comportamiento de la mezcla respecto al daño por la presencia de humedad. En la Figura 11 se detalla el procedimiento del experimento realizado.

Figura 11: Diagrama de flujo de la fase experimental del proyecto



VI. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

A. Control de calidad cemento asfáltico

El objetivo principal de la presente investigación consistió en describir los cambios a nivel volumétrico, de resistencia y desempeño en condiciones de humedad de una mezcla asfáltica en caliente con la adición de cal hidratada Horcalsa® para obtener patrones de comportamiento de una mezcla asfáltica.

El cemento asfáltico utilizado para los diseños y fabricación de probetas compactadas en laboratorio era procedente de la planta de refinería Perenco Guatemala Limited® clasificado según viscosidad como un cemento asfáltico tipo AC-30 tabla II según ASTM D3381. A continuación, en el Cuadro 17 y Cuadro 18 se presentan los resultados de estudio reológico y control de calidad del cemento asfáltico usado para la investigación.

Cuadro 17: Clasificación de asfalto por viscosidad según Tabla 2 ASTM D 3381-05⁸.

Ensayo	Requisito de norma	Resultado obtenido
Viscosidad 60 °C, P	3000 ± 600	3282
Viscosidad 135 °C, cSt	350	523
Penetración 25°C, 100 g, 5 s, min, dmm	50	65
Punto de inflamación °C	232	270
Solubilidad en tri-cloroetileno, % min	99.00	99.97
Ductilidad RTFOT 25°C 5cm/min	40	143

Con el objetivo de cumplir con los rangos de viscosidad para mezclado y compactación de las mezclas, se utilizó la carta de viscosidad del asfalto determinando las temperaturas de trabajo en condiciones de laboratorio para este asfalto de la manera siguiente:

Cuadro 18: Resumen para carta de viscosidad-temperatura para asfalto AC-30 según ASTM D-2493.

Parámetro	Viscosidad, cP	Temperatura de trabajo, °C
Viscosidad de compactación	280 ± 30	145-150
Viscosidad de mezclado	170 ± 20	150-160

⁸ Se adjunta el certificado de asfalto en apéndice D: Reología y carta de viscosidad del cemento asfáltico.

B. Control de calidad de los agregados

El muestreo de los agregados utilizados para realizar la mezcla se hizo siguiendo los procedimientos especificados por la norma ASTM D 75 obteniendo las muestras de agregado de los apilamientos para material de ¾”, ½” y arena triturada localizados dentro de una planta asfáltica. El material era procedente de la cantera San Diego, localizada en el departamento de La Libertad, El Salvador. Para evitar la segregación se mezcló bien el material más fino localizado en la parte baja de la pila obteniendo un total de 600 Kg para los 3 materiales usados como pétreos de la mezcla.

Producto del muestreo del material se obtuvieron los resultados⁹ del Cuadro 19 los cuales se evaluó si cumplían con los requisitos para el diseño de mezclas asfálticas en caliente especificados por el reglamento para construcción de puentes y carreteras (Caminos, 2001).

Cuadro 19: Control de calidad de agregados para mezcla y ajuste de granulometría según libro azul.

Ensayo para control del agregado	Límites permisibles	Grava ¾”	Grava ½”	Arena triturada
Curva de ajuste para clasificación según (ASTM C33)	N/A	No cumple con ¾”-3/8”	No cumple con ½” – No 4.	Arena Triturada
Graduación para abrasión de los ángeles (ASTM C 131)	N/A	B	C	N/A
Abrasión de los ángeles (ASTM C 131)	35% Máximo	Cumple con 16.3%	Cumple con 10.7%	N/A
Grumos de arcilla y partículas desmenuzables (ASTM C 142)	N/A	0.42%	0.36%	0.96%
Partículas planas y alargadas (ASTM D 4791)	8% Máximo	Cumple con 2.73%	Cumple con 0%	N/A
Partículas de caras fracturadas (ASTM D 5821)	90% Mínimo	Cumple con 99.9%	Cumple con 99.9%	N/A
Desintegración en sulfato de sodio a 5 ciclos (ASTM C 88-05)	12% Máximo	Cumple con 0.77%	Cumple con 0.26%	Cumple con 1.3%
Materia orgánica (ASTM C40)	1 Máximo	N/A	N/A	Cumple con 0
Equivalente de arena (ASTM D 2419)	35% Mínimo	N/A	N/A	Cumple con 65%

⁹ Las copias completas de los informes de laboratorio se incluyen en los apéndices de este trabajo.

Todos los materiales utilizados como agregados cumplieron con los requisitos para abrasión en máquina de Los Ángeles, durabilidad, disgregabilidad en sulfato de sodio, partículas planas-alargadas y caras fracturadas establecidos por las especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes (Caminos, 2001), pero no cumplieron con la gradación granulométrica para las bandas de trabajo de ASTM C33 pues son agregados mal graduados. A pesar de esto, la gradación discontinua se corrigió al combinar los agregados como se explica más adelante. Las propiedades físicas y volumétricas de los agregados utilizados se presentan a continuación, siendo el valor más importante la densidad en condición seca del agregado la cual sirve como base para el cálculo de la gravedad específica de la combinación de ajuste granulométrico de los agregados y análisis volumétrico de la mezcla.

Cuadro 20: Propiedades físicas y volumétricas de los agregados pétreos.

Propiedad	Norma ASTM	Grava 3/4"	Grava 1/2"	Arena triturada
Densidad relativa (S)	C 127 / C 128	2.563	2.570	2.540
Densidad relativa (SSS)		2.581	2.603	2.579
Densidad aparente		2.609	2.660	2.643
Absorción		0.69%	1.31%	1.54%
Módulo de Finura	C 33	4.45	3.23	3.44
Pasa tamiz No 200		0.02%	2.71%	5.97%
Densidad suelta, kg/m ³	C29	1359	1416	1658
Densidad compactada, kg/m ³		1513	1525	1823

C. Ajuste de curva de granulometría y rangos de trabajo

Según las curvas granulométricas de cada agregado, se realizó un ajuste teórico de la granulometría combinando las curvas para obtener los siguientes resultados. Para establecer la granulometría óptima, se realizó ajustando la combinación de los agregados sin la inclusión de cal hidratada (granulometría patrón) para luego añadir el material a la curva cuidando no sobre pasar los límites de granulometría con esta adición.

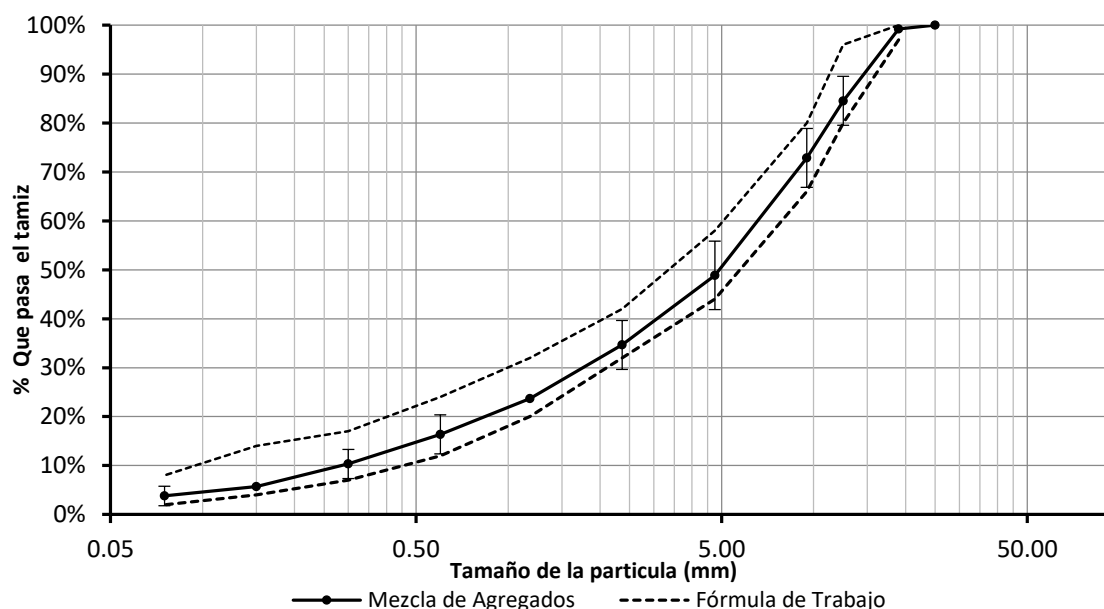
Cuadro 21: Granulometría de los agregados y mezcla combinada con adiciones de cal hidratada¹⁰. Mezcla realizada con el objetivo de cumplir con los requisitos del SIECA y “Libro azul” de Caminos.

No.	Nombre	G.E. Bulk	Porcentaje	Procedencia
1	Grava 3/4"	2.563	20.00 %	La Cantera San Diego, La Libertad, El Salvador
2	Grava 1/2"	2.570	30.00 %	La Cantera San Diego, La Libertad, El Salvador
3	Arena Triturada	2.522	50.00 %	La Cantera San Diego, La Libertad, El Salvador
4	Cal Hidratada	2.300	Varía	Cementos Progreso Planta San Miguel, Sanarate, Guatemala

Mezcla de agregados													
Malla		Grava 3/4"	Grava 1/2"	Arena triturada	Cal hidratada	Mezcla de agregados (0)	Mezcla con 1 % cal (1)	Mezcla con 2 % cal (2)	SIECA 703-8 Graduación B		Tol. ±	Fórmula de trabajo	
NOMBRE	mm	20.00 %	30.00 %	50.00 %	0.00%	100.00 %	100.00 %	100.00 %	Mín	Máx.		Mín.	Máx.
1"	25.00	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0					
3/4"	19.00	96.1	100.0	100.0	100.0	99.2	99.2	99.2	97	100		97	100
1/2"	12.50	36.8	90.6	100.0	100.0	84.5	84.7	84.8	80	96	±5	80	96
3/8"	9.50	21.1	62.1	100.0	100.0	72.9	73.1	73.4	66	80	±6	66	80
No. 4	4.75	0.6	10.0	91.5	100.0	48.8	49.4	49.9	44	58	±7	44	58
No. 8	2.36	0.1	8.1	64.4	100.0	34.6	35.3	36.0	33	42	±5	32	42
No. 16	1.18	0.1	6.5	43.4	100.0	23.7	24.4	25.2	20	32		20	32
No. 30	0.60	0.0	5.2	29.6	99.8	16.4	17.2	18.1	12	24	±4	12	24
No. 50	0.30	0.0	4.3	18.1	99.8	10.3	11.2	12.1	7	17	±3	7	17
No. 100	0.15	0.0	3.5	9.3	99.8	5.7	6.6	7.6	4	14		4	14
No. 200	0.075	0.0	2.7	6.0	99.4	3.8	4.8	5.7	2	8	±2	2	8

(Caminos, 2001)

Gráfico 4: Granulometría combinada de los agregados para la muestra patrón (0) sin cal.



¹⁰ Curva detallada en apéndice C: Informes de laboratorio para el control de calidad de las materias primas utilizadas. Dado que la cal hidratada se adiciona en función del peso de los agregados, los porcentajes de grava y arena para las granulometrías con cal incorporada tienen una disminución. Ver Cuadro 22.

Como puede observarse en el Cuadro 21, al adicionar cal hidratada sobre el peso total de los agregados las curvas de granulometría se densifican con el aumento en el porcentaje que pasa los tamices superiores al No.200 pero la adición de cal hidratada en hasta un 2% no supera las bandas de trabajo utilizadas para el diseño. El impacto de este aumento en los finos se evalúa más adelante analizando como varía la relación filler /asfalto para las mezclas realizadas. Si la adición de cal aumenta el contenido de finos, los espacios vacíos de la mezcla se espera que disminuyan y se comporten de manera inversamente proporcional al contenido de cal hidratada.

Tal y como se observa, los diseños de mezcla cambian un poco su granulometría en función de la cal hidratada añadida, por lo tanto, cuando en este documento se refiera a curva granulométrica es importante distinguir que la granulometría (0) corresponde a la muestra patrón, (1) a la de 1% de cal y (2) a la del 2% de cal hidratada. Con el objetivo de realizar el análisis volumétrico de las mezclas, se calculó la gravedad específica Bulk de la mezcla de los agregados a partir de la gravedad específica individual y la proporción presente de cada agregado utilizando la Ecuación 1:

Ecuación 1: Gravedad específica de la mezcla de agregados

$$Gsb = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} \%P_i}{\sum_{i=1}^{n_i} \frac{\%P_i}{Gsb_i}}$$

Cuadro 22: Variación de la gravedad específica seca de la mezcla de agregados con la modificación del contenido de cal hidratada.

Granulometría	Tipo de mezcla	Proporciones usadas sobre el peso total del agregado (%)				Gravedad específica de los agregados
		¾"	½"	Arena triturada	Cal	G _{sb}
(0)	Patrón - 0% cal	20.0	30.0	50.0	0.0	2.554
(1)	1% cal	19.8	29.7	49.5	1.0	2.551
(2)	2% cal	19.6	29.4	49.0	2.0	2.548

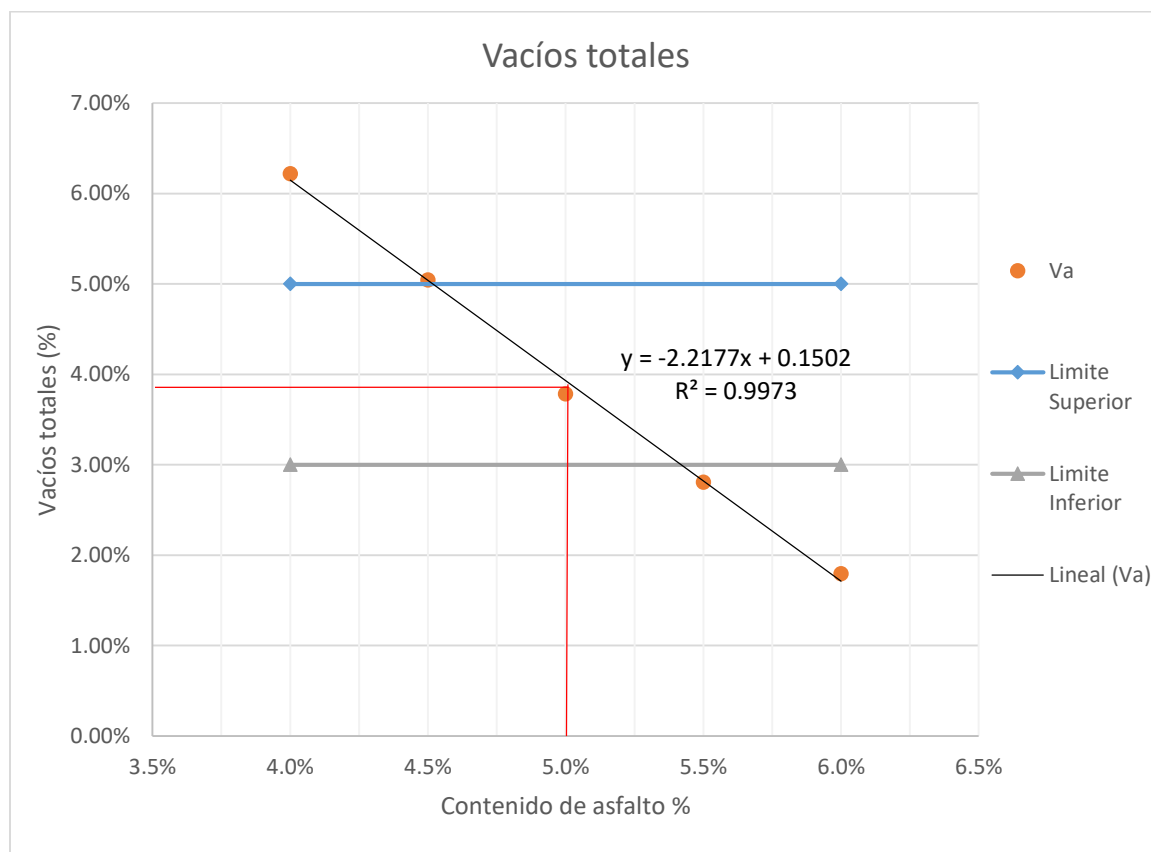
Para cada uno de los tres diseños de mezcla realizados se fabricó un total de 5 juegos de dosis de asfalto (cubriendo los contenidos de 4%, 4.5%, 5%, 5.5% y 6 % de asfalto) con 3 briquetas para cada uno. Estas briquetas se sometieron a ensayos de control de diseño bajo la metodología Marshall establecidos por la norma ASTM D 6927 para estabilidad, flujo y realizar un análisis volumétrico de las muestras. La fase de diseño de mezcla permitió evaluar el desempeño de la cal hidratada en el rango de porcentajes de interés (0%-2%), determinar si esta inclusión permite ahorrar en la reducción del contenido de asfalto necesario además de establecer una relación entre el porcentaje de cal hidratada presente y determinar el módulo de Marshall para encontrar patrones de rigidización o plastificación de la mezcla.

D. Diseño de mezcla asfáltica en caliente sin adición de cal hidratada por el método Marshall

Con el objetivo de tener información de referencia, se diseñó una mezcla patrón con la granulometría (0) que cumpliera con los requisitos del Cuadro 21. Tanto para este diseño como para los diseños con contenido de 2% y 3% de cal hidratada una vez realizados los juegos de probetas se determinaron los contenidos óptimos de asfalto y se fabricó una bachada de verificación que también consistía de tres probetas para verificar que el valor de asfalto seleccionado brindara los resultados esperados. Los parámetros de diseño Marshall obtenidos en laboratorio se presentan a continuación¹¹:

1. Diseño bajo metodología Marshall ASTM D6927

Gráfico 5: Vacíos con aire presentes en la mezcla en función del contenido de asfalto



¹¹ Las hojas de resultados obtenidos para la serie de 15 probetas compactadas en laboratorio se adjuntan en el apéndice E: Libreta de tabulación de resultados para la fase de diseño bajo la metodología Marshall.

Gráfico 6: Vacíos en el agregado mineral en función del contenido de asfalto.

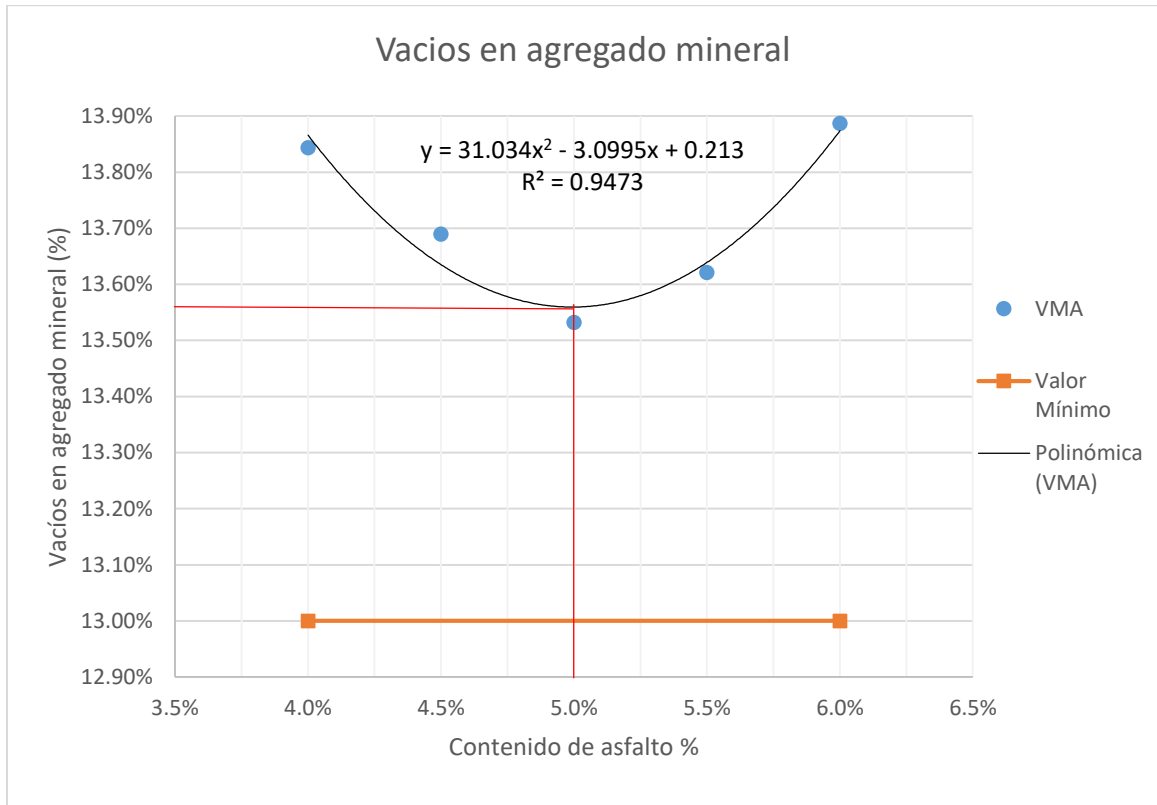


Gráfico 7: Vacíos rellenos con asfalto en función de contenido de asfalto

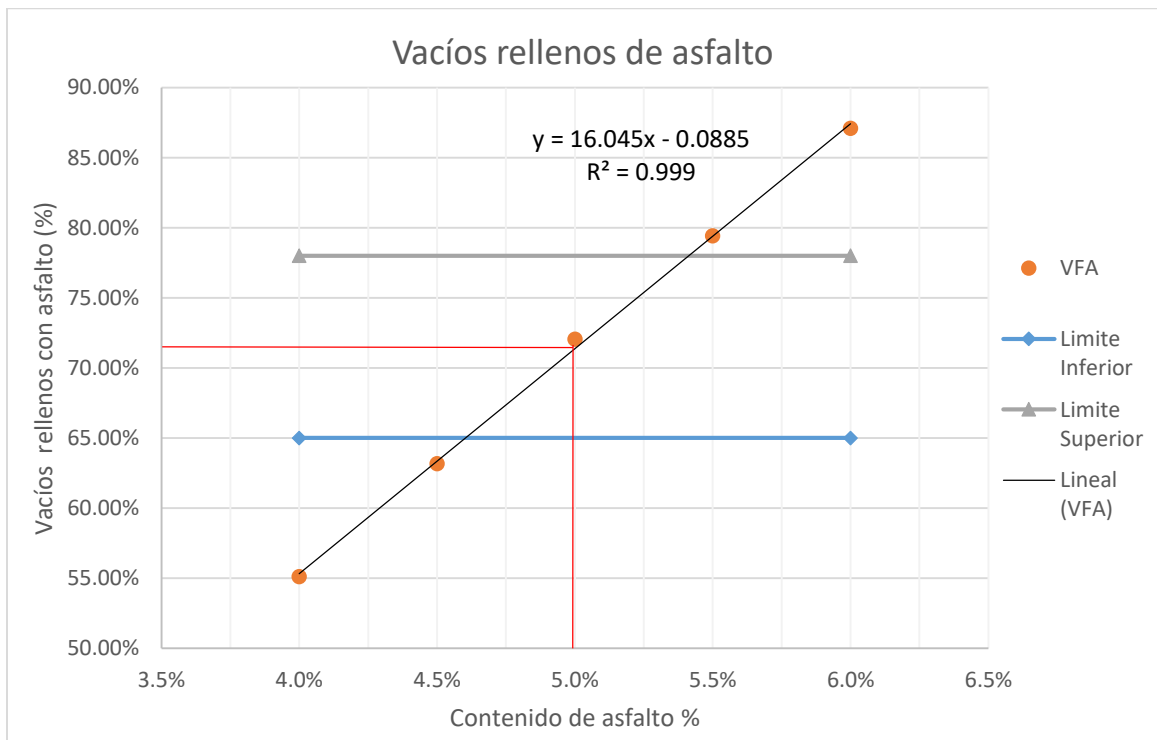


Gráfico 8: Gravedad específica de la mezcla compactada en función del contenido de asfalto.

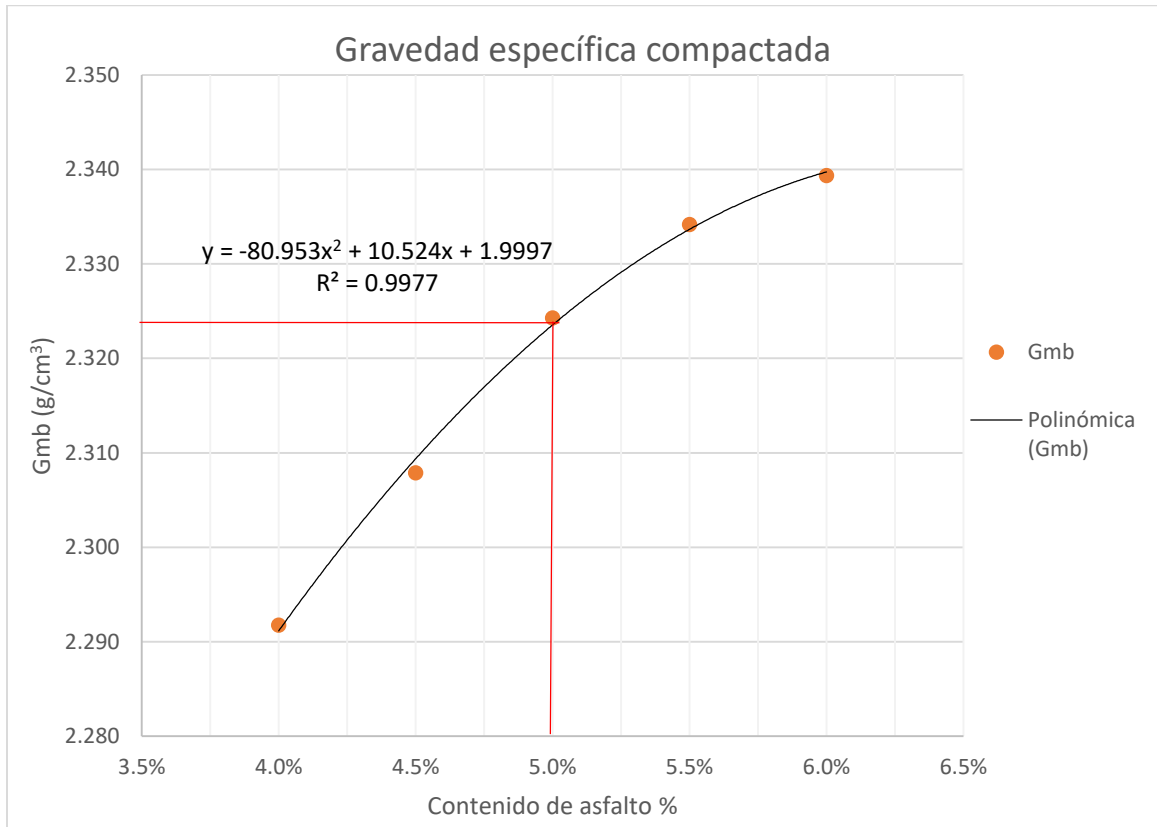


Gráfico 9: Gravedad específica teórica máxima en función del contenido de asfalto.

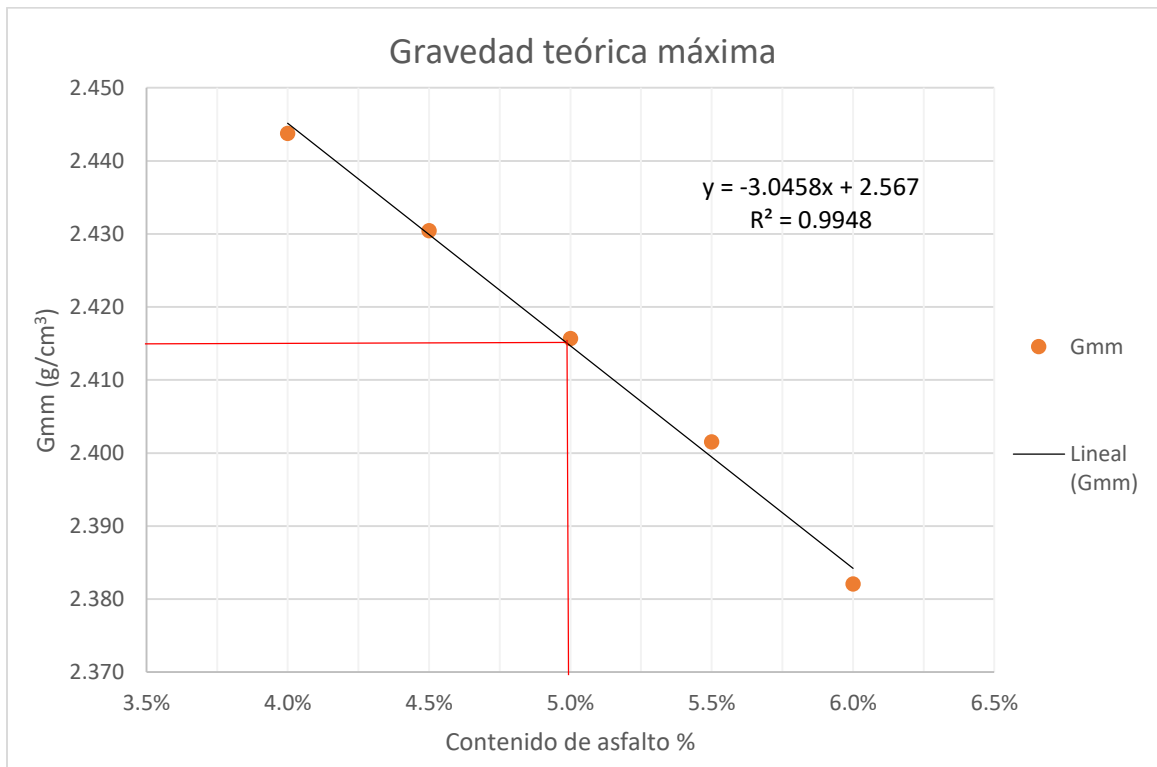


Gráfico 10: Flujo en función del contenido de asfalto

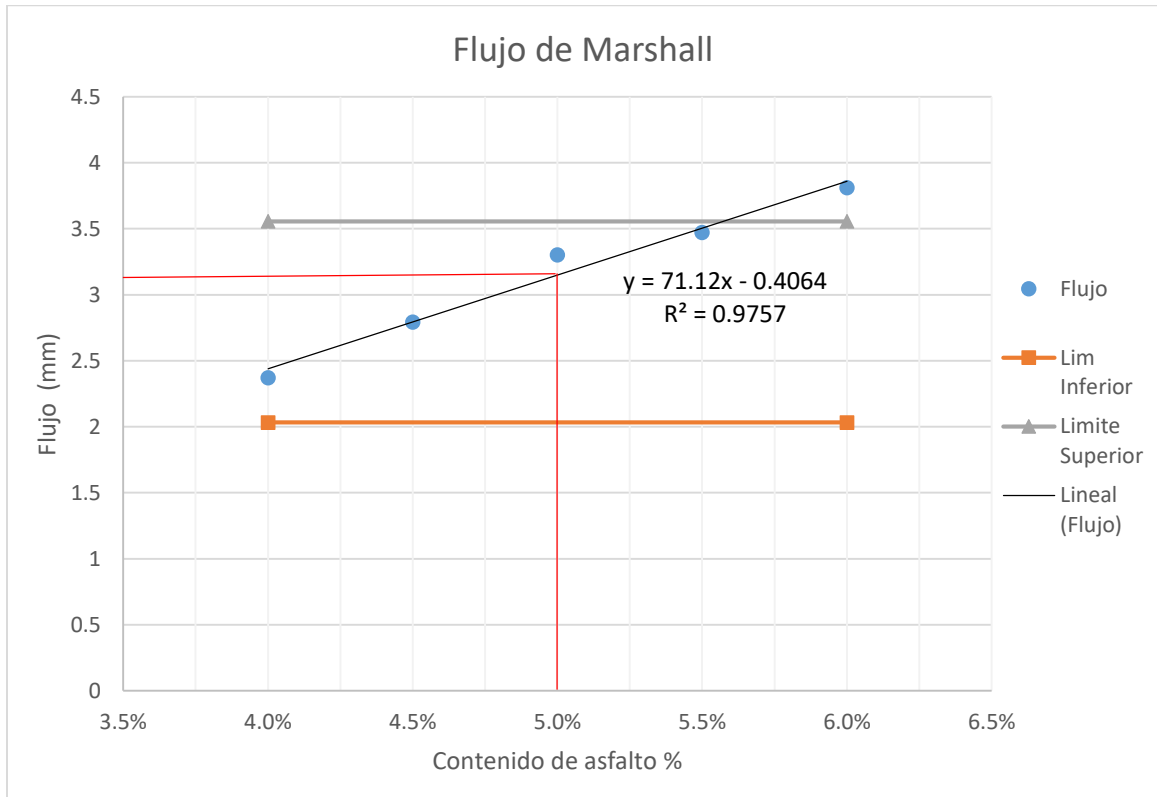


Gráfico 11: Estabilidad en función del contenido de asfalto.

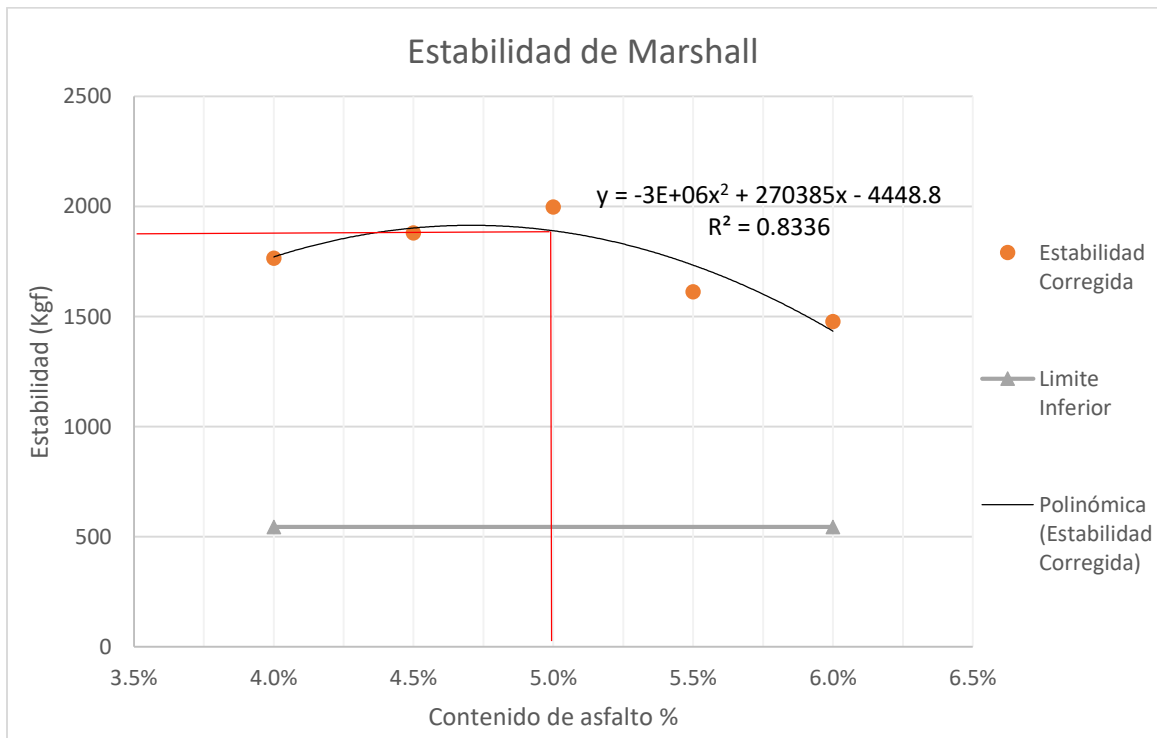


Gráfico 12: Módulo de Marshall en función del contenido de asfalto

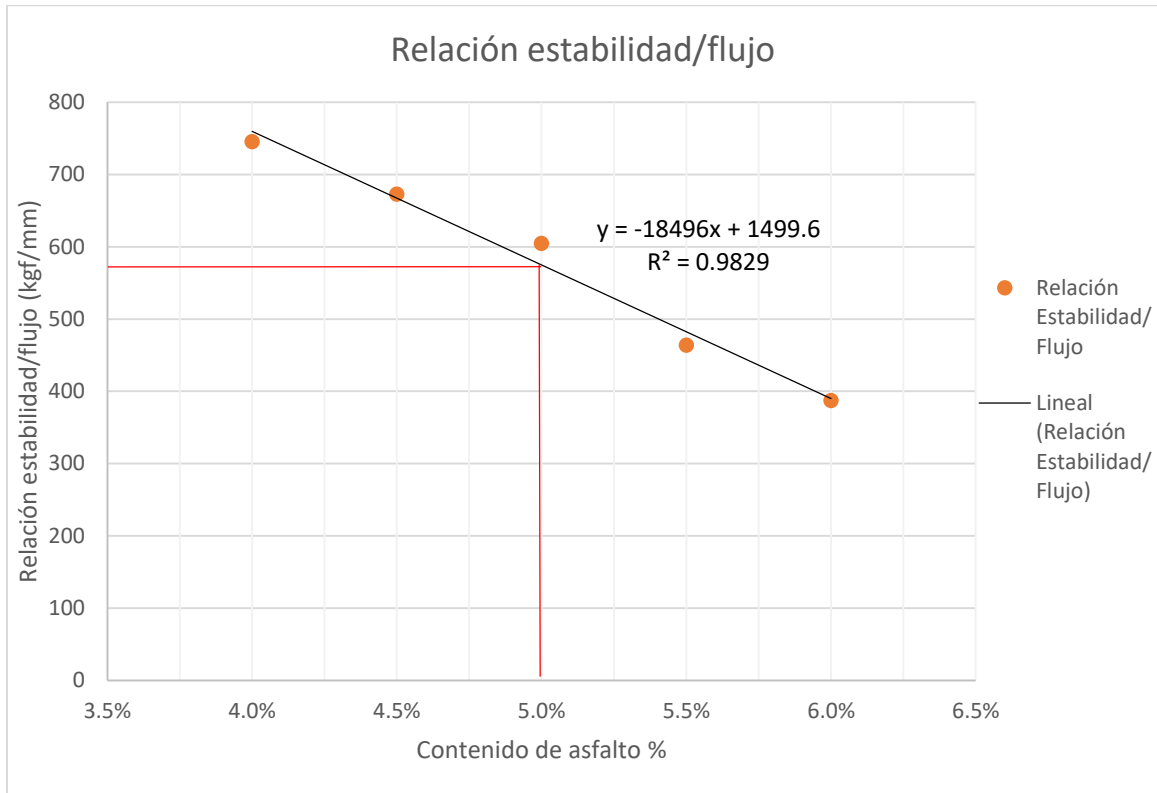


Gráfico 13: Relación filler-asfalto.

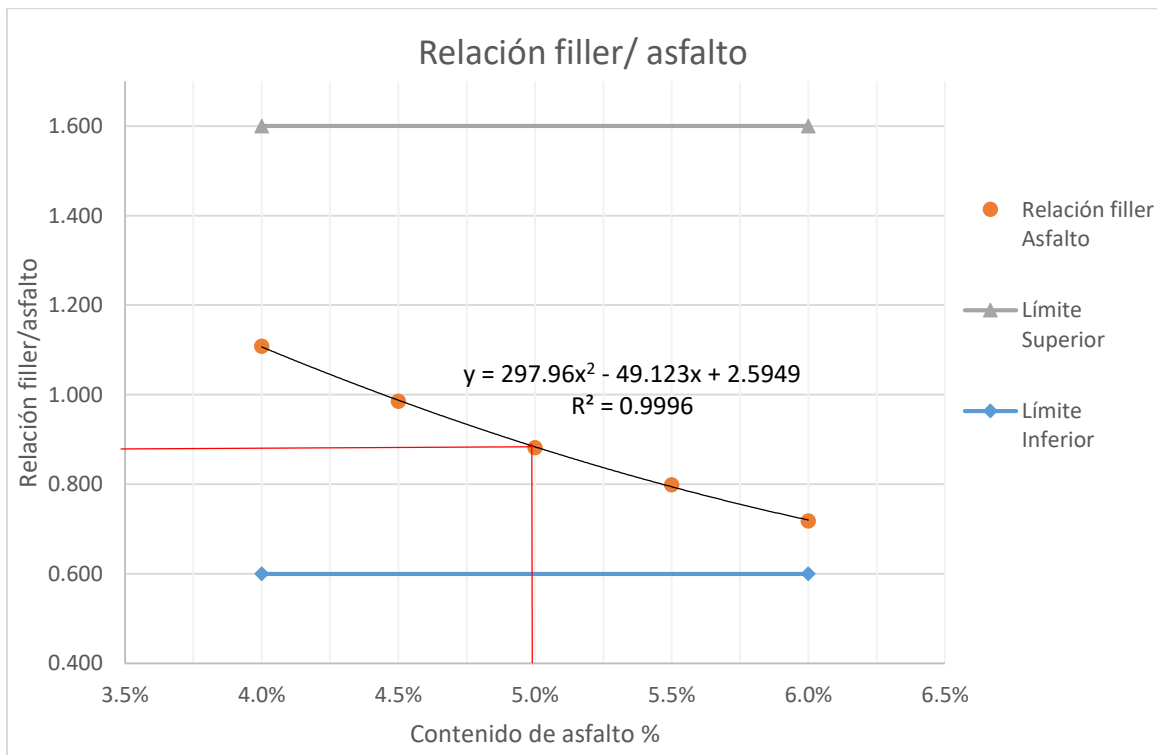
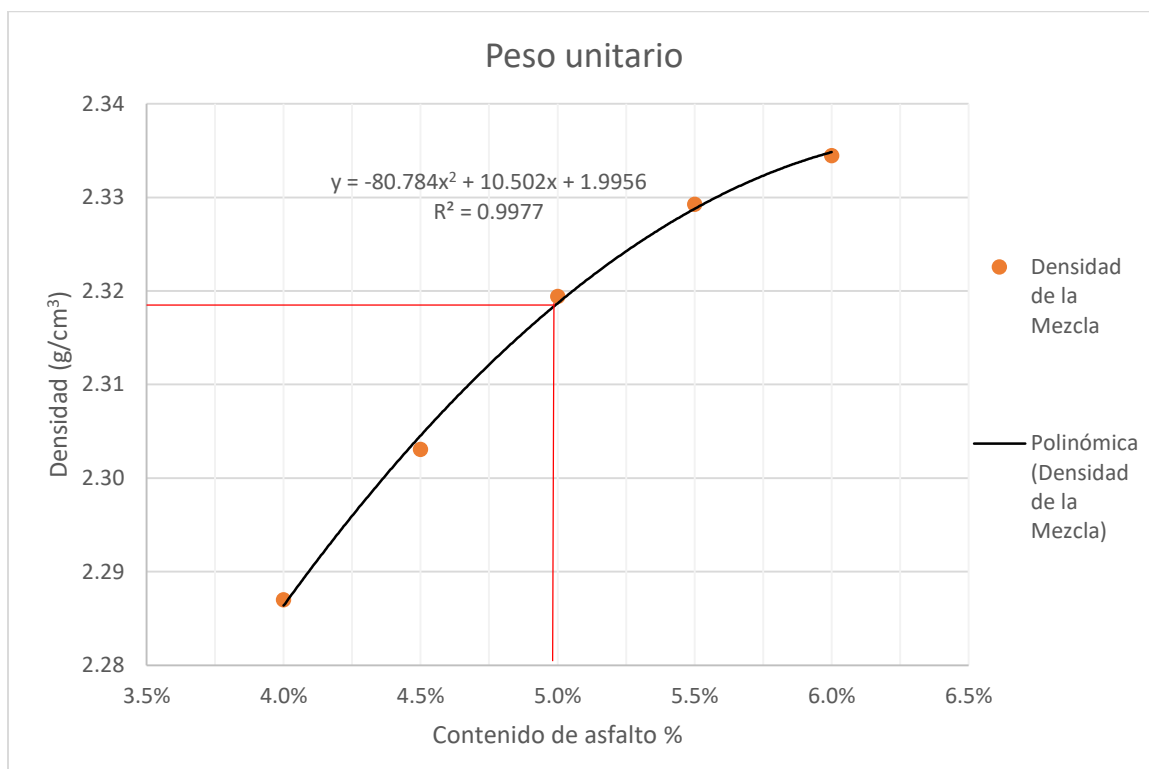


Gráfico 14: Densidad de la mezcla como función del contenido de asfalto.



2. Resumen de resultados y cálculos bajo metodología Marshall. De las quince probetas fabricadas, tres por cada contenido de asfalto, se resumen a continuación los resultados obtenidos para el análisis de resistencia y volumétrico de la mezcla:

Cuadro 23: Resultados promedio de diseño Marshall de muestra patrón.

Código de probetas	Asfalto % (Pb)	Agua absorbida %	Gravedad específica compactada (Gmb) ASTM D 2726	Gravedad específica máxima teórica RICE (Gmm) ASTM D 2041	Vacíos totales mezcla % (Va)	Vacíos agregado mineral % (VMA)	Vacíos llenos de asfalto % (VFA)	Densidad de la mezcla (g/cm ³)	Relación Filler/Asfalto	Estabilidad Medida	Ajustada (Kgf)	Flujo
OA	4.0%	1.37%	2.292	2.444	6.22%	13.86%	55.13%	2.287	1.154	406.33	1764	9.3
OB	4.5%	0.91%	2.308	2.430	5.04%	13.70%	63.20%	2.303	1.021	432.67	1880	11.0
OC	5.0%	0.50%	2.324	2.416	3.78%	13.55%	72.07%	2.319	0.911	459.33	1997	13.0
OD	5.5%	0.29%	2.334	2.401	2.80%	13.63%	79.46%	2.329	0.823	371.67	1612	13.7
OE	6.0%	0.29%	2.339	2.382	1.79%	13.90%	87.70%	2.334	0.737	340.67	1476	15.0

3. Diseño final

Cuadro 24: Resumen final para control de diseño de mezcla

Diseño de mezcla patrón ¾" sin cal hidratada				
Tamaño máximo del agregado, mm		25.4		
Tamaño máximo nominal del agregado, mm		19.0		
Propiedad	Valor teórico	Valor de laboratorio	Requisito Mín.	Requisito Máx.
Contenido óptimo de asfalto, %	5%	5%	N/A	N/A
Contenido de cal hidratada	0%	0%	N/A	N/A
Densidad específica compactada, Gmb	2.324	2.322	N/A	N/A
Densidad específica máx. teórica, Gmm	2.415	2.419	N/A	N/A
Vacíos mezcla compactada Va, %	3.93%	4.0%	3%	5%
Vacíos agregado mineral, VMA, %	13.56%	14.3%	13%	15%
Vacíos llenos de asfalto VFA, %	71.4%	72.0%	65%	78%
Proporción polvo/asfalto	0.884	1.1	0.6	1.6
Estabilidad, Kgf	1570.45	1677.22	544.3	N/A
Flujo	12.4	11	8	14
Flujo, mm	3.150	2.794	2.032	3.556

Finalmente, al haber realizado el diseño de mezcla con las mismas proporciones de granulometría para los agregados (0), se determinó bajo los requisitos de diseño de mezclas asfálticas densas de (Camino, 2001), los cuales se muestran con sus respectivos límites superiores e inferiores en los gráficos obtenidos, que el contenido óptimo de asfalto AC-30 es del 5%. Con estos valores de diseño se fabricaron las probetas que servirían para realizar ensayos de resistencia en condiciones de humedad a la mezcla asfáltica los cuales se desarrollan a partir de la sección I del presente informe.

E. Diseño mezcla asfáltica en caliente con adición de 1% cal hidratada por el método Marshall

1. Diseño bajo metodología Marshall ASTM D6927

Gráfico 15: Vacíos con aire presentes en la mezcla en función del contenido de asfalto

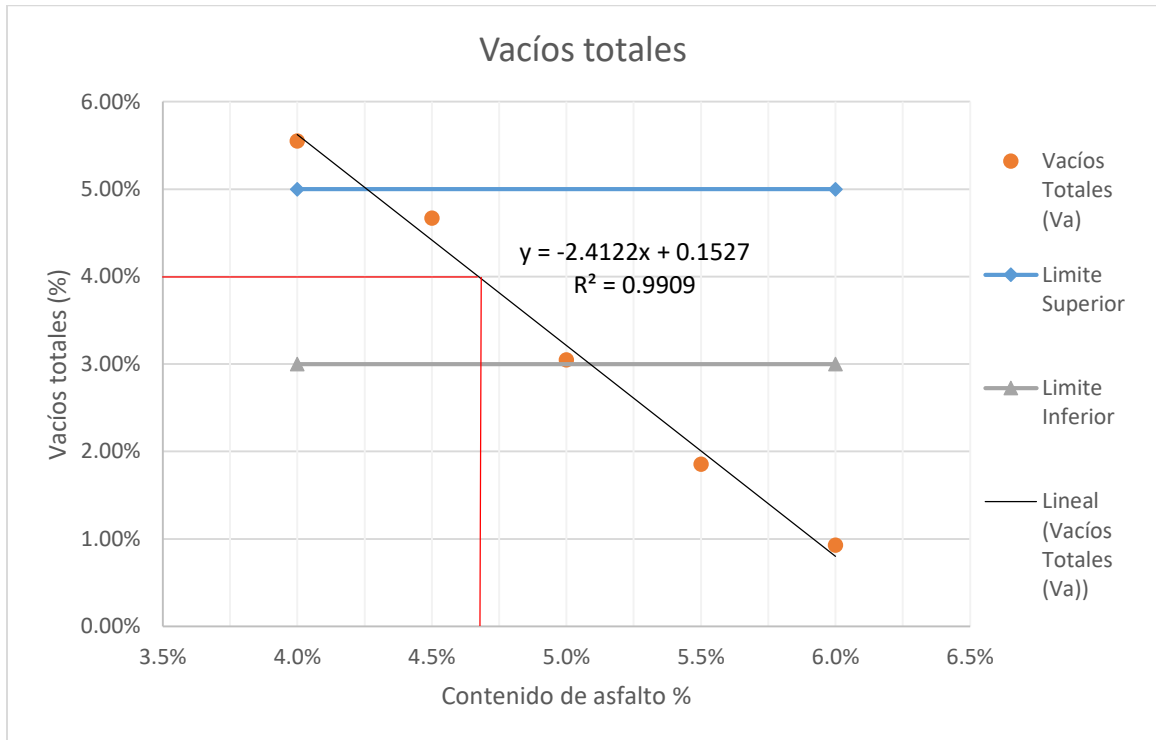


Gráfico 16: Vacíos en el agregado mineral en función del contenido de asfalto

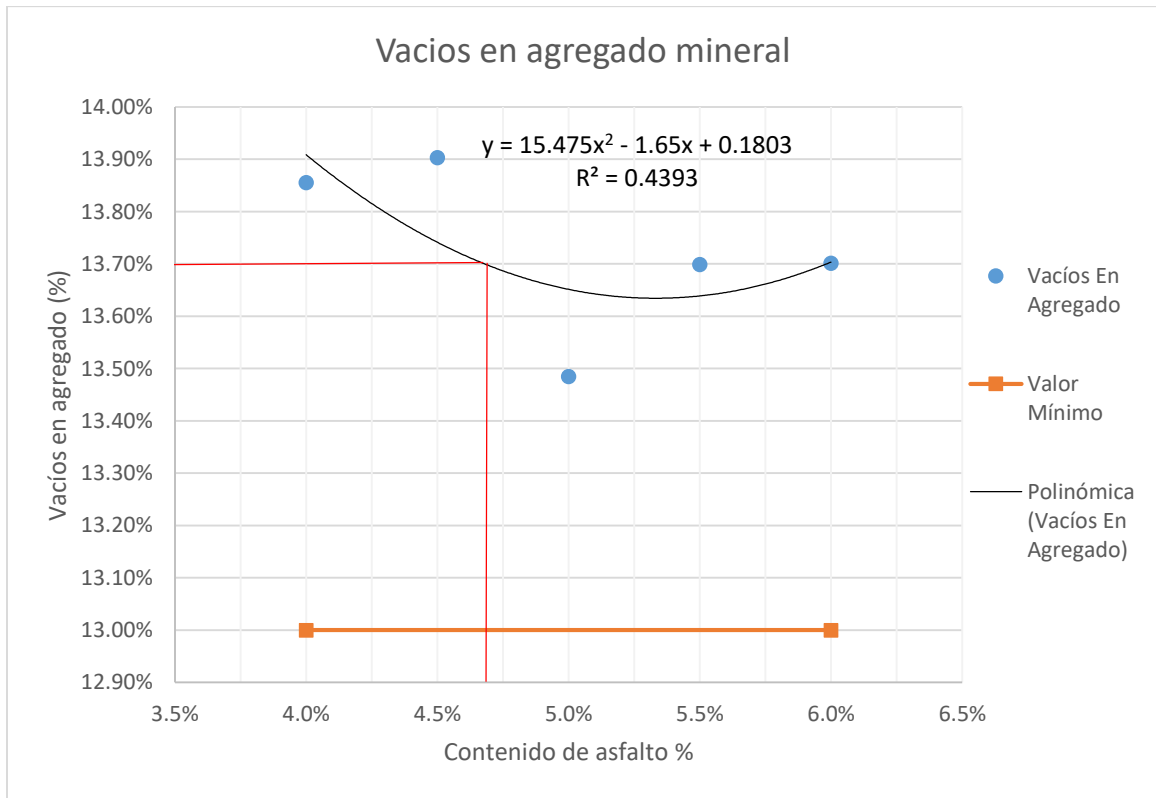


Gráfico 17: Vacíos rellenos con asfalto en función de contenido de asfalto

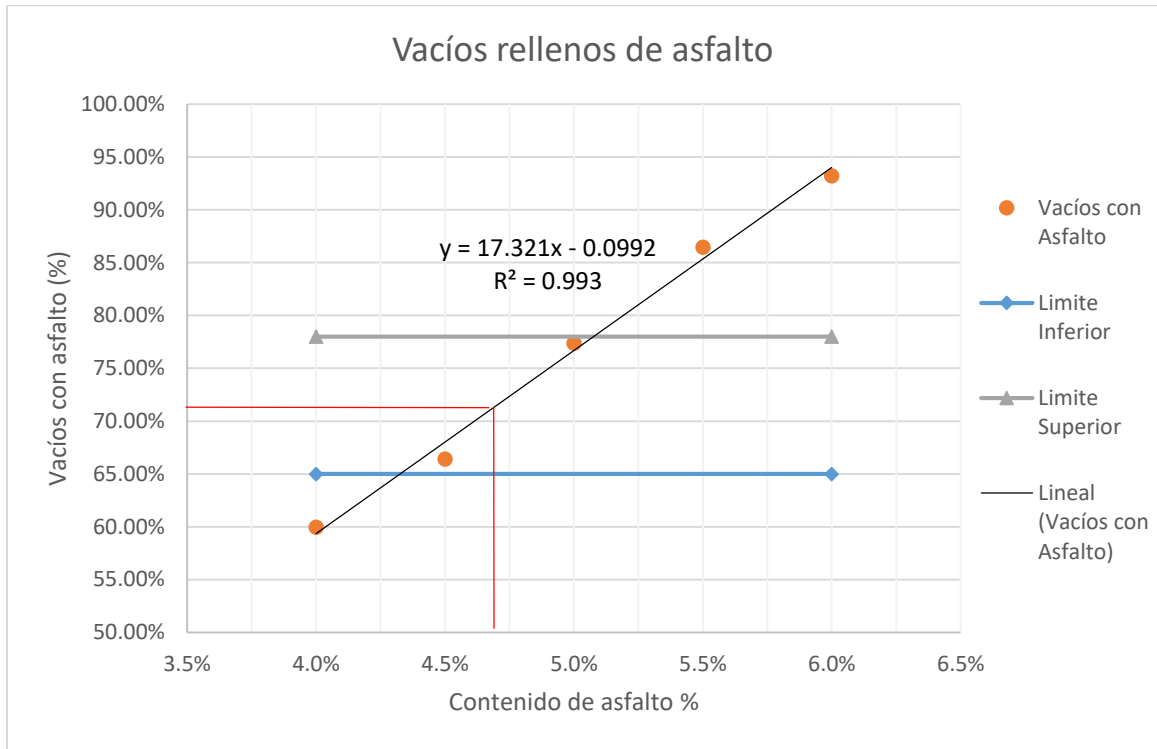


Gráfico 18: Gravedad Bulk de la mezcla compactada en función del contenido de asfalto.

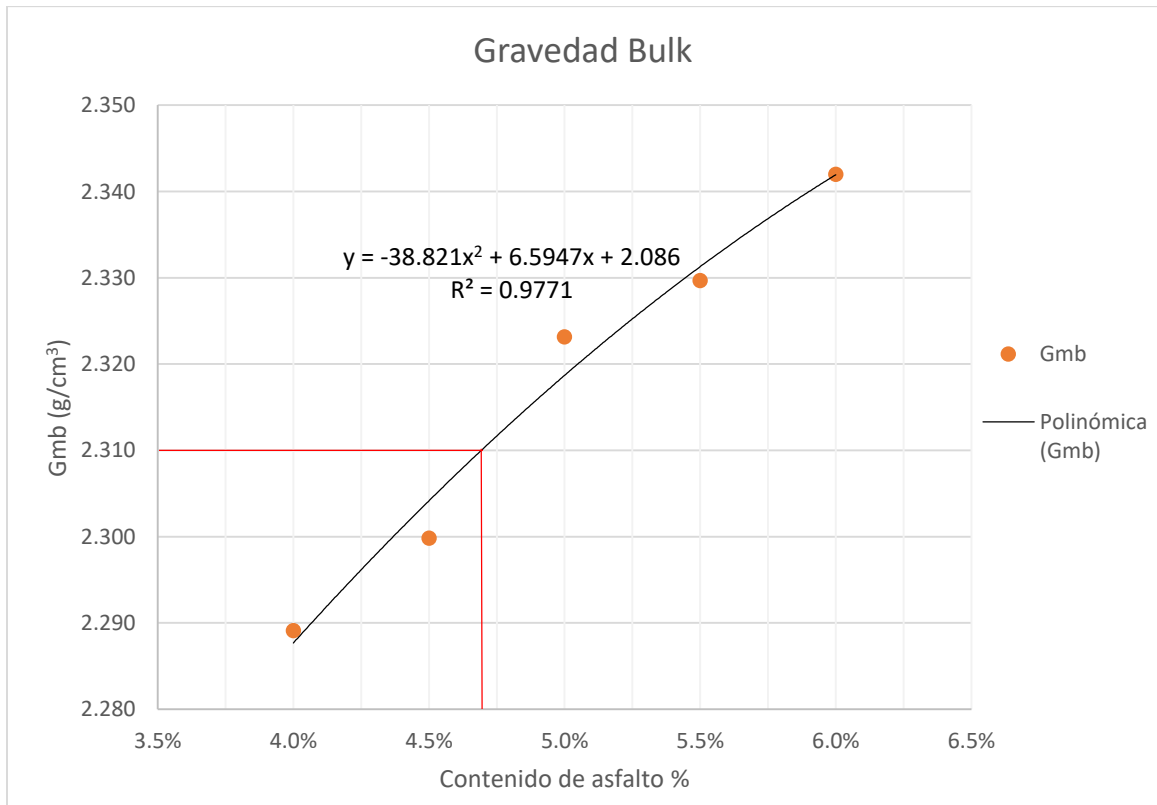


Gráfico 19: Gravedad específica teórica máxima en función del contenido de asfalto.

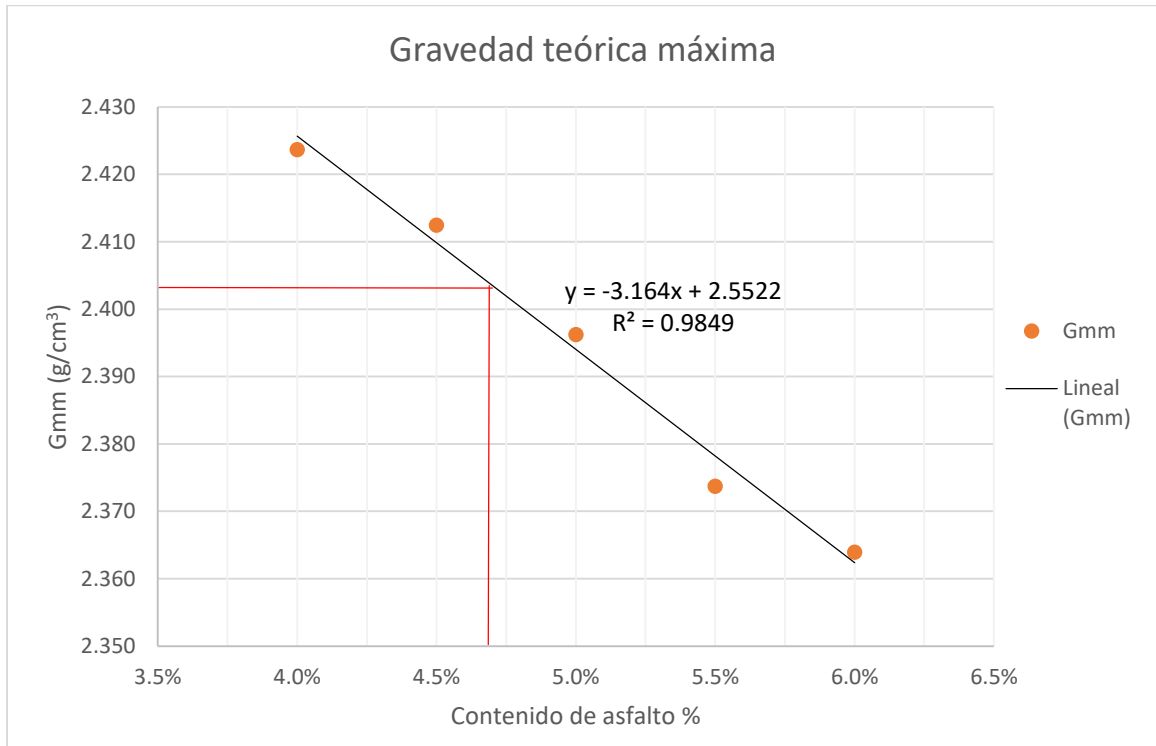


Gráfico 20: Flujo en función del contenido de asfalto

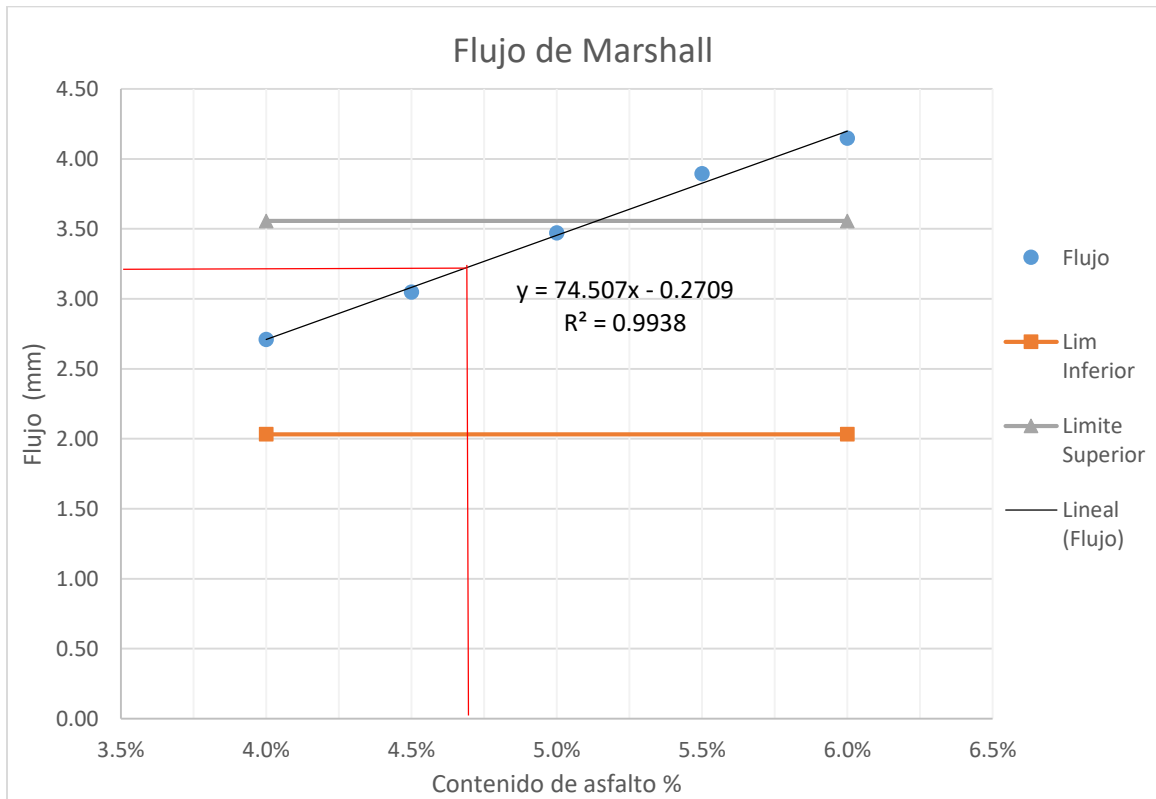


Gráfico 21: Estabilidad en función del contenido de asfalto.

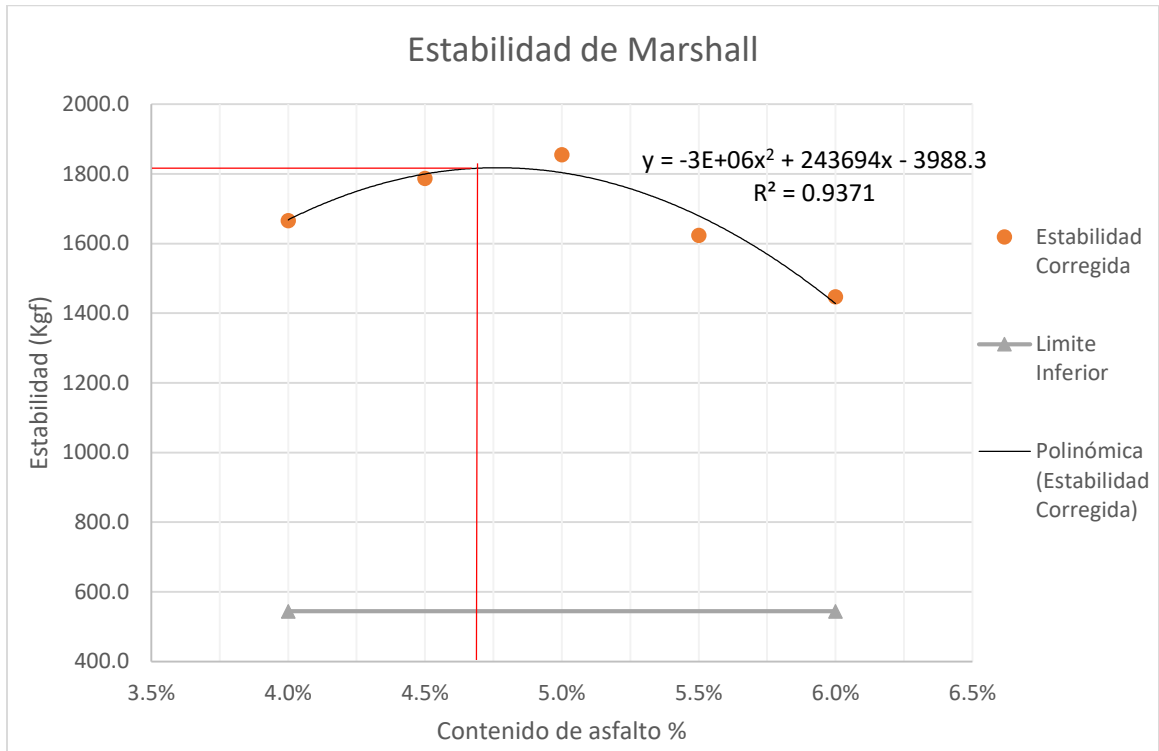


Gráfico 22: Módulo de Marshall en función del contenido de asfalto

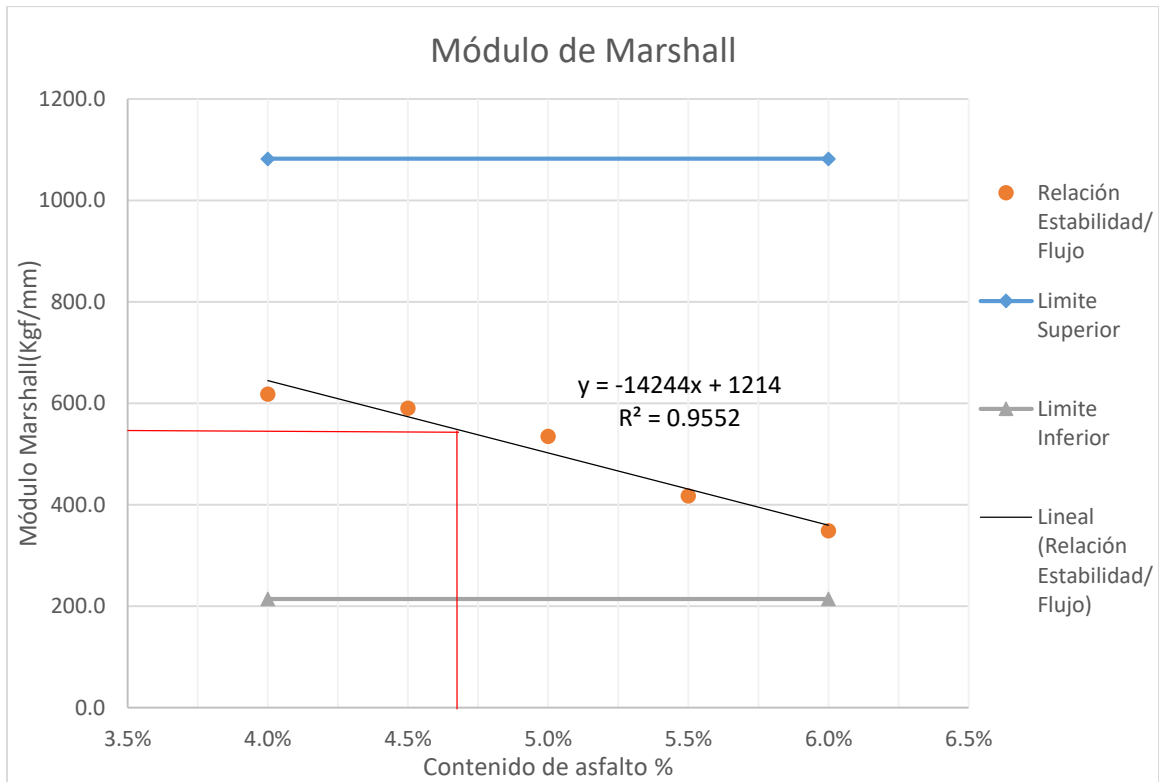


Gráfico 23: Relación filler-asfalto.

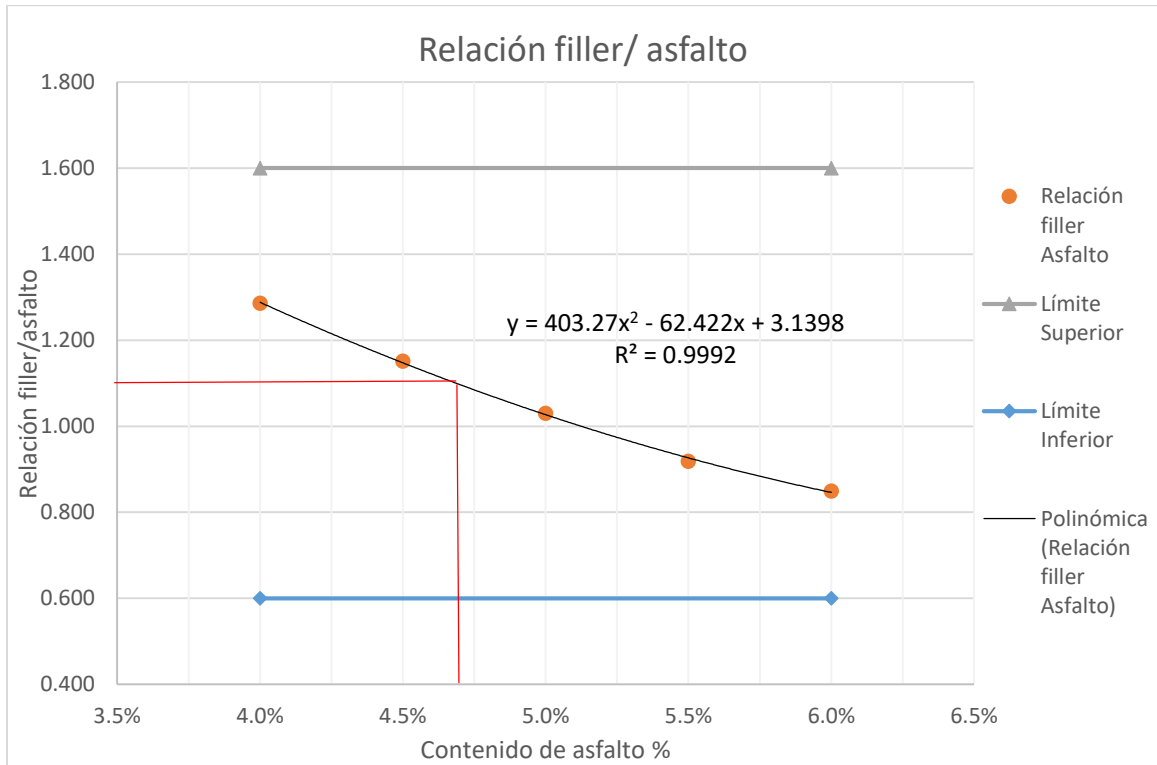
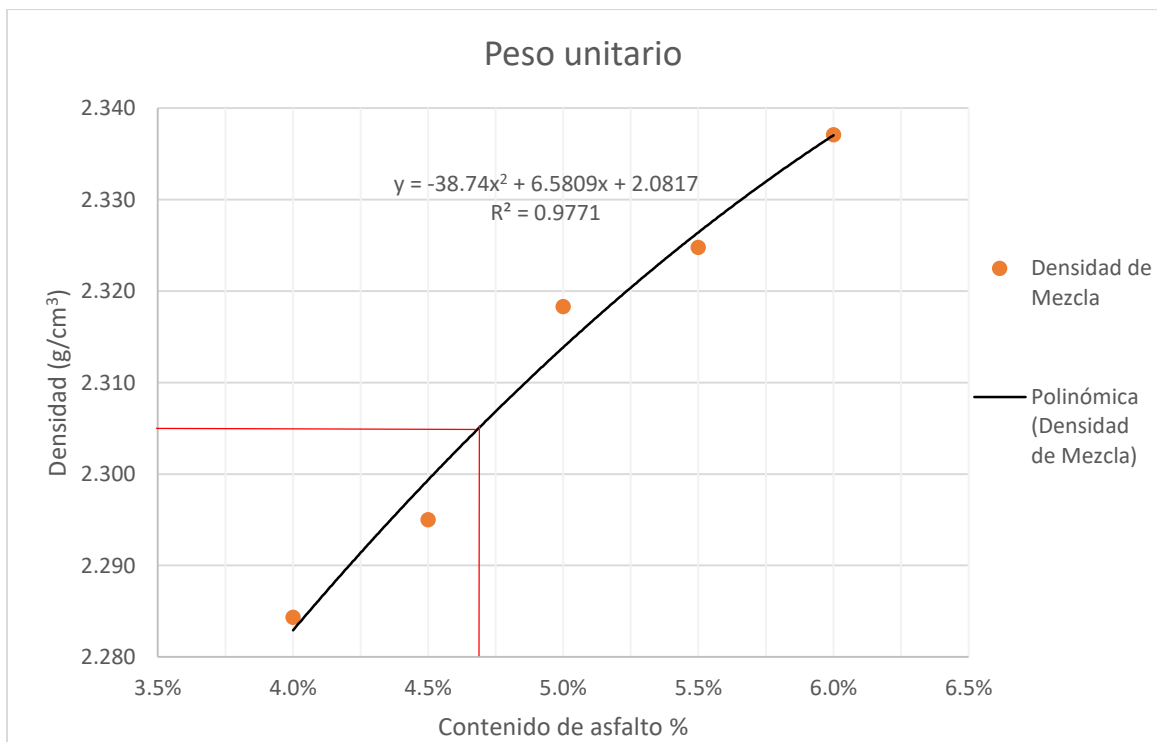


Gráfico 24: Densidad de la mezcla como función del contenido de asfalto.



2. Resumen de resultados y cálculos bajo metodología Marshall. De las quince probetas fabricadas, tres por cada contenido de asfalto, se resumen a continuación los resultados obtenidos para el análisis de resistencia y volumétrico de la mezcla:

Cuadro 25: Resultados promedio de diseño Marshall de muestra con 1% de cal hidratada.

Código de probetas	Asfalto % (Pb)	Agua absorbida %	Gravedad específica bulk (Gmb) ASTM D 2726	Gravedad específica máxima teórica RICE (Gmm) ASTM D 2041	Vacios totales mezcla % (Va)	Vacios agregado mineral % (VMA)	Vacios llenos de asfalto % (VFA)	Densidad de la mezcla (g/cm ³)	Relación filler/asfalto	Estabilidad medida	Ajustada (Kgf)	Flujo
1A	4.0%	1.23%	2.289	2.424	5.55%	13.86%	59.95%	2.284	1.286	384.00	1665.67	10.67
1B	4.5%	0.67%	2.300	2.412	4.67%	13.90%	66.42%	2.295	1.151	411.67	1787.33	12.00
1C	5.0%	0.46%	2.323	2.396	3.05%	13.48%	77.39%	2.318	1.030	427.00	1942.67	13.67
1D	5.5%	0.21%	2.330	2.374	1.86%	13.70%	86.45%	2.325	0.919	374.33	1623.67	15.33
1E	6.0%	0.14%	2.342	2.364	0.93%	13.70%	93.23%	2.337	0.850	300.67	1447.00	16.33

3. Diseño final

Cuadro 26: Resumen final para control de diseño de mezcla con 1% de cal hidratada.

Diseño de mezcla ¾" con adición de 1% de cal hidratada Horcalca®				
Tamaño máximo del agregado, mm		25.4		
Tamaño máximo nominal del agregado, mm		19.0		
Propiedad	Valor teórico	Valor de laboratorio	Requisito Mín.	Requisito Máx.
Contenido óptimo de asfalto, %	4.7%	4.7%	N/A	N/A
Contenido de cal hidratada	1%	1%	0%	0%
Densidad bulk, Gmb	2.310	2.308	N/A	N/A
Densidad específica máx. Teórica, Gmm	2.403	2.394	N/A	N/A
Vacios mezcla compactada Va, %	3.9 %	3.6%	3%	5%
Vacios agregado mineral, VMA, %	13.7 %	13.45%	13%	15%
Vacios llenos de asfalto VFA, %	71.6 %	73.1%	65%	78%
Proporción polvo/asfalto	1.09	0.90	0.6	1.6
Estabilidad, Kgf	1872.96	1805.08	544.3	N/A
Flujo	12.72	12.67	8	14
Flujo, mm	3.23	3.22	2.032	3.556

Analizando la información del diseño de mezcla, se estableció que con la incorporación de la cal hidratada en 1% sobre el peso de los agregados con una granulometría (1), el contenido óptimo de asfalto AC-30 es del 4.7% para los criterios de diseño establecidos por (Camino, 2001). Los resultados presentados en el Cuadro 26 son muestra de los datos obtenidos para la bachada de validación con el porcentaje de asfalto óptimo seleccionado. Más adelante se comparan los valores del diseño obtenidos con respecto a la muestra patrón y la muestra con 2% de cal hidratada.

F. Diseño de mezcla asfáltica en caliente con adición de 2% cal hidratada por el método Marshall

1. Diseño bajo metodología Marshall ASTM D6927.

Gráfico 25: Vacíos con aire presentes en la mezcla en función del contenido de asfalto.

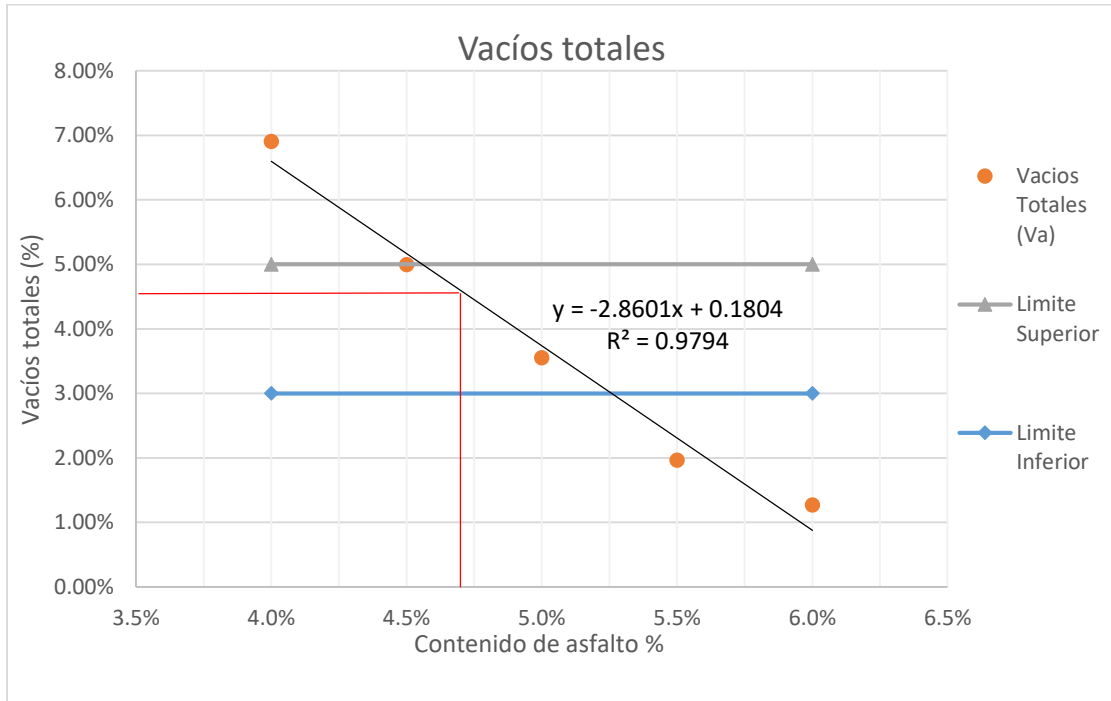


Gráfico 26: Vacíos en el agregado mineral en función del contenido de asfalto.

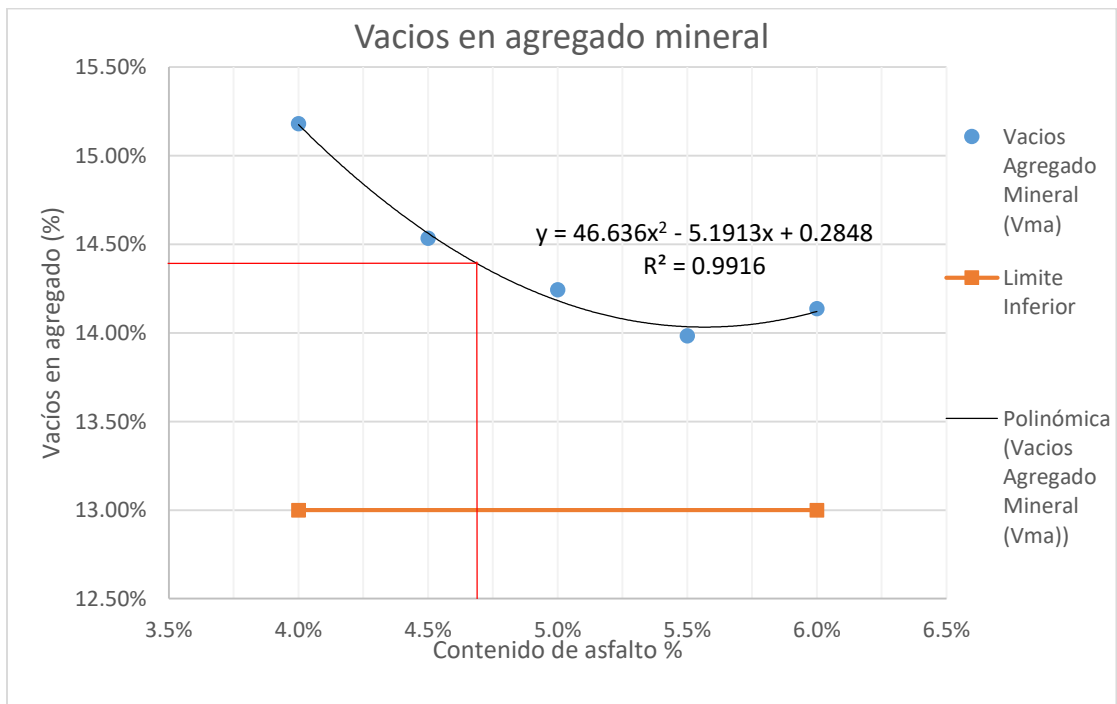


Gráfico 27: Vacíos rellenos con asfalto en función de contenido de asfalto

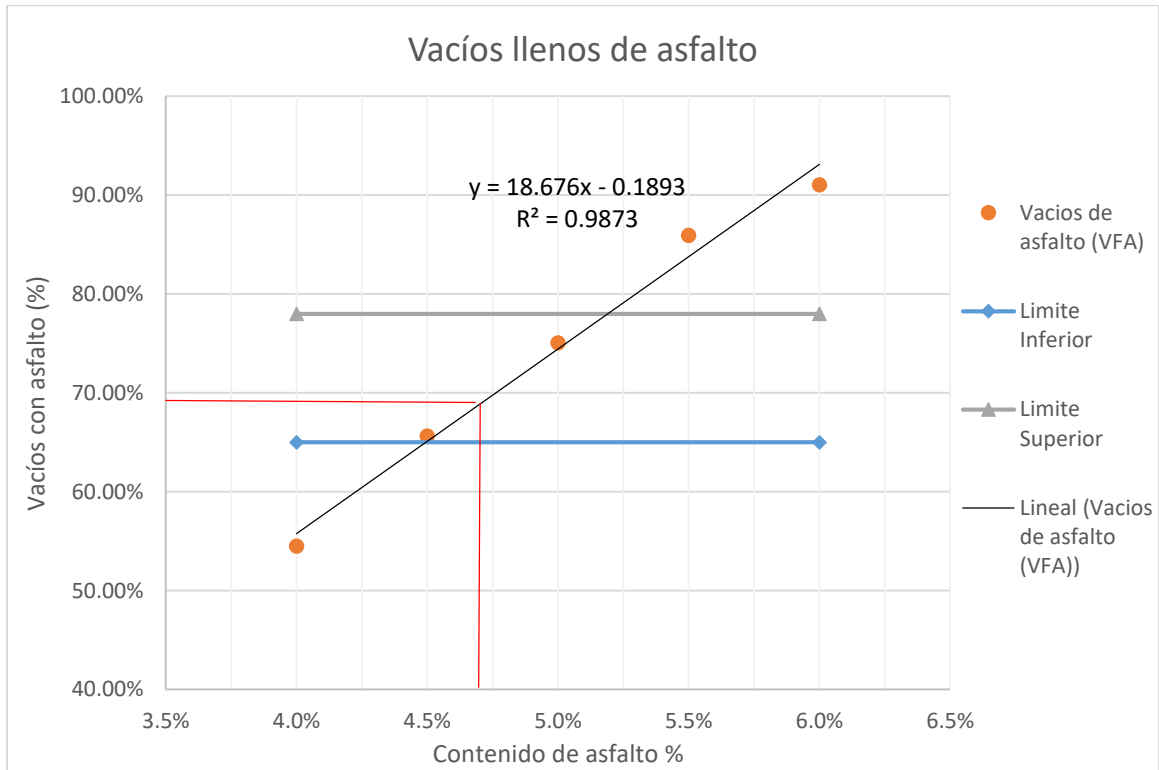


Gráfico 28: Gravedad Bulk de la mezcla compactada en función del contenido de asfalto

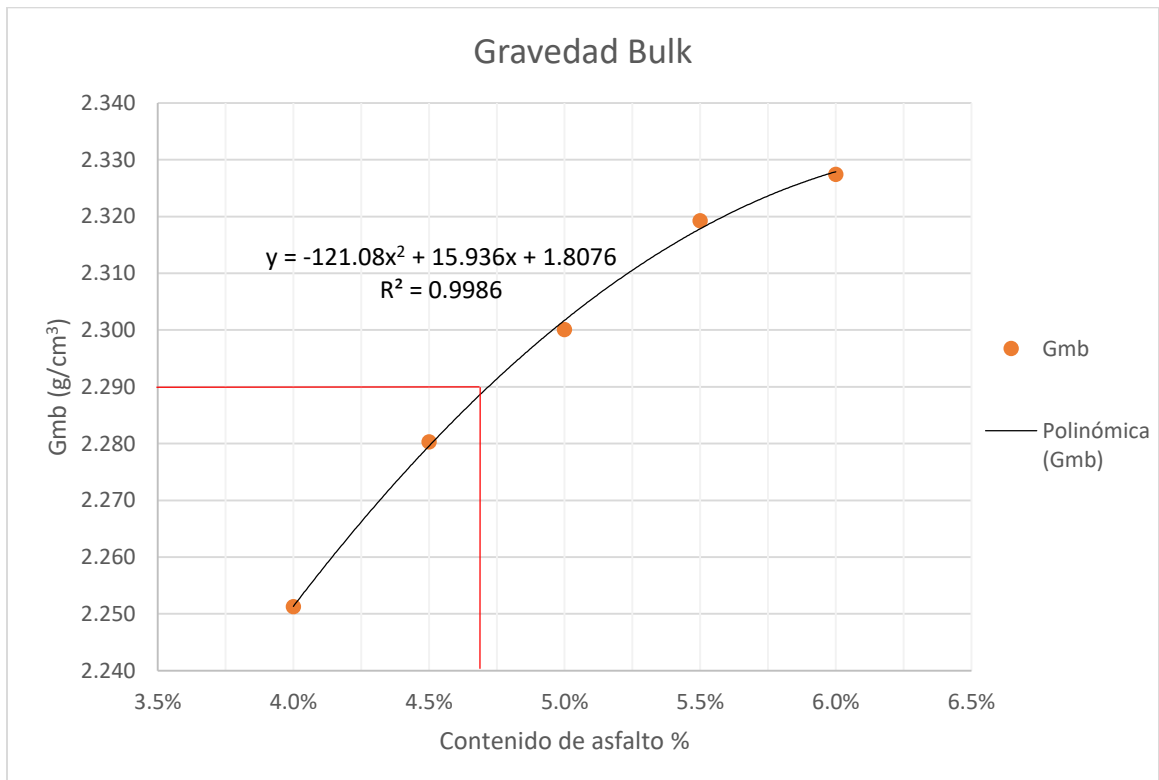


Gráfico 29: Gravedad específica teórica máxima en función del contenido de asfalto

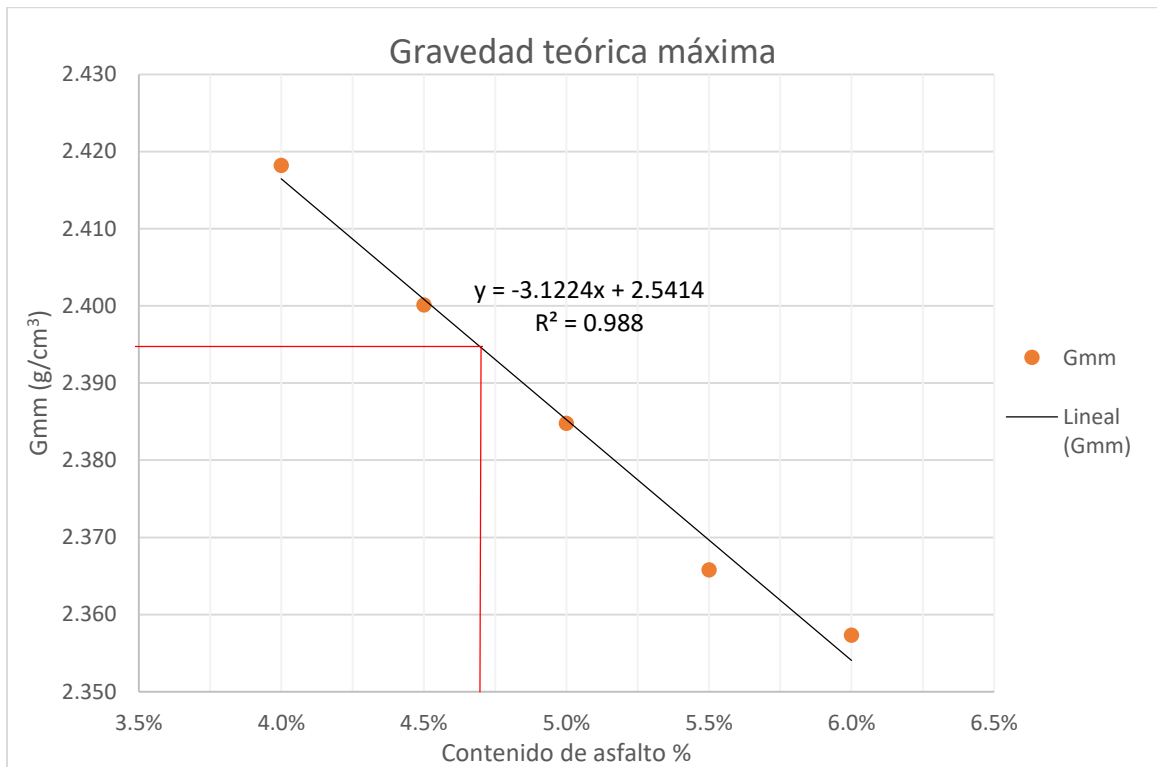


Gráfico 30: Flujo en función del contenido de asfalto

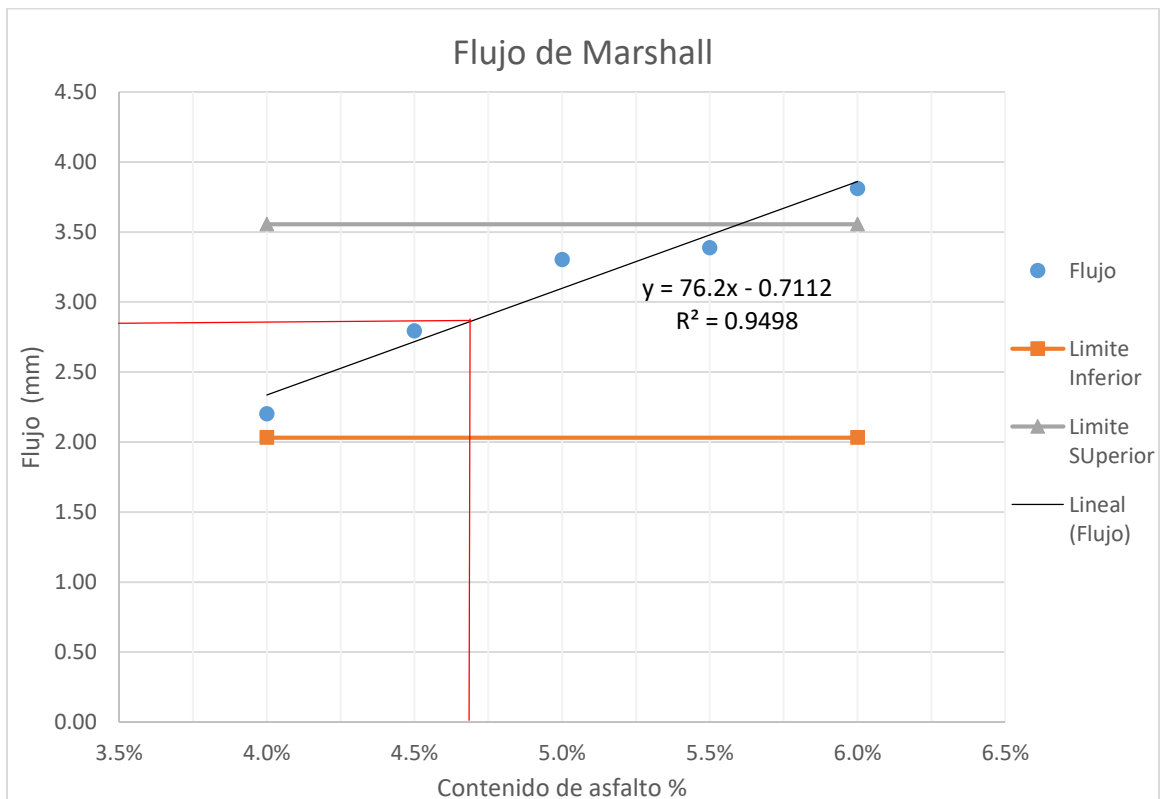


Gráfico 31: Estabilidad en función del contenido de asfalto.

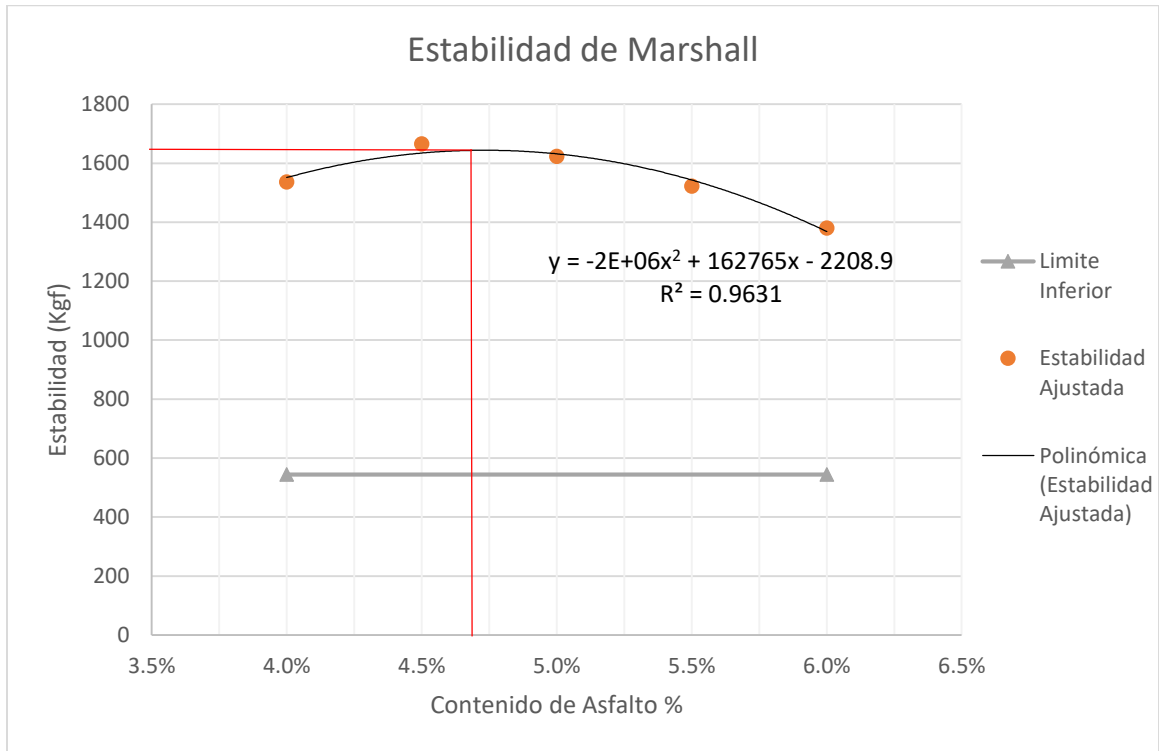


Gráfico 32: Módulo de Marshall en función del contenido de asfalto

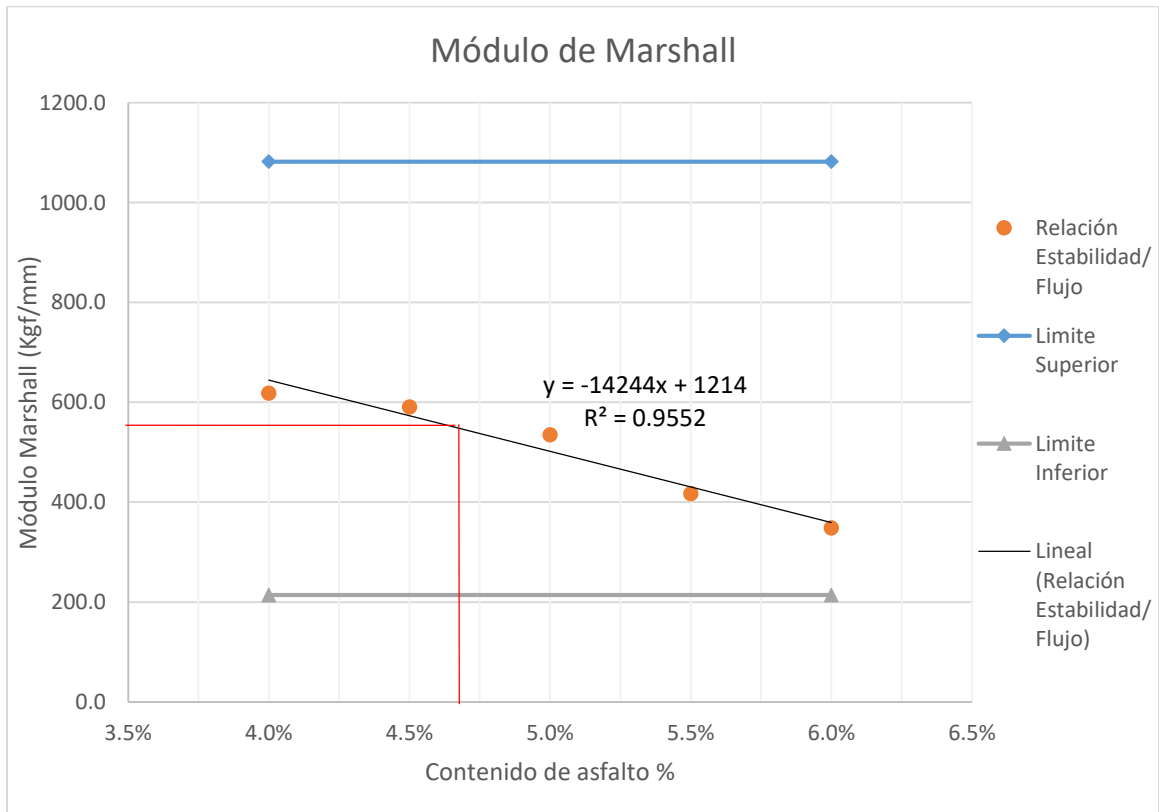


Gráfico 33: Relación filler-asfalto.

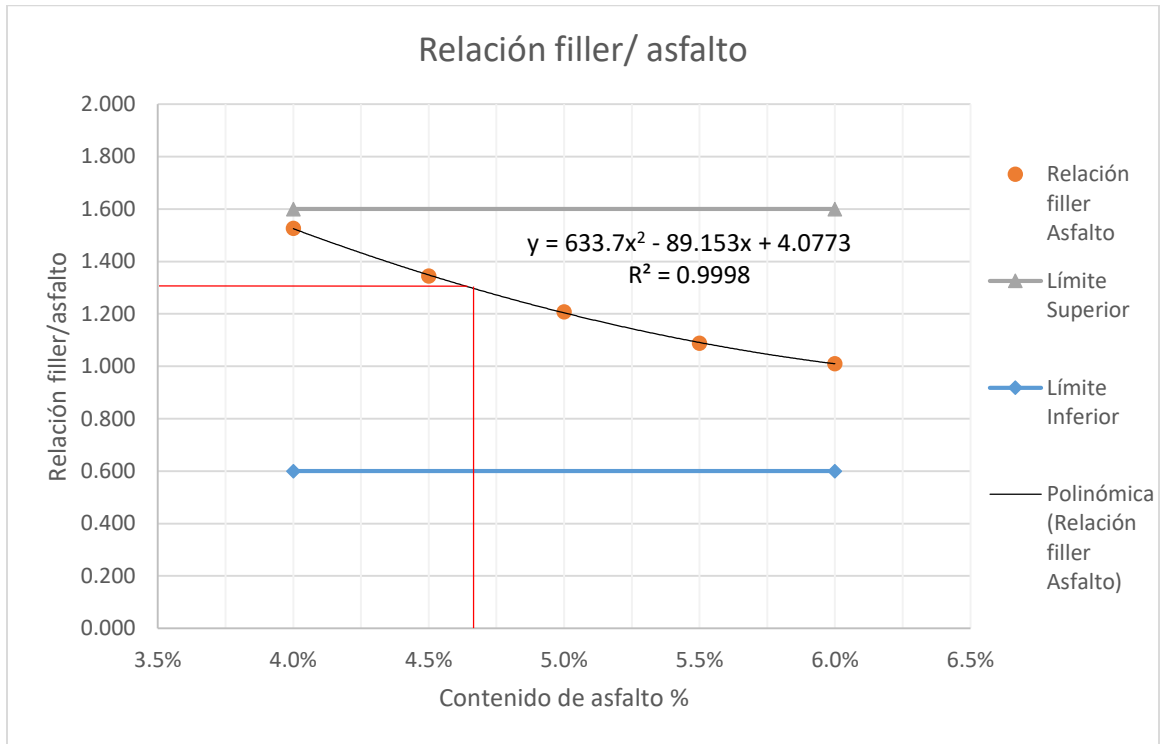
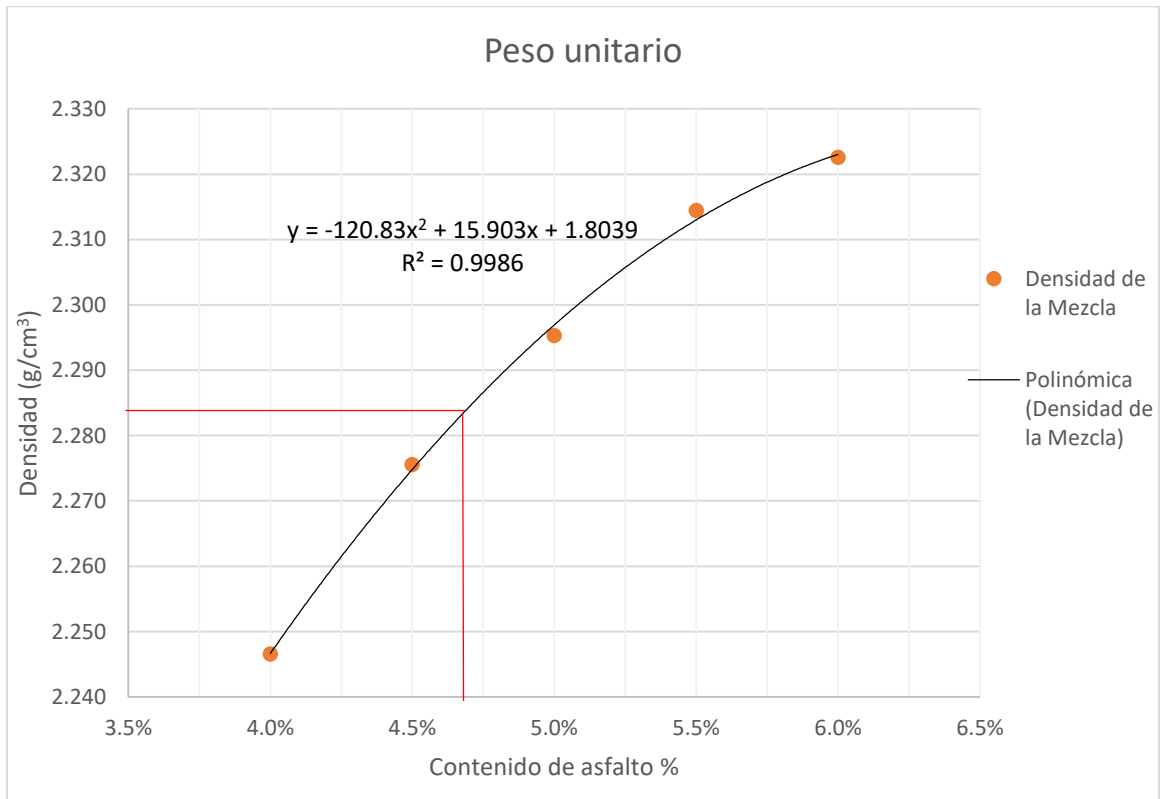


Gráfico 34: Densidad de la mezcla como función del contenido de asfalto.



2. Resumen de resultados y cálculos bajo metodología Marshall.

Cuadro 27: Resultados promedio de diseño Marshall de muestra con 2% de cal hidratada

Código de probetas	Asfalto % (Pb)	Agua absorbida %	Gravedad Específica Bulk (Gmb) ASTM D 2726	Gravedad específica máxima teórica RICE (Gmm) ASTM D 2041	Vacios totales mezcla % (Va)	Vacios agregado mineral % (VMA)	Vacios llenos de asfalto % (VFA)	Densidad de la mezcla (g/cm ³)	Relación filler/ asfalto	Estabilidad Medida	Ajustada (Kgf)	Flujo
2A	4.0%	1.72%	2.251	2.418	6.91%	15.18%	54.51%	2.247	1.526	353.0	1537.0	8.7
3B	4.5%	0.81%	2.280	2.400	4.99%	14.53%	65.65%	2.276	1.345	384.0	1665.7	11.0
3C	5.0%	0.52%	2.300	2.385	3.55%	14.24%	75.07%	2.295	1.208	374.3	1623.7	13.0
3D	5.5%	0.25%	2.319	2.366	1.97%	13.98%	85.94%	2.314	1.088	251.3	1522.7	13.3
3E	6.0%	0.14%	2.327	2.357	1.27%	14.14%	91.06%	2.323	1.010	334.0	1447.0	15.0

3. Diseño final.

Cuadro 28: Resumen final para control de diseño de mezcla con 2% de cal hidratada

Diseño de mezcla ¾" con adición de 2% de cal hidratada Horcalca®				
Tamaño máximo del agregado, mm		19.0		
Tamaño máximo nominal del agregado, mm		12.5		
Propiedad	Valor teórico	Valor de laboratorio	Requisito Mín.	Requisito Máx.
Contenido óptimo de asfalto, %	4.7%	4.7%	N/A	N/A
Contenido de cal hidratada	2%	2%	N/A	N/A
Densidad bulk, Gmb	2.289	2.303	N/A	N/A
Densidad específica máx Teórica, Gmm	2.395	2.394	N/A	N/A
Vacios mezcla compactada Va, %	4.6 %	3.8	3%	5%
Vacios agregado mineral, VMA, %	14.4 %	13.6%	13%	15%
Vacios llenos de asfalto VFA, %	68.8 %	72.2%	65%	78%
Proporción polvo/asfalto	1.287	0.8	0.6	1.6
Estabilidad, Kgf	1023.05	1681.58	544.3	N/A
Flujo	11.3	11	8	14
Flujo, mm	2.87	2.79	2.032	3.556

Cualitativamente, durante cada proceso de mezclado se observó que la mezcla con incorporación de cal hidratada aumenta el brillo de la mezcla asfáltica sin modificar el color café oscuro característico de la misma. Esto se debe al recubrimiento del agregado por partículas de cal hidratada lo cual reduce un poco la capa de recubrimiento de asfalto en el agregado. La trabajabilidad de la mezcla también se vio afectada al incorporar cal hidratada ya que había más polvo presente el cual debía de cubrirse con asfalto.

G. Comparación de los parámetros de diseño Marshall entre mezclas asfálticas con cal incorporada

A continuación, se muestran de manera resumida, los resultados promedio obtenidos para los tres diseños Marshall realizados y la comparación con el cumplimiento de los requisitos de diseño.

Cuadro 29: Resumen de diseño Marshall para mezclas asfálticas y resultados experimentales.

Parámetro	Valores Especificación	
	Mínimo	Máximo
1. Peso Unitario (g/cm ³)	2.10	N/A
2. Estabilidad (Kgf)	544.3	N/A
3. Flujo (mm) para ESAL>10 ⁶	2.032	3.556
4. Relación Estabilidad/Flujo (Kgf/mm)	214	1082
5. Vacíos Totales (Va) %	3%	5%
6. Vacíos en el agregado mineral (VMA) %	13%	N/A
7. Vacíos Llenos de Asfalto (VFA) %	65%	75%
8. Relación Polvo/Asfalto	0.6	1.6

Contenido de Asfalto	Contenido de cal hidratada			Contenido de cal hidratada			Contenido de cal hidratada			Contenido de cal hidratada		
	0%	1.00%	2.00%	0%	1.00%	2.00%	0%	1.00%	2.00%	0%	1.00%	2.00%
4.0%	2.287	2.284	2.247	2.303	2.295	2.276	2.303	2.318	2.295	2.303	2.318	2.295
	1764.0	1665.7	1537.0	1879.7	1787.3	1665.7	1997.0	1854.7	1623.7	1997.0	1854.7	1623.7
	2.371	2.709	2.201	2.794	3.048	2.794	3.302	3.471	3.302	3.302	3.471	3.302
	745	618	711	672.75	590.36	600.90	604.78	534.90	491.81	604.78	534.90	491.81
	6.22%	5.55%	6.91%	5.04%	4.67%	4.99%	3.78%	3.05%	3.55%	3.78%	3.05%	3.55%
	13.84%	13.86%	15.18%	13.69%	13.90%	14.53%	13.53%	13.48%	14.24%	13.53%	13.48%	14.24%
	55.11%	59.95%	54.51%	63.17%	66.41%	65.65%	72.05%	77.39%	75.07%	72.05%	77.39%	75.07%
	1.11	1.29	1.53	0.99	1.15	1.34	0.88	1.03	1.21	0.88	1.03	1.21
No cumple con	5,7	5,7	5,7	5,7	-	-	-	7	7	5,7	5,7	5,7
	4.0%	4.5%	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.0%	6.0%	6.0%	6.0%	6.0%	6.0%
	2.334	2.337	2.314	2.329	2.325	2.314	2.329	2.325	2.314	2.329	2.325	2.314
	1476.3	1447.0	1522.7	1612.3	1623.7	1522.7	1612.3	1623.7	1522.7	1612.3	1623.7	1522.7
	3.810	4.149	3.887	3.471	3.895	3.387	3.471	3.895	3.387	3.471	3.895	3.387
	387.49	348.61	452.51	463.72	417.12	452.51	463.72	417.12	452.51	463.72	417.12	452.51
	1.79%	0.93%	1.97%	2.80%	1.86%	1.97%	2.80%	1.86%	1.97%	2.80%	1.86%	1.97%
	13.89%	13.70%	13.98%	13.62%	13.70%	13.98%	13.62%	13.70%	13.98%	13.62%	13.70%	13.98%
	87.10%	93.23%	85.94%	79.42%	86.45%	85.94%	79.42%	86.45%	85.94%	79.42%	86.45%	85.94%
	0.72	0.85	1.09	0.80	0.92	1.09	0.80	0.92	1.09	0.80	0.92	1.09
	3,5,7	3,5,7	5,7	5,7	3,5,7	5,7	5,7	3,5,7	5,7	5,7	3,5,7	5,7

Tal y como se comentó a final de cada una de las fases de diseño, los valores de un contenido de asfalto de entre el 4.5% al 5% permiten que los diseños de mezcla con distinto contenido de finos cumplan con los requisitos del libro azul. A continuación, se presentan de manera unificada los resultados obtenidos para los distintos parámetros volumétricos y de resistencia, los cuales permiten observar patrones de comportamiento en función de la adición de cal hidratada.

Gráfico 35: Comparativo de densidades.

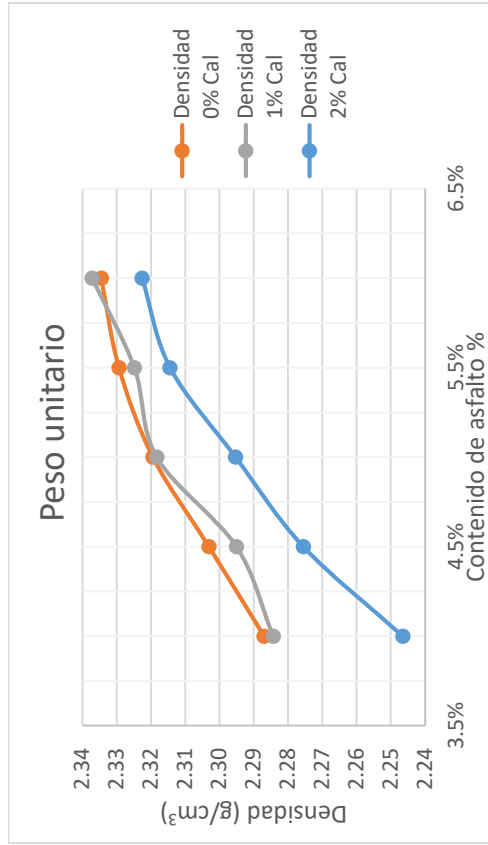


Gráfico 37: Comparativo vacíos en el agregado mineral

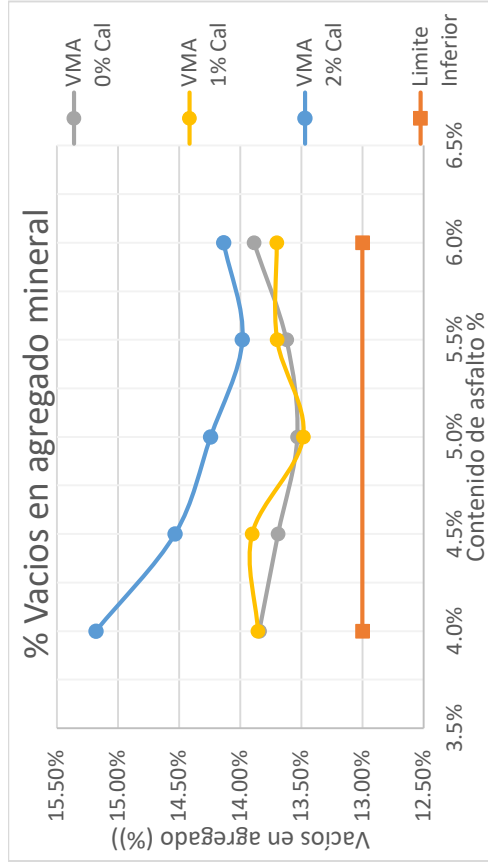


Gráfico 36: Comparativo de vacíos

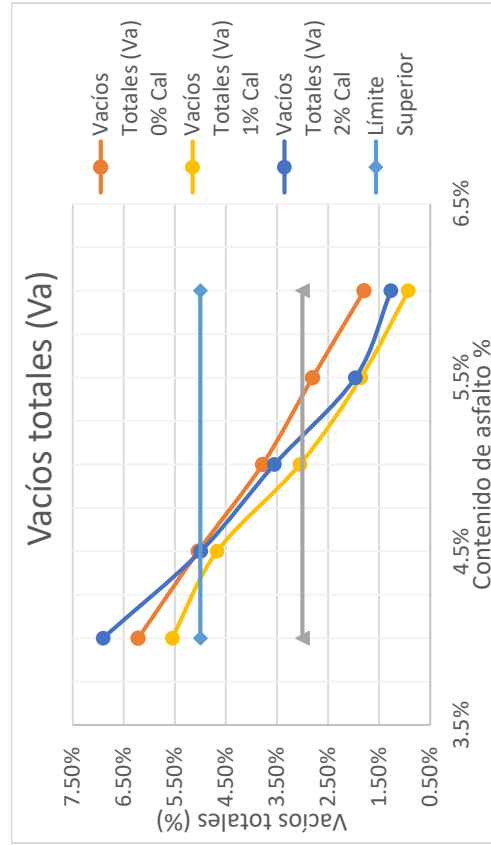


Gráfico 38: Comparativo de vacíos rellenos de asfalto

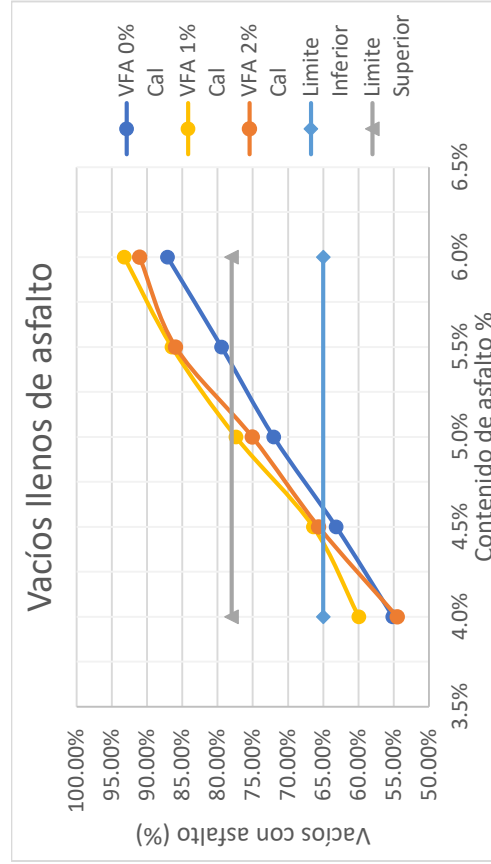


Gráfico 39: Comparativo de gravedad Bulk

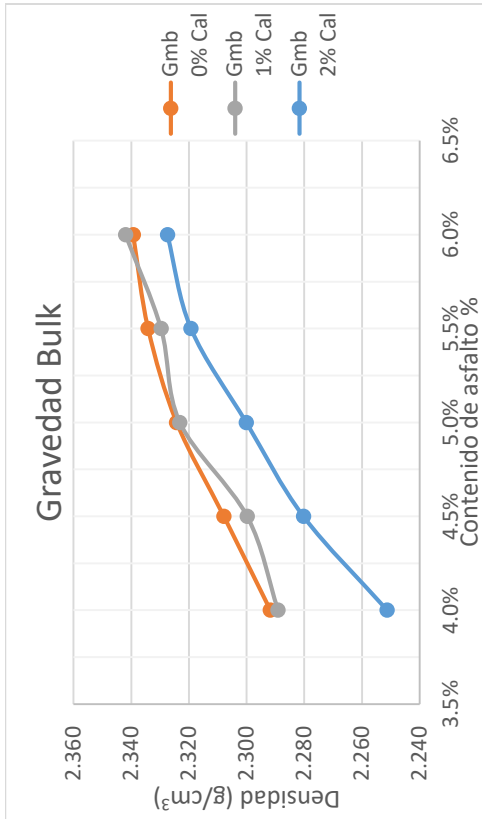


Gráfico 41: Comparativo Flujo

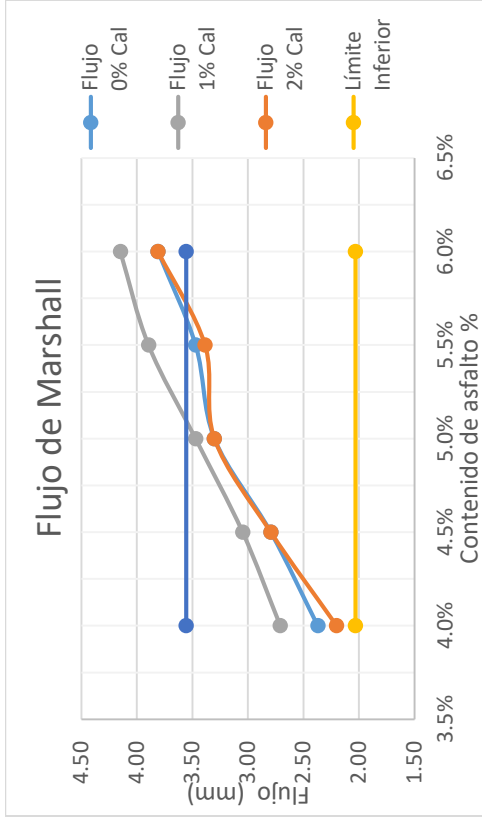


Gráfico 40: Comparativo de gravedad Rice

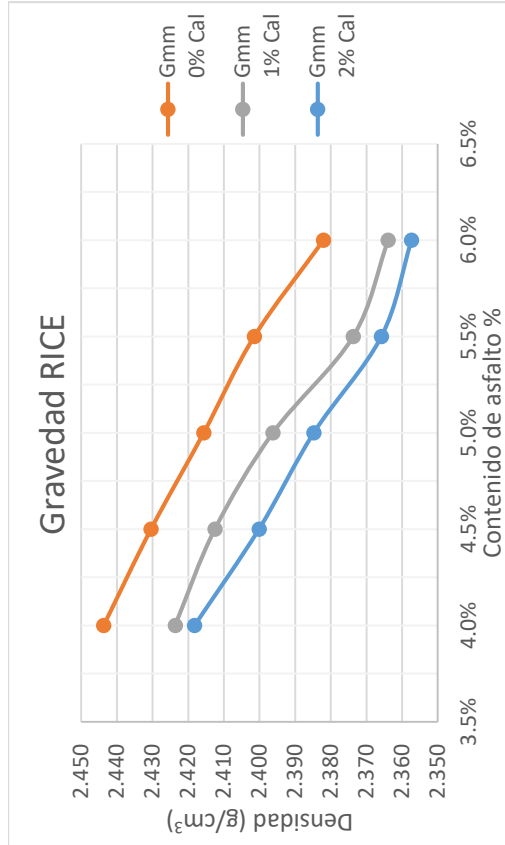


Gráfico 42: Comparativo de Estabilidad

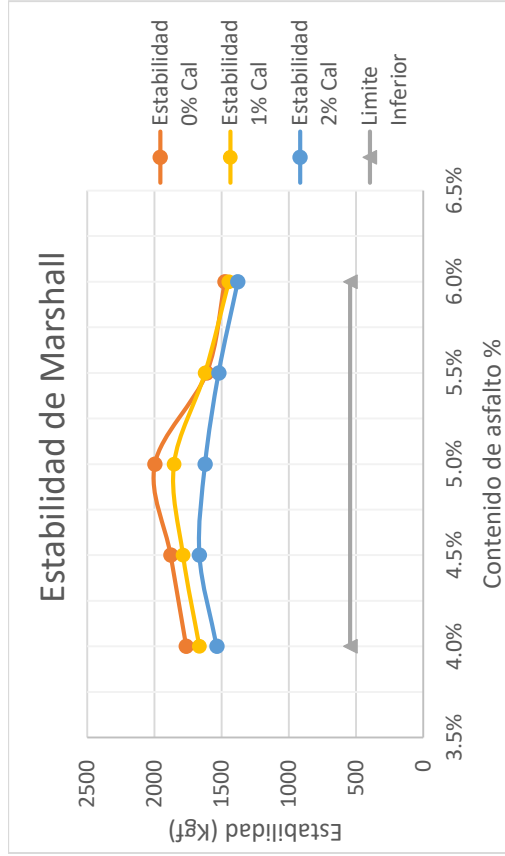


Gráfico 43: Comparativo de filler/asfalto

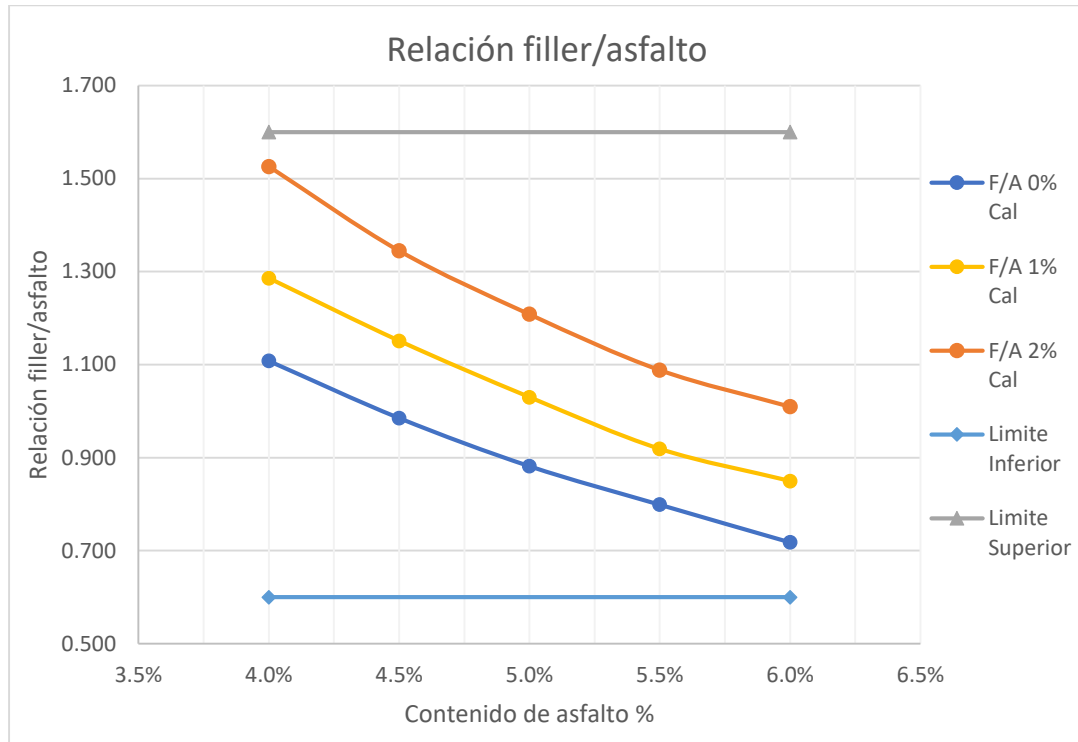
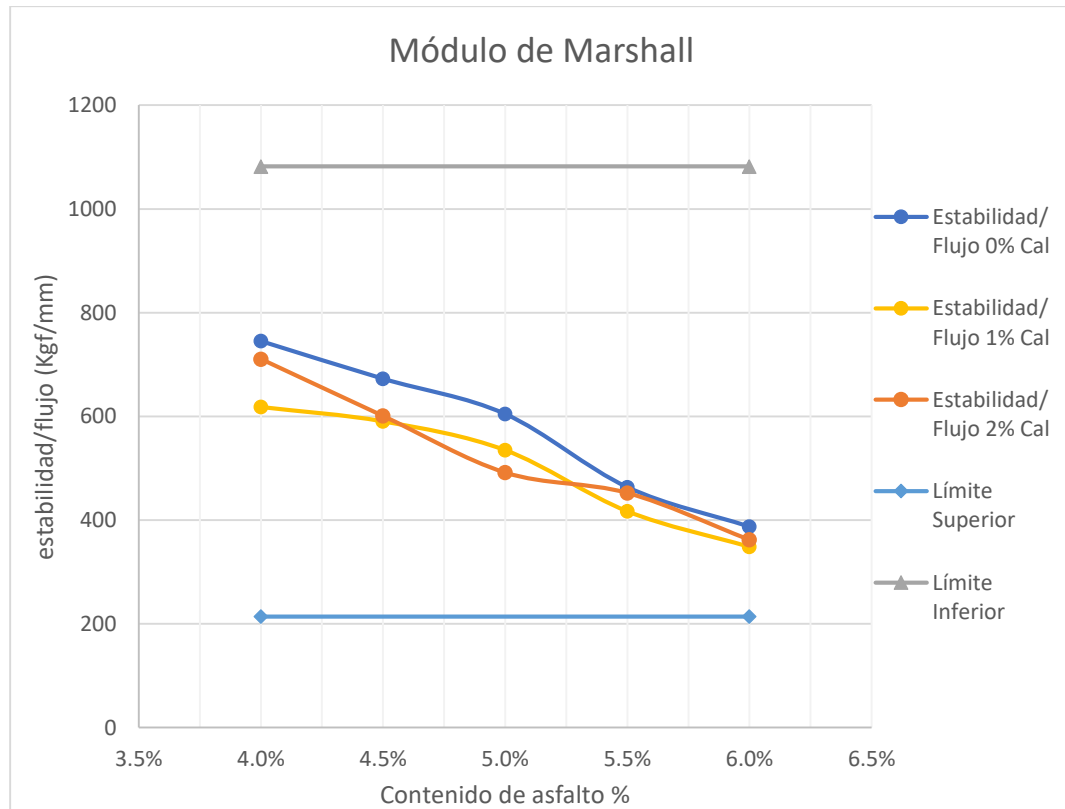


Gráfico 44: Comparativo de módulo Marshall



Al finalizar la fase de diseño de mezclas, se logró confirmar que incorporando cal hidratada es posible reducir el contenido de asfalto utilizado normalmente en una mezcla asfáltica en alrededor de hasta un 0.3%. El análisis completo de gráficos para la metodología de diseño Marshall permitió determinar que los contenidos de asfalto óptimo de las mezclas con 0%, 1% y 2% de cal hidratada eran de 5% para la dosificación virgen y de 4.7% para ambas dosificaciones que contenían cal hidratada. En comparación con patrones obtenidos en otros estudios, los resultados que se obtuvieron en esta investigación concuerdan con el trabajo de (Lee, 2007) quién encontró que la incorporación de un 1% de cal hidratada en porcentaje del peso de la mezcla reduce el contenido asfalto óptimo requerido entre un 0.3-0.9% suponiendo un ahorro en el costo de la MAC.

En este sentido, la reducción del contenido de asfalto presenta un beneficio en cuanto a los costos de materias primas utilizadas para fabricar una MAC, cuestión que se analiza más adelante y puede observarse en el *Gráfico 52*, pero presenta el inconveniente de aumentar la relación filler/asfalto corriendo el riesgo de no cubrir todas las caras del agregado con bitumen. Se considera que cuando la relación llega a ser mayor a 1.3, la película de recubrimiento de asfalto en la piedra no es suficiente para obtener un área de pega adecuada lo que debilita la acción cementante del asfalto y debilita la cohesión de la mezcla.

Dentro de los factores en los que más influencia tiene el contenido de asfalto además de los valores de estabilidad-flujo, se encuentra el volumen de vacíos de la mezcla. Esta variable es la más difícil de controlar en un diseño pues es muy influenciado por el contenido de finos y el contenido de asfalto. Respecto al comportamiento de esta variable, se observó que el volumen de vacíos de diseño de mezcla correspondiente al 4% podía alcanzarse con menos asfalto al incorporar cal hidratada debido a la acción llenante de esta, siempre y cuando se respeten los límites de polvo/asfalto que posee una mezcla. Por otra parte, el análisis volumétrico comparativo muestra que la adición de cal hidratada tiende a aumentar el porcentaje de vacíos rellenos de asfalto y a incrementar la cantidad de vacíos en el agregado mineral. Este comportamiento se atribuye a que el espacio intersticial del agregado es rellenado por la cal hidratada en lugar de asfalto.

La propiedad de estabilidad de un asfalto mostrada en el *Gráfico 42*, hace referencia a la resistencia última de una mezcla bajo la acción de una carga aplicada a tasa de deformación continua. Un valor de estabilidad es un reflejo de la cohesión de una mezcla y valores muy elevados indican la presencia de un pavimento sumamente rígido que se convierte en menos durable de lo previsto dada la fragilidad que se adquiere. Se conoce que uno de los factores que determinan la estabilidad son la geometría del agregado que cuanto más angular es más rugosa será su textura superficial y brindará una mayor estabilidad. Del mismo modo y hasta cierto nivel límite, un aumento en el contenido de asfalto aumenta la cohesión, sin embargo, cuando se sobrepasa un límite, el contenido de asfalto produce una película demasiado gruesa en el agregado lo que resulta en una pérdida de la fricción interna entre partículas alterando la estabilidad y volviendo más flexible un pavimento. Este comportamiento se observa claramente en las curvas de estabilidad para los tres diseños de mezcla en los que la estabilidad máxima se obtiene con contenidos de asfalto muy cercanos al óptimo de diseño.

Respecto al comportamiento mecánico de la mezcla observado en el *Gráfico 44*, los valores de resistencia Marshall no permiten calificar una mezcla asfáltica como de buen o mal desempeño en ciclos de carga-descarga como respecto a fatiga de la mezcla. Esto se debe a que tanto los ensayos de Estabilidad-Flujo como el valor de resistencia indirecta a la tensión son ensayos estáticos a velocidades en las que se obtienen deformaciones a una tasa constante y solo pueden medirse cargas como deformaciones últimas. Por lo tanto, para ser concluyentes respecto al término de elasticidad de una mezcla sería necesario someter briquetas a ensayos dinámicos con los que a través de una máquina especializada y un “data logger” puedan determinarse módulos dinámicos de la mezcla.

A pesar de esto, es posible analizar los patrones de rigidez a esperar por parte de una mezcla a través del módulo de Marshall el cual se define como la razón entre la estabilidad y el flujo promedio obtenido para un juego de probetas con el mismo contenido de asfalto. Un valor alto de módulo de Marshall indica una mezcla rígida mientras que los valores bajos corresponden a mezclas que describen un comportamiento flexible. El patrón de comportamiento observado para la adición de cal hidratada indica que una MAC tiene a volverse más flexible a medida que aumenta el contenido de cal hidratada ya que los valores de módulo Marshall, mostrados en el *Gráfico 44*, van disminuyendo conforme aumenta el contenido de cal hidratada. Si los resultados se enmarcan dentro de valores permitidos por norma, todas las dosificaciones se comportan de manera adecuada dentro de los límites por lo que a pesar del comportamiento de estabilidad flujo observado este califica como adecuado respecto a los requisitos de normativa de la dirección de caminos y los manuales de diseño de mezcla de SIECA.

H. Resistencia a la tensión diametral (ITS) de muestras en estado seco

Una vez determinado el contenido de asfalto óptimo para el diseño de mezcla de ¾" sin inclusión de cal, se procedió a realizar la adición de cal hidratada Horcalsa® tipo S y aditivo anti-stripping Morlife 5000 ® para someter en total a un grupo de 36 probetas Marshall¹² a ensayo de resistencia a la tensión diametral en condiciones seca y húmeda para ver qué cambios se producen en el índice de resistencia a la tensión indirecta de la mezcla. El valor de resistencia a la tensión diametral se calculó con la ecuación 2 en función de la carga máxima soportada (P), el espesor de la briqueta antes del ensayo (t) y su diámetro (D). Es importante indicar que con el objetivo de controlar las variables de mezcla y que los resultados fueran comparables, se mantuvo constante el contenido de asfalto óptimo en una cantidad del 5% sobre el peso de la mezcla adicionando cal en incrementos de 0.5% dentro de un rango de 0-2% sobre el peso total de los agregados. Para el grupo de muestras que contenían aditivo líquido, se utilizó una dosificación de 0.3% sobre el peso del asfalto (cantidad acostumbrada a utilizar en un diseño típico de mezcla). Debido a los requisitos de la norma ASTM D4867 para el contenido de vacíos en la mezcla compactada en laboratorio, cada briqueta fue compactada a 15 Golpes con el pisón Marshall obteniendo un volumen de vacíos que oscilaba entre el 6% - 8% para los especímenes.

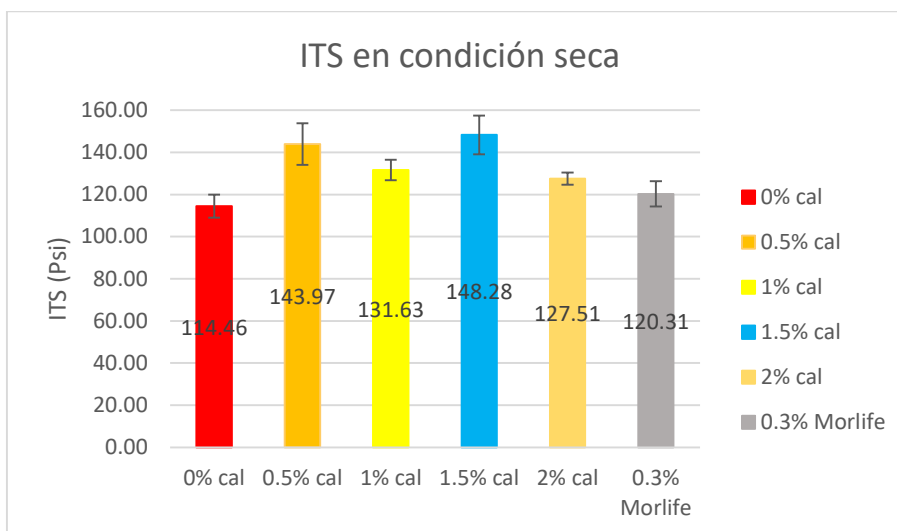
Ecuación 2: Cálculo de la resistencia a la tensión diametral.

$$S_t = \frac{2P}{\pi tD} \text{ (Psi)}$$

En cuanto al grupo de 18 probetas ensayadas a 25°C en condición seca, en el gráfico a continuación pueden observarse los cambios en los esfuerzos a la tensión diametral soportados por cada grupo de muestras de comparación. Se puede observar que las muestras con contenido de cal hidratada soportan un esfuerzo de tensión superior al de la muestra virgen e incluso al de la muestra con incorporación de aditivo Morlife 5000®. La posible explicación de este fenómeno es que la superficie de adherencia agregado-bitumen se ve mejorada debido a la incorporación de cal hidratada. El aumento más grande en el esfuerzo a la tensión resistido por el grupo de probetas fue el obtenido al adicionar 1.5% de cal hidratada equivalente a 34 Psi.

¹² Resultados adjuntos en el apéndice F.

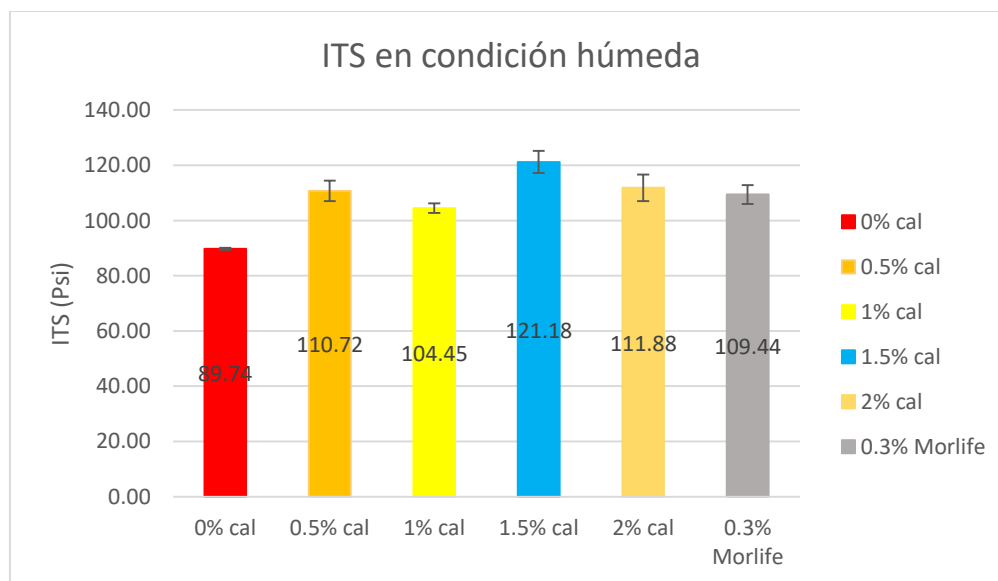
Gráfico 45: Tensión diametral de muestras compactadas a 15 golpes en condición seca



I. Resistencia a la tensión diametral (ITS) de muestras en estado húmedo

Siguiendo el mismo patrón de tendencia, al ser sometidas a condiciones de humedad con saturación de agua a una presión de 525 mm Hg hasta alcanzar un contenido de agua de entre 55-80% y un acondicionamiento en agua a 60°C por 24 horas, las probetas ensayadas en ITS a 25°C con cal hidratada nuevamente mostraron un desempeño superior a la muestra patrón y la muestra con aditivo Morlife 5000® respecto a su esfuerzo a la tensión indirecta. Además, el aumento más grande en la resistencia a la tensión indirecta fue de 31 Psi correspondiente de nuevo a la muestra con un contenido de 1.5% de cal hidratada.

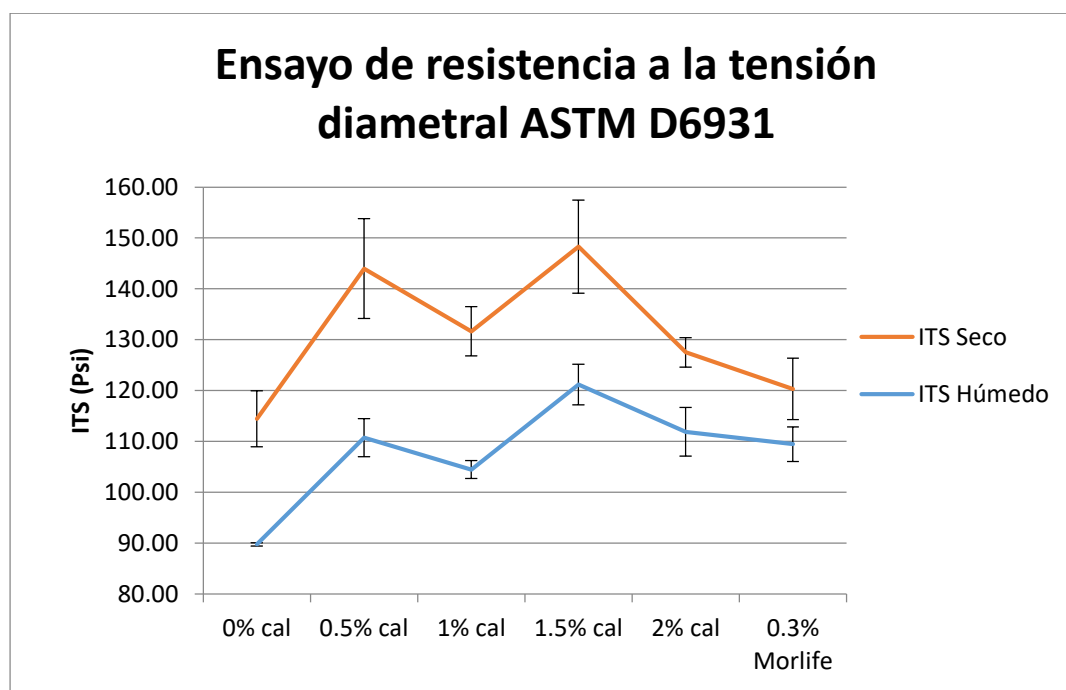
Gráfico 46: Tensión diametral de muestras compactadas a 15 golpes en condición húmeda



J. Resistencia a la tensión (ITS) vs índice de resistencia a la tensión diametral (TSR)

Con respecto al ensayo de tensión indirecta (ITS), también conocido como compresión diametral, este se encarga de medir de manera indirecta la cohesión de la mezcla brindando una idea del comportamiento de los módulos dinámicos de una mezcla asfáltica en caliente. Tanto para el caso de la resistencia a la tensión diametral en estado seco como el ensayo en condición húmeda, dejando fijo en un 5% el contenido de asfalto de la mezcla (CA %) se pudo observar de manera clara que los valores de esfuerzo último a tensión indirecta de la mezcla asfáltica en caliente con cal hidratada aumentan sin importar la dosis de aditivo utilizada pero sin poder determinar un patrón o relación matemática que explique tal comportamiento, tal y como se observa en el Gráfico 47. Si se analizan en conjunto los comportamientos de tensión retenida, se observa que la diferencia entre la tensión seca y húmeda se ve reducida con el aumento de cal hidratada lo cual valida el comportamiento obtenido en otros estudios los cuales fundamentan el uso de cal hidratada en mezclas para reducir el daño por la humedad. Por este motivo, se esperaba obtener un patrón de comportamiento del valor del TSR en aumento a medida que el contenido de cal hidratada también se incrementaba.

Gráfico 47: Comparación de la tensión diametral en condición seca vs húmeda



Analizando la tensión diametral para cada una de las dosificaciones, tanto en la condición seca como en la condición húmeda se logró aumentar el esfuerzo de resistencia a la tensión diametral en un máximo de 29.6% y 35.0% respectivamente, agregando un 1.5% de cal hidratada. Además de esto, llama la atención que la dosis con el contenido de 0.5% de cal hidratada haya arrojado valores altos de resistencia en comparación con las demás dosis aumentando en hasta un 25.8% la resistencia en tensión indirecta.

Si se incluye el comportamiento en tensión indirecta observado para el aditivo anti-stripping, en la condición húmeda apenas se obtuvo un incremento de 5 Psi, un 5.1% de la resistencia de la muestra virgen, que no hacen la diferencia. Sin embargo, al incluir en el análisis todo el comportamiento de la dosis de aditivo Morlife en condiciones de humedad, se aumentó la capacidad resistente en corte indirecto en un 21.9%.

Con la información obtenida de resistencia a la tensión indirecta en condiciones secas (S_{td}) y en condición de humedad (S_{tm}), se calculó el TSR de cada grupo de probetas usando la siguiente ecuación:

Ecuación 3: Cálculo del índice de resistencia a la tensión diametral

$$TSR = \frac{S_{tm}}{S_{td}}$$

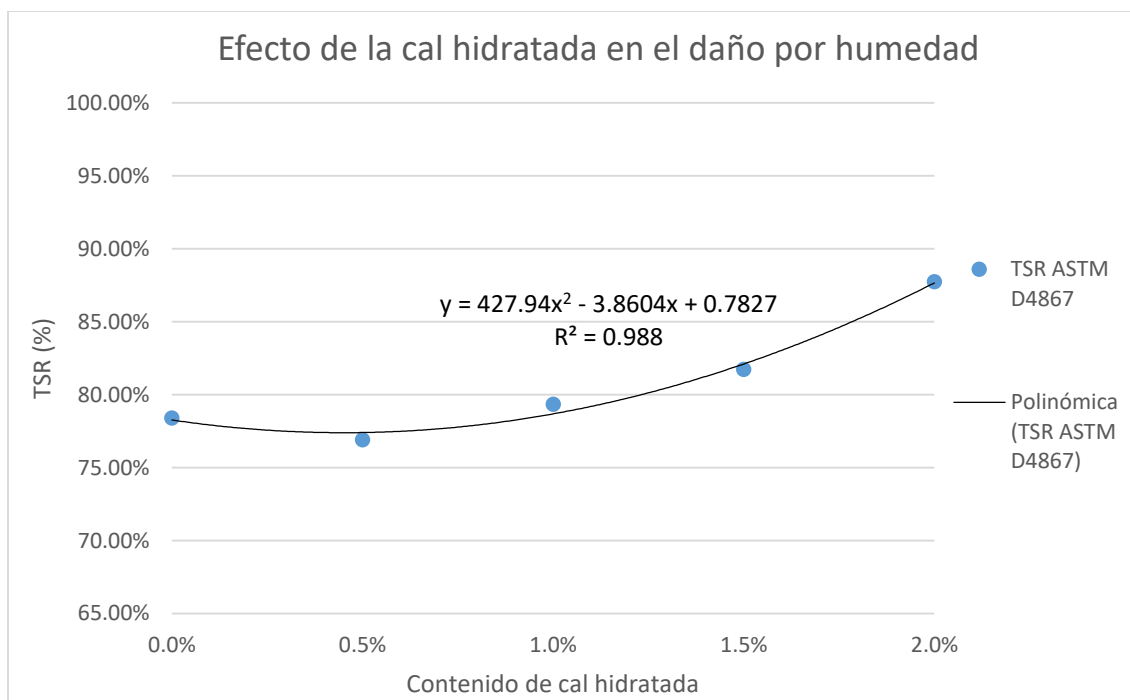
Como puede observarse, el TSR es una medida de qué tanto varía el esfuerzo último a la tensión diametral de las mezclas al someterlas a efectos de humedad y saturación respecto a su resistencia en estado seco. A continuación, se resumen los resultados obtenidos al final de la prueba ASTM D 4867:

Cuadro 30: Susceptibilidad a la humedad en ensayo a la tensión indirecta y cálculo del índice TSR.

Aditivo	Adición (%)	ITS seco (Psi)	% Aumento	ITS húmedo (Psi)	% Aumento	TSR (%)
Sin Aditivo	0.0%	114.46	-	89.74	-	78.41%
Cal hidratada Horcalsa®	0.5%	143.97	25.8%	110.72	23.4%	76.91%
	1.0%	131.63	15.0%	104.45	16.4%	79.35%
	1.5%	148.28	29.6%	121.18	35.0%	81.73%
	2.0%	127.51	11.4%	111.88	24.7%	87.75%
Morlife 5000®	0.3%	120.31	5.1%	109.44	21.9%	90.97%

Para tener un valor de referencia aceptable de TSR, el manual para la construcción de puentes y carreteras indica que a partir de un TSR superior al 80% se califica como aceptable y con poca variabilidad de su resistencia ante la presencia de agua. Si se analiza únicamente el efecto de la adición de cal hidratada tal y como se muestra en el Gráfico 48, el TSR de la mezcla asfáltica tiende a incrementar indicando una reducción en el daño por humedad de la mezcla asfáltica. La mejora más grande obtenida debido a la adición de cal hidratada en el TSR corresponde a la mezcla con 2% de cal hidratada aumentando un 9.3% el índice de daño por humedad.

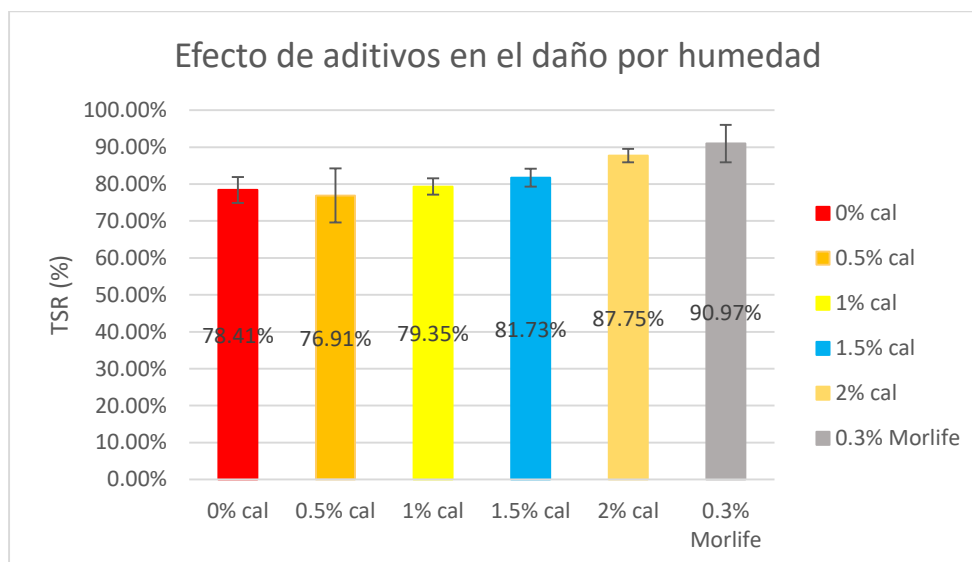
Gráfico 48: Cambios en el índice a la tensión indirecta bajo efectos del daño por humedad con la adición de cal hidratada.



Como puede observarse, para el TSR fue posible determinar un patrón del comportamiento en función del contenido de cal hidratada con una ecuación de segundo grado descrita como $TSR (\% \text{ Cal}) = 427.94 * (\% \text{ Cal})^2 - 3.8604 (\% \text{ Cal}) + 0.7827$. A pesar que es un modelo matemático de buen ajuste, el valor del TSR va a cambiar con cada uno de los diseños debido a la naturaleza del agregado y el modelo generado sirve para nada más que fines de análisis. Dentro de la información generada a raíz de la investigación, tal y como se puede observar en el Gráfico 48, el TSR original (perteneciente a la mezcla de referencia) pasó de tener un valor igual a 78.4%, que no entraba en valores recomendados por SIECA, a uno de hasta 87.75% llegando casi a igualar el aumento en el TSR de la mezcla por parte del aditivo líquido que fue de 90.97%.

Incorporando el comportamiento observado para el aditivo promotor de adherencia Morlife 5000® al análisis, como puede observarse en el Gráfico 49, el resultado obtenido para el TSR de la muestra patrón igual al 78.41% fue mejorado por todas las dosis de aditivo a excepción de la obtenida con el 0.5% de cal hidratada. A pesar de esto, el valor de desviación estándar obtenido para el grupo de probetas del 0.5% de cal hidratada no permite afirmar que la resistencia a la tensión indirecta se reduce con esta dosis y permite aceptar la tendencia de un TSR en aumento.

Gráfico 49: Índice de resistencia a la tensión.



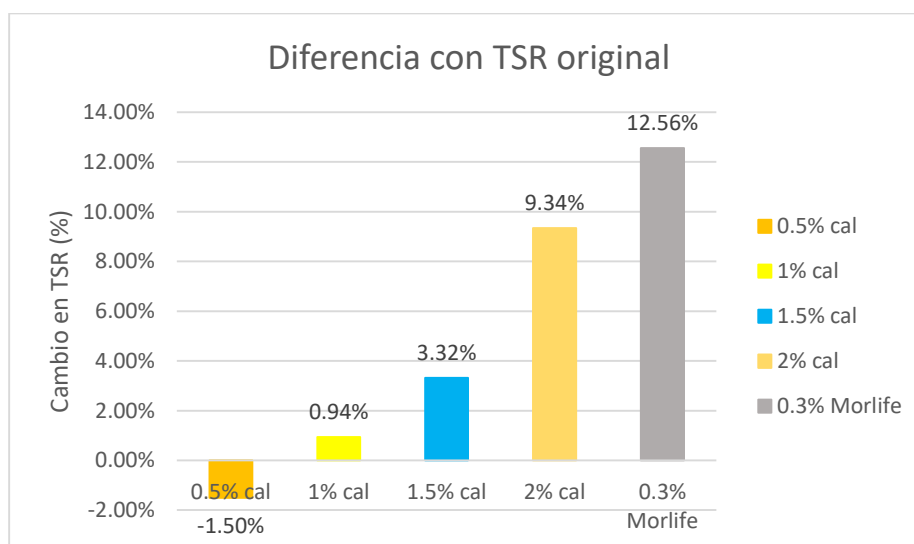
Tal y como observó (Sebaaly, 2007), en el Gráfico 49 y Gráfico 50 se confirma que la adición de cal hidratada llega a casi igualar los efectos de aditivos líquidos anti-desvestimiento en TSR como puede observarse para la adición de 2% de cal hidratada. El aditivo líquido anti-desvestimiento utilizado es un compuesto de carácter líquido, fabricado a base de amina es encargado de mejorar la adherencia del cemento asfáltico con el agregado. El inconveniente que ocurre con las aminas es que ante la presencia de oxígeno y altas temperaturas estas tienden a incorporarse dentro de un proceso reducción-oxidación el cual puede reducir los efectos obtenidos con el aditivo mejorador de adherencia a un largo plazo. Comparando los beneficios del aditivo líquido con respecto a la cal hidratada, el aditivo anti-desvestimiento únicamente mejora las propiedades de adherencia del agregado comportamiento que tiene una incidencia directa en los valores de susceptibilidad a cambios por la presencia de humedad en la mezcla mientras la cal hidratada brinda 3 beneficios principales: reducción en el stripping, reducción en el rutting y función de aditivo químico con efecto anti-oxidante del asfalto.

Toda esta evidencia discutida, pone en claro que la incorporación de cal hidratada aumenta los valores de TSR de una mezcla de manera proporcional a su contenido. Si se busca una explicación del comportamiento observado, tal y como comenta (EULA, European Lime Association, 2010), “Las razones por las cuales la cal hidratada es tan efectiva en una mezcla asfáltica reside en su interacción con los componentes que constituyen la mezcla como lo son el agregado y el betún, ejerciendo 4 efectos principales, 2 en cada uno de los elementos mencionados. La cal hidratada modifica la superficie del agregado, permitiendo el desarrollo de una superficie compuesta (iones calcio) y rugosa que favorece la adhesión con el betún. Además, la cal hidratada realiza un tratamiento sobre las partículas de arcilla [en caso de haber presencia por no lavar material indicando un mal agregado] adhiriéndolas a la superficie del agregado, inhibiendo el efecto perjudicial por la presencia de estas en la mezcla”.

La cal hidratada reacciona químicamente con los ácidos presentes en el betún, lo que en consecuencia reduce la velocidad de endurecimiento por envejecimiento y neutraliza el efecto de agentes adhesivos “malos” que se encuentran presentes dentro del bitumen, mejorando la resistencia a la humedad de la mezcla. Este factor es uno de los más importantes que deben cubrirse con investigaciones futuras para fundamentar el sistema de construcción y el desempeño como material anti-oxidante por parte del asfalto.

Debido a que la resistencia a tensión indirecta en una propiedad de la mezcla asfáltica que da una indicación general sobre parámetros de resistencia a las fracturas y agrietamiento, es posible comentar que además de mejorar la superficie de contacto entre el mastico y la grava, la adición de cal hidratada en una mezcla asfáltica reduce las fallas por agrietamiento. Además de este efecto, otra de las ventajas que se obtienen al añadir cal es la disminución en el ahuellamiento de la carpeta de asfalto y de los efectos oxidativos del asfalto que a largo plazo aumentan la vida útil de una carretera pero que aún deben de confirmarse producto de investigación a realizarse en un futuro.

Gráfico 50: Cambio del TSR de las dosificaciones con relación a la muestra patrón.



Producto de analizar los resultados obtenidos, se observó que la dosis de cal hidratada con la que más se pudo aumentar el TSR de la mezcla fue la dosis del 2% aumentando el valor medio del TSR en un 9.34%. Si comparamos el desempeño de la cal hidratada con el del aditivo líquido anti-stripping el cual aumentó el TSR en un 12.56%, claramente el aditivo se desempeña mejor en cuanto al parámetro de TSR, pero no por mucha diferencia por sobre el contenido de 2% de cal hidratada. A pesar de que con el aditivo líquido Morlife 5000 en dosis de 0.3% sobre peso del cemento asfáltico se obtuvo el incremento más significativo en el TSR para las muestras analizadas en daño por humedad, la resistencia individual a la tensión indirecta de las mezclas tanto en seco como acondicionadas en húmedo no se incrementó ni superó a las muestras con cal hidratada como puede observarse en el Gráfico 45 y Gráfico 46. Por lo tanto, este efecto es algo que debe someterse a discusión en futuras investigaciones pues es necesario obtener más parámetros

de resistencia, como por ejemplo módulos dinámicos que nos brinden más información sobre la susceptibilidad de las mezclas en condiciones de humedad.

Es importante comprender que todos los resultados aquí presentados se limitan a comportamientos en condiciones de laboratorio y con materias primas, como es el caso de los agregados de cantera de muy buena calidad sometidos a ciclos de desgaste por humedad en espacios de tiempo muy pequeños. Por este motivo no es posible descartar que ante la presencia de materias primas de baja calidad los efectos de la cal hidratada puedan verse potenciados tal y como lo indica la bibliografía consultada. De manera análoga a la estabilización de suelos con cal hidratada, es necesario evaluar las condiciones bajo las cuales es recomendable proponer su incorporación en una MAC y esto solo puede determinarse con estudios realizados en campo. A pesar de esto, se presume como conveniente usar la incorporación cuando el contenido de finos en una mezcla se encuentre muy bajo y en general cuando la calidad de los materiales para usar en MAC es pésima.

Gracias a todos los resultados obtenidos para el análisis volumétrico y de resistencia Marshall de la muestra junto con el comportamiento observado para la susceptibilidad en presencia de humedad por parte de la mezcla, se recomienda incluir cal hidratada en dosis promedio de 1.5-2% del peso de los agregados cuando la arena usada en un diseño sea muy gruesa, con módulos de finura superiores a 3.2 y se posea un bajo contenido de filler pasa tamiz No.200 ya que a diferencia de filleres como el polvo de piedra, la cal hidratada tiende a reducir la susceptibilidad a la humedad aumentando el valor del TSR en lugar de las disminuciones que se obtienen en producción con el uso del filler mineral contenido en el agregado fino que químicamente es bastante inerte.

K. Análisis de costos de las materias primas

Como aproximación a un análisis de rentabilidad para el proyecto, se cotizaron los costos en planta de las materias primas utilizadas para la producción de MAC pasando por el bitumen asfáltico, los agregados minerales, el aditivo anti-strip y la cal hidratada. Como base para el cálculo del costo por tonelada de asfalto se utilizaron los siguientes valores cotizados con tres proveedores:

Cuadro 31: Costo de materias primas utilizadas para optimización de diseños

Materia Prima	Precio
Bitumen Asfáltico AC-30 / AC-20	2.21 \$/Gal
Aditivo Anti-Strip Morlife 5000	4.0563 \$/Kg
Agregado ¾"	24.47 \$/m ³
Agregado ½"	17.30 \$/m ³
Agregado Arena Triturada	25.85 \$/m ³
Cal hidratada	157.44 \$/Ton

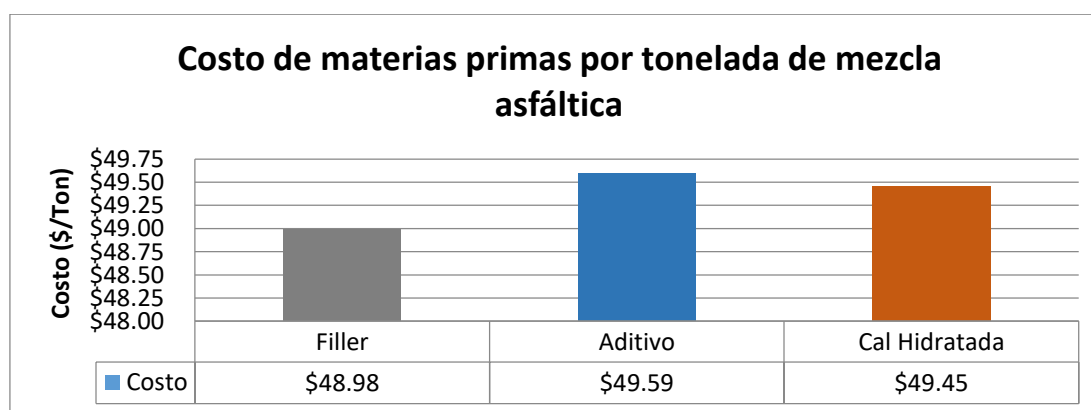
De manera resumida, este análisis presenta en base a los porcentajes óptimos de asfalto para cada diseño y dosis de aditivo usado en la investigación, cuál sería el costo de las materias primas asociado a cada diseño. Respecto al diseño patrón, en el Cuadro 32 se refiere a este diseño como la solución de mezcla con filler de arena pues el único material que pasa el tamiz No. 200 contenido en la mezcla. Para el caso de aditivo anti-strip, el costo de las materias primas se calculó del mismo modo que la muestra patrón con la diferencia que al costo se le añadió el correspondiente a adicionar 0.3% de aditivo sobre el peso del cemento asfáltico. Para ambos casos se realizó el cálculo tomando como base un contenido de asfalto óptimo de diseño correspondiente a 5% determinado en la sección D.

Por otra parte, para la solución con incorporación de cal hidratada, se realizó el cálculo tomando como base una cantidad de 2% sobre el peso de los agregados para la cal hidratada (el caso más extremo y caro) con un 4.7% de contenido de asfalto óptimo para la mezcla dado que como se pudo observar en los diseños de mezcla, la adición de cal hidratada genera una reducción en la cantidad de asfalto óptimo requerido para cumplir con los requisitos de diseño. A continuación, se presentan los resultados asociados al costo de las materias primas requeridas para realizar las dosificaciones estudiadas en el presente trabajo.

Cuadro 32: Costo unitario de mezcla asfáltica en caliente con distintas soluciones de diseño de mezcla.

Resumen del costo por tonelada de mezcla			
Solución	Costo	% Diferencia costo	Diferencia
Filler de arena ¹³	\$ 48.98	-	-
Aditivo anti-strip ¹⁴	\$ 49.59	1.24%	\$ 0.61
Cal hidratada ¹⁵	\$ 49.45	0.95%	\$ 0.47

Gráfico 51: Costos unitarios de mezcla con incorporaciones de aditivos y filler mineral



¹³ Esta solución, correspondiente a la granulometría (0) sin contenido de cal hidratada, se tomó como referencia para comparar cálculo del precio unitario por tonelada con las demás dosificaciones. El contenido de asfalto correspondiente al cálculo es al 5%.

¹⁴ Includido en dosis de 0.3% sobre el peso del asfalto óptimo que representa el 5% de la mezcla.

¹⁵ Includida en una dosis elevada de 2% sobre el peso del agregado seco y un contenido de asfalto de 4.7%

Respecto al análisis de costos unitarios de la materia prima por tonelada de mezcla asfáltica en caliente de las dosis estudiadas, la incorporación de cal hidratada resultó ser la solución más barata para mejorar las propiedades de la mezcla al compararla con la incorporación de aditivos líquidos para dosis de hasta 2% sobre el peso del agregado. Tal y como puede observarse en el Cuadro 32 y Gráfico 51, la adición de cal hidratada aumenta en un 0.95% (\$0.47/Ton) el costo de materias primas para producir MAC contra un aumento de 1.24% (\$0.61/Ton) obtenido por añadir aditivo líquido a la mezcla asfáltica.

Para poder evaluar la efectividad de las distintas dosificaciones de cal hidratada y aditivo en una mezcla asfáltica en caliente, en el *Cuadro 33* se presentan de manera resumida los resultados del análisis de rentabilidad de las dosificaciones usadas en la segunda fase de esta investigación, planteadas para analizarse más adelante a través de relaciones costo-beneficio. Este análisis se realizó con el objetivo de tener parámetros de comparación entre las dosificaciones con las que se trabajó y conocer los costos asociados a mejorar los resultados de tensión indirecta, así como al parámetro de susceptibilidad a la humedad de la mezcla representado por el índice de resistencia a la tensión. Para ello, se calcularon 2 relaciones costo-beneficio para cada dosis estudiada. La primera relación, la correspondiente a la *Ecuación 4*, se realiza entre el costo unitario de la mezcla y el valor del ITS (en condición seca y húmeda) y el TSR obtenido de manera experimental tal y como se mostró en la sección J de la presente investigación. La segunda, correspondiente a la *Ecuación 5*, muestra con respecto a la dosificación patrón el cambio en el costo unitario con respecto al cambio observado en el ITS y TSR de las distintas dosificaciones en estudio, es decir cuánto dinero extra se debe gastar por tonelada de mezcla con respecto a la muestra patrón para obtener un cambio de 1 Psi de resistencia en ITS o de un 1% en el TSR de la mezcla respectivamente.

Ecuación 4: Relación Costo-Beneficio 1 para analizar el desempeño de materias primas contra los valores de resistencia a tensión diametral y el valor de susceptibilidad a la humedad.

$$\frac{\text{Costo}}{\text{Beneficio}} 1_i = \frac{\text{Costo}_i}{\text{ITS}_i} = \frac{\text{Costo}_i}{\text{TSR}_i}$$

Ecuación 5: Relación Costo-Beneficio 2 respecto al costo añadido de la mejora en el desempeño a la tensión indirecta y susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas con respecto al cambio en el daño por humedad

$$\frac{\text{Costo}}{\text{Beneficio}} 2_i = \frac{\text{Costo}_0 - \text{Costo}_i}{\text{ITS}_0 - \text{ITS}_i} = \frac{\text{Costo}_0 - \text{Costo}_i}{\text{TSR}_0 - \text{TSR}_i}$$

Cuadro 33: Resumen de resultados del análisis Costo-Beneficio. En la tabla se compara el desempeño de las dosificaciones de mezcla asfáltica en caliente con cal hidratada y aditivo líquido en base a los costos de las materias primas y los parámetros medidos por ASTM D 4867.

Dosis de adición (%)	CA (%)	\$/Ton	Dif \$/Ton	ITS _d (Psi)	ΔITS _d (Psi)	Rel C/B 1	Rel C/B 2	ITS _w (Psi)	ΔITS _w (Psi)	Rel C/B 1	Rel C/B 2	ΔTSR	Cambio TSR	Rel C/B 1 \$/TSR	Rel C/B 2 \$/TSR
Cal 0.0%	5%	48.99	N/A	114.46	N/A	0.428	N/A	89.74	N/A	0.546	N/A	78.41%	N/A	62.48	N/A
Cal 0.5%	5%	49.10	0.11	143.97	29.51	0.341	0.0037	110.72	20.98	0.443	0.0052	76.91%	-1.50%	63.84	-7.33
Cal 1.0%	5%	49.22	0.23	131.63	17.17	0.374	0.0134	104.45	14.71	0.471	0.0156	79.35%	0.94%	62.03	24.47
Cal 1.5%	5%	49.33	0.34	148.28	33.82	0.333	0.0101	121.18	31.44	0.407	0.0108	81.73%	3.32%	60.36	10.24
Cal 2.0%	5%	49.45	0.46	127.51	13.05	0.388	0.0352	111.88	22.14	0.442	0.0208	87.75%	9.34%	56.35	4.93
Morlife 0.3%	5%	49.59	0.60	120.31	5.85	0.412	0.1026	109.44	19.7	0.453	0.0305	90.97%	12.56%	54.51	4.78

Gráfico 52: Análisis del costo-beneficio de la resistencia a tensión indirecta (ITS) de briquetas de asfalto calculado a través de la Ecuación 4.

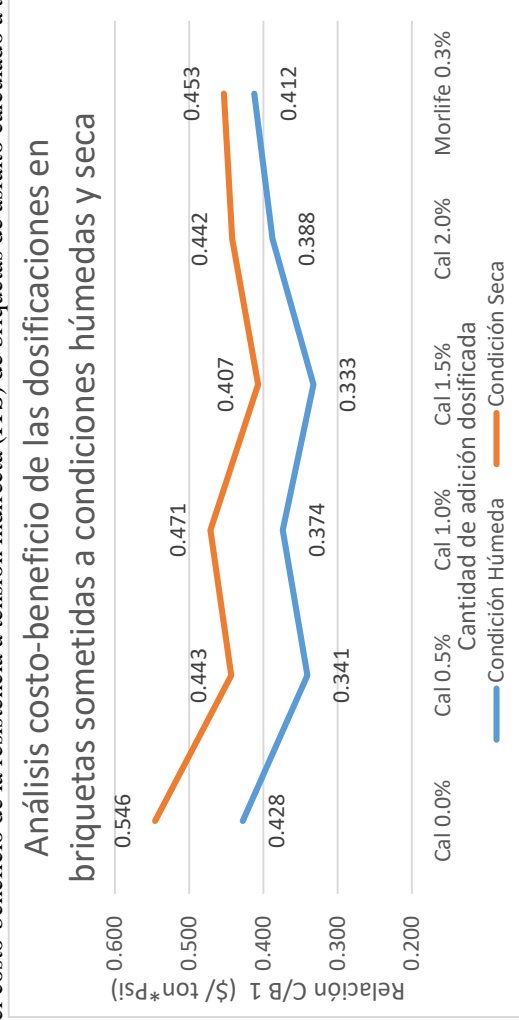
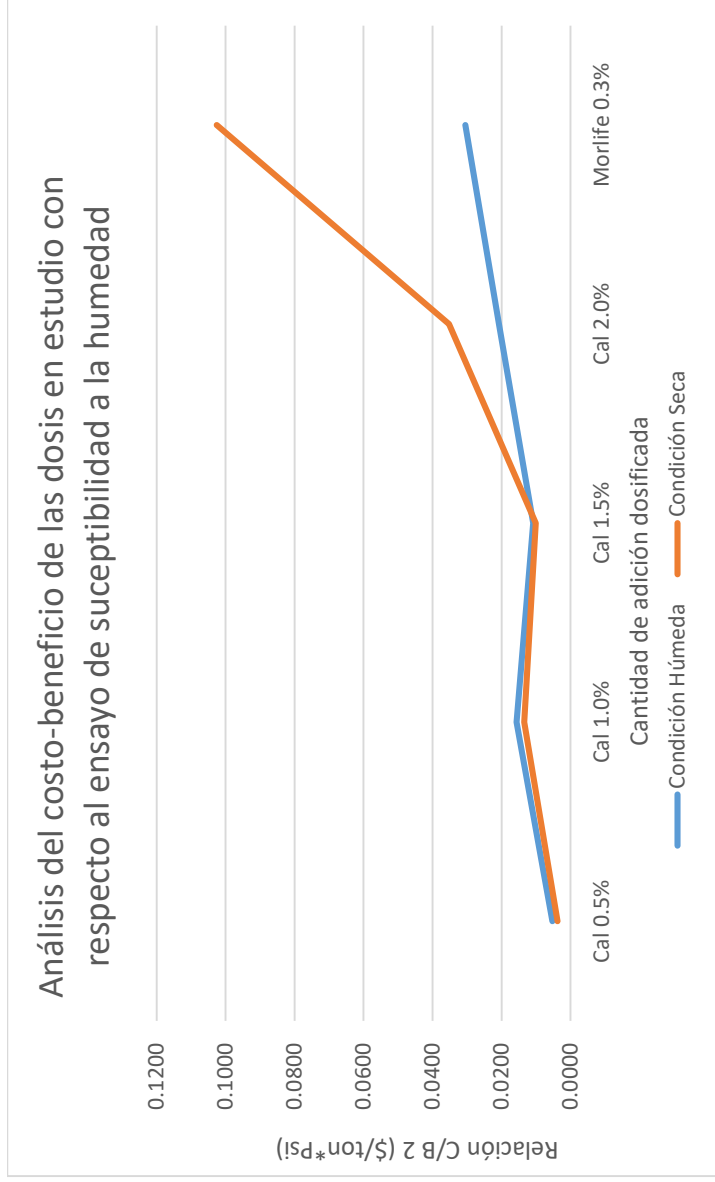


Gráfico 53: Análisis costo-beneficio del cambio en la resistencia a la tensión indirecta (ITS) de briquetas de asfalto calculado a través de la Ecuación 5.



Con respecto al comportamiento observado en el *Gráfico 52*, este presenta de manera resumida el costo unitario por unidad de resistencia a la tensión diametral (en Psi) obtenida a través del ensayo ASTM D4867. En este se puede distinguir que, con respecto al ensayo de tensión diametral en condiciones secas, la adición de cal hidratada para las dosificaciones de 0.5%, 1.5% y 2.0% poseen una relación costo-beneficio menor a la obtenida con el aditivo líquido mientras que para las condiciones de ensayo en humedad controlada, todas las dosificaciones de cal hidratada presentaron una relación costo-beneficio menor a la del aditivo líquido. Analizando desde otra perspectiva estos resultados, en el

Gráfico 53 se muestra que los cambios en los costos y resistencias provocados por la adición de cal hidratada en cualquier dosificación con respecto a la muestra patrón superan a los obtenidos con aditivo anti-strip. Estos resultados permiten comentar que, para el grupo de muestras estudiadas, a nivel de costos de materias primas y resistencia a la tensión diametral, el desempeño de todas las mezclas con adición de cal hidratada en condiciones de humedad es superior al de la muestra patrón y de la muestra con incorporación de aditivo.

En concordancia con los objetivos del presente trabajo y poder enriquecer los hallazgos de este, también se compararon los costos asociados a las dosificaciones estudiadas con respecto al índice a la tensión diametral (TSR), principal parámetro para el estudio de la susceptibilidad de la mezcla asfáltica a condiciones de humedad. Los resultados se expresan de manera gráfica a continuación:

Gráfico 54: Relación costo/beneficio de los resultados obtenidos para el TSR de las distintas dosis calculado a través de la Ecuación 4.

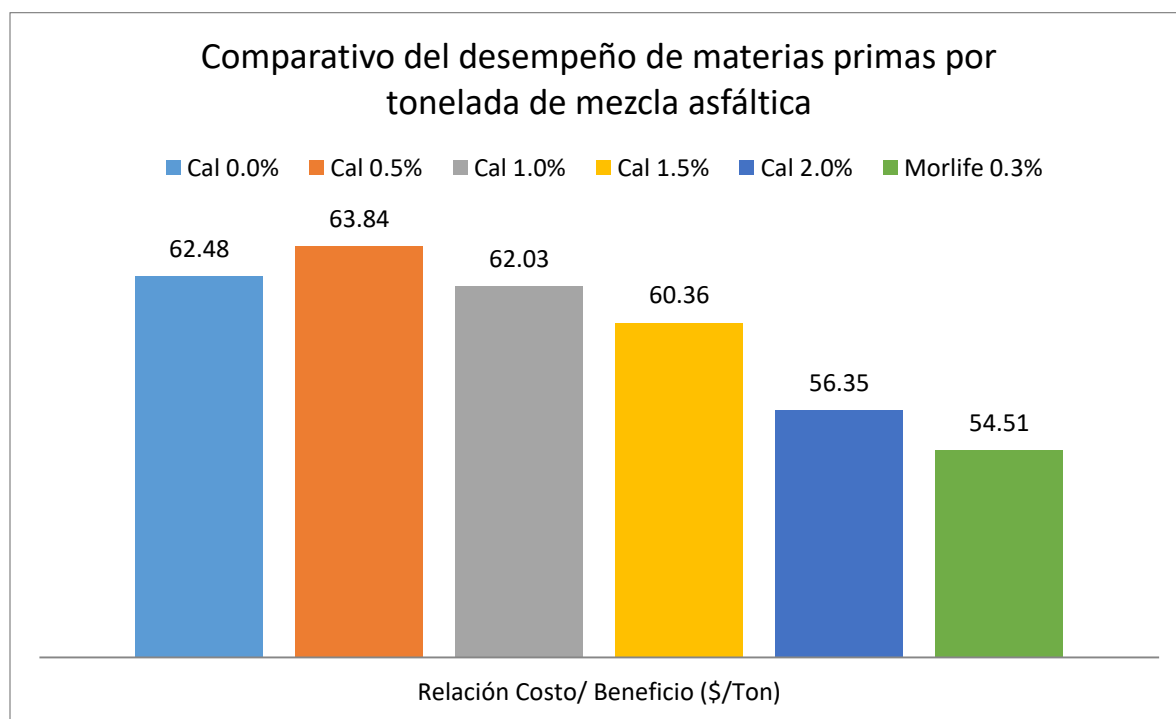
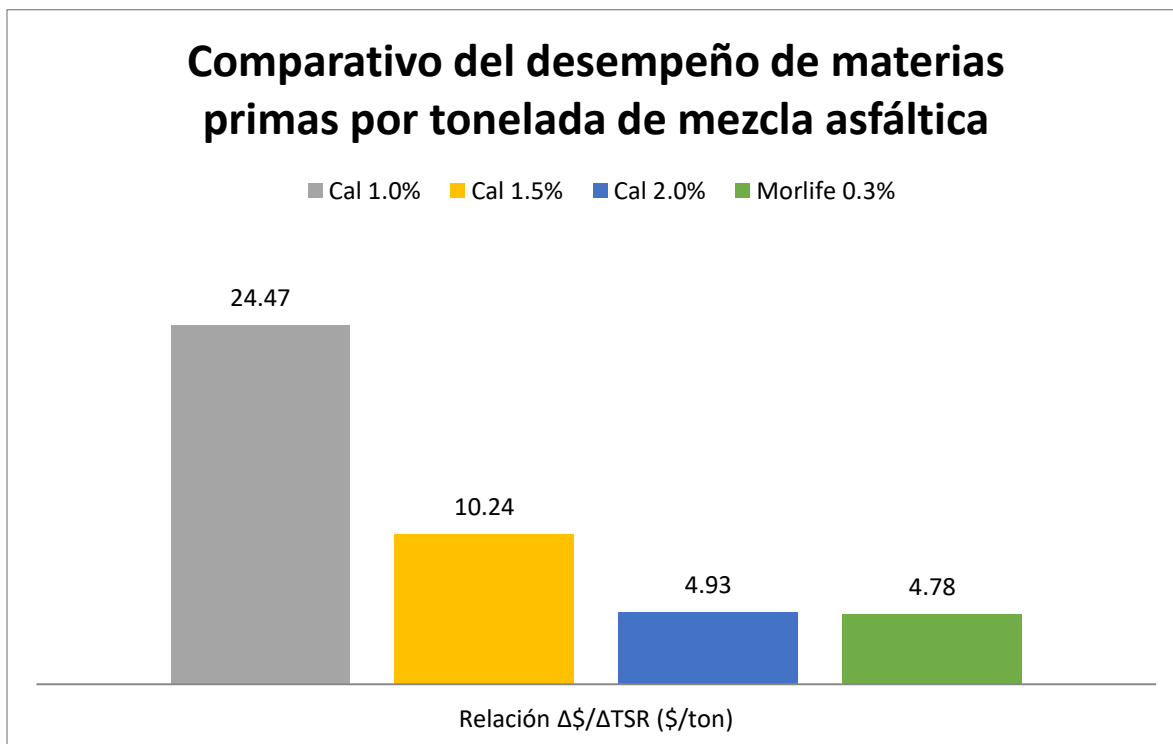


Gráfico 55: Relación costo-beneficio 2 de las dosificaciones en función del cambio en el precio unitario de la tonelada de mezcla asfáltica en caliente y el cambio en el TSR observado en la mezcla calculado a través de la Ecuación 5.



Tanto en el *Gráfico 54* como en el *Gráfico 55*, se puede observar que a medida que se aumenta el contenido de cal hidratada en el diseño de la mezcla, su relación costo-beneficio se reduce lo cual justifica el gasto en mejorar las propiedades de la mezcla a través de la incorporación de cal hidratada. Como puede observarse, para las barras correspondientes a la dosis de 2% de contenido de cal hidratada, esta llega casi a igualar en desempeño a la dosificación con un 0.3% de aditivo líquido al comparar la diferencia entre el costo por tonelada de la mezcla y el aumento en el TSR obtenido con respecto a la muestra patrón de las dosificaciones estudiadas.

Al analizar la información del costo aproximado, se detectó que la cal hidratada puede competir dentro del mercado como una adición activa dado que la reducción en el contenido de asfalto óptimo que provoca en la mezcla permite ahorrar en la materia prima más cara dentro de la mezcla que es el cemento asfáltico, ocasionando que a pesar que llegue a agregarse hasta un 2% de cal hidratada el costo por tonelada no aumente más que los valores para las dosis con aditivo. Sumado a este beneficio, es importante indicar que en el mercado no existe un aditivo que posea “3 efectos en uno” como ocurre con la cal, al referirnos a la reducción del daño por humedad, ahuellamiento y reducción de la tasa de oxidación del asfalto. Por este motivo en Estados Unidos y Europa, la cal hidratada se califica como un “aditivo” muy versátil el cual justifica el pago de un costo más elevado de la materia prima pero que en un largo plazo aumenta la vida útil

de una carretera mejorando su comportamiento elástico y reduciendo los efectos dañinos que el clima y entorno provocan en la mezcla.

Por último, existen distintos puntos que podrían discutirse sobre los métodos de incorporar esta solución en planta sin tener que realizar modificaciones a los sistemas. En el caso de plantas asfálticas con un conducto para inclusión de aditivos o sistema de re-inyección de finos, se sugiere hacer uso de estos mecanismos para adicionar la cal hidratada a la mezcla. Otro caso posible es la capacidad de agregar un silo de cal hidratada dentro del sistema de dosificación de agregados o a manera de pre-mezcla, que permita el flujo en dosis controlada de la materia prima. También se piensa que un modo de simular la condición de marinado del agregado es mezclar el grueso con la cal hidratada de primero para facilitar la formación de una película delgada de cal hidratada recubriendo las caras del agregado que permita mejorar la interacción ligante de la matriz asfalto-agregado. Sin embargo, un análisis de costos a lo largo del ciclo de vida es necesario para tomar una decisión de la metodología más rentable a emplear para la modificación de MAC con cal hidratada.

VII. CONCLUSIONES

- La investigación realizada permitió evaluar el desempeño de adicionar cal hidratada a una mezcla asfáltica en caliente, logrando realizar el diseño y optimización de dos dosificaciones distintas con las cuales se pudo igualar el desempeño de una mezcla asfáltica de referencia con respecto a los parámetros de estabilidad, deformación y susceptibilidad a la humedad medidos en condiciones de laboratorio.
- Al comparar los resultados para las mezclas con incorporación de cal hidratada y la mezcla de referencia, se observó que es posible alcanzar el mismo comportamiento de parámetros de diseño Marshall como vacíos totales (Va) y vacíos llenos de asfalto (VFA) incorporando menos asfalto a la mezcla conforme agregamos más cal hidratada. Esto nos permite concluir que la adición de cal hidratada modifica el contenido de asfalto óptimo a utilizar en un diseño de mezcla y que el porcentaje de vacíos de una mezcla asfáltica es inversamente proporcional al contenido de asfalto y de cal hidratada. Como patrón de comportamiento para las muestras en estudio, se observó que por cada 0.5% de contenido de asfalto añadido, este reduce en 1% el volumen de vacíos. Por otra parte, la cal hidratada, reduce aproximadamente un 0.5% el volumen de vacíos por cada 1% presente sobre el peso del agregado lo cual ocasiona también una reducción en la cantidad de asfalto a incluir dentro de la mezcla.
- Con respecto al comportamiento estabilidad-flujo expresado como un módulo de rigidez de Marshall, se determinó que las mezclas con cal hidratada se comportan con módulos más pequeños indicando una pérdida en la rigidez del pavimento lo que se traduce en un comportamiento más flexible del mismo. A pesar de la pérdida en la rigidez observada, no puede concluirse mucho respecto a una mejora en la recuperación elástica de la mezcla debido a la falta de ensayos dinámicos que confirmen este supuesto.
- Analizando el juego de curvas para cada contenido de cal con respecto a la densidad de la mezcla, se determinó que el peso unitario de una MAC disminuye a medida que aumenta el contenido de cal hidratada pero no es posible determinar una tasa fija para esta reducción ya que varió con respecto al contenido de asfalto. La explicación de esta reducción en la densidad es que a medida que se aumenta la cantidad de cal hidratada, se reduce la proporción granulométrica del volumen que ocupan los demás agregados, en especial el polvo de piedra que pasa el tamiz No.200 por lo tanto, al ser la cal menos densa que el filler polvo de piedra la densidad de la mezcla tiende a disminuir.
- Otro efecto observado de añadir cal hidratada es que aumenta el volumen de vacíos en el agregado mineral debido a la alta porosidad de la cal hidratada con relación al filler mineral además de aumentar el volumen de vacíos llenos de asfalto.
- Respecto a cambios en el asfalto óptimo de los diseños con cal hidratada, se logró determinar que la incorporación del material reduce en hasta un 0.3% el contenido óptimo de asfalto sin violar los requisitos de norma para el diseño de mezclas lo cual supone según el análisis de costos realizado, ahorros de hasta \$2.19/Ton en asfalto, pero en aumentos de \$3/Ton respecto a la adición de cal hidratada. Sin embargo, la adición de cal hidratada es más barata que la de aditivo anti-strip obteniendo los mismos efectos de aditivo sumado a los demás beneficios de los que se ha hablado sobre el uso de la cal.

- Los valores promedio de las muestras ensayadas por resistencia a la tensión diametral en estado seco obtenida a través de ASTM D 6931 muestran un aumento en su valor con las adiciones de cal hidratada, superando a la resistencia de la muestra patrón y a la muestra con aditivo morlife. El valor máximo en que se logró aumentar la resistencia a la tensión de la mezcla fue de 33.8 Psi correspondiente a la adición de 1.5% de cal hidratada.
- Los valores promedio de las muestras ensayadas por resistencia a la tensión diametral acondicionadas en estado de humedad y saturación según el método ASTM D4867 también muestran un mejor desempeño con la adición hidratada en comparación a la muestra virgen y con adición del aditivo morlife. El aumento máximo obtenido para la resistencia de esta condición fue de 31.4 Psi y se obtuvo con una dosis de 1.5% de cal hidratada.
- Comparativamente, a pesar de obtener valores de resistencia a la tensión mayores para las muestras con cal hidratada, el aumento más grande en el índice de daño por humedad (TSR) se obtuvo con el aditivo morlife. La condición de mejora en el TSR de la mezcla más cercana a la obtenida con la dosis de 0.3% de morlife fue la dosificación de un 2% de cal hidratada.
- A pesar de que no se llegó a igualar el desempeño del aditivo mejorador de adherencia morlife, se pudo comprobar que el TSR de una mezcla tiende a incrementarse con la adición de cal hidratada modelando el valor del TSR observado en el estudio (y) debido a la incorporación de un porcentaje (x) de cal hidratada con la función $y(x) = 427.94x^2 - 3.8604x + 0.7827$.

VIII. RECOMENDACIONES

Con respecto a la metodología de diseño de mezcla, se propone realizar un diseño de la misma con los mismos porcentajes de cal hidratada, pero utilizando la metodología SUPERPAVE para el diseño de la mezcla y observar si se obtiene el mismo comportamiento para la adición de cemento asfáltico ante la presencia de cal hidratada. En cuanto a los resultados de TSR, la literatura consultada menciona que mientras más extremas son las condiciones de desgaste o humedad, por ejemplo, los ciclos congelamiento-deshielo o cambios de temperatura, mejor es el desempeño de la cal hidratada al compararla con otros aditivos líquidos. Por lo tanto, se recomienda someter a más ciclos de secado-inmersión en agua los especímenes para volver más extremas las condiciones de estudio y ver si bajo esta acción el desempeño de la mezcla con cal hidratada supera al aditivo.

Con base en los resultados obtenidos en este estudio, se recomienda añadir cal hidratada a una mezcla asfáltica en caliente en una dosis óptima de 1.5-2% sobre el peso del agregado seco tomando como base los resultados de diseño obtenidos en esta investigación. Esta dosis se sugiere debido a que con este rango de dosis es posible reducir al máximo el contenido de asfalto y aumentar el TSR de la mezcla. A pesar de todo lo aquí discutido siempre será necesario realizar un diseño de mezcla previo para comparar los resultados de desempeño y seleccionar la cantidad de asfalto que va a incorporarse en una mezcla.

Para la implementación de un sistema de adición de cal hidratada, se recomienda hacer uso del sistema de re-inyección de finos o de la tubería para dosificación de aditivos con el objetivo de incluir cal hidratada en la mezcla asfáltica. El método de adición fuera del tambor de mezcla solo sería viable si es utilizando una pre-mezcla corriendo riesgos de segregación debido a la diferencia de densidades entre los materiales.

Actualmente en el mercado guatemalteco se maneja la venta de la pre-mezcla asfáltica de nombre “Cafill” que es la adición de cal hidratada con polvo de roca triturada utilizada como filler. En una mezcla común, cuando se someten a proceso de lavado los agregados gruesos, el contenido de finos y polvo de roca se pierde y se vuelve necesaria la incorporación de filler. Como primera medida en la industria de producción de asfalto se agrega polvo de roca con el inconveniente de que este material reduce los valores de TSR para los diseños de mezcla por lo que la adición de cal hidratada en el diseño corregiría este efecto mejorando las propiedades de la mezcla y reduciendo el volumen de vacíos. Por este motivo se recomienda hacer un ensayo incorporando “cafill” en la mezcla para compararlo con los resultados de la adición de cal por el método utilizado en la investigación aquí presentada.

El análisis del desempeño y la susceptibilidad al daño por humedad y temperatura de mezclas asfálticas no es un parámetro evaluado únicamente con parámetros Marshall y TSR pues existen otras metodologías para realizar este análisis. Por lo tanto, se sugiere profundizar en la investigación analizando otros efectos de beneficio que pueden observarse al adicionar cal hidratada con otros ensayos. Dentro de estos se encuentran: el ensayo de pérdidas al cántabro por desgaste (NLT 352) bajo el cual se basó el estudio de (Melara, 2009), el efecto de la humedad en la resistencia a compresión (ASTM D 1075) y el desgaste de la Rueda de Hamburgo (AASHTO T 324) para evaluar rutting en la mezcla asfáltica y en envejecimiento oxidativo de muestras tal y como se evaluó por (Hao & Hachiya, 2003) y (Bianchetto H. e., 2007).

Se propone también, calcular el módulo de elasticidad y resiliencia del asfalto en función de la curva esfuerzo-deformación para distintos porcentajes de cal adicionada a la mezcla. Esto permite analizar reologicamente el comportamiento de la mezcla asfáltica con incorporación de cal y realizar conclusiones respecto al comportamiento elástico de la mezcla. Además, el desempeño de la adición de cal puede modelarse en el software de diseño mecánico-empírico (MEPDG) de AASHTO para observar cambios en el módulo dinámico (E^*) originados debido a la adición de cal para observar la mejora en el desempeño de pavimentos flexibles bajo distintas condiciones según los estudios realizados por (Bari & Witczak, 2005).

Todas las pruebas de resistencia realizadas en este trabajo se realizaron a una tasa de aumento en la carga de deformación constante (ensayos estáticos) lo cual no permite describir el comportamiento de una mezcla en parámetros de recuperación elástica y fatiga, por este motivo se podrían determinar el módulo dinámico (ASTM D 3497) o el módulo de resiliencia (AASHTO T274) para observar comportamientos en función de temperaturas de trabajo.

Para caracterizar los cambios químicos producidos por la incorporación de cal hidratada en condiciones posteriores a un proceso de oxidación, puede realizarse una separación por cromatografía líquida SARA (ASTM D4124) tal y como fue estudiado por (Reyes, 2012), de manera previa y posterior a someter una muestra de asfalto a RTFOT y PAV con el objeto de obtener cuantitativamente la variación de los porcentajes presentes de los grupos funcionales que constituyen el bitumen y analizar de manera exhaustiva los cambios químicos que se generan al incluir cal hidratada.

Ninguna de las metodologías y ensayos actuales permite evaluar de manera exacta y simular completamente las condiciones de abrasión, oxidación y deterioro por el uso de una carretera sobre probetas para el diseño de una mezcla. Por este motivo, se recomienda realizar un análisis de los parámetros más importantes de un pavimento asfáltico utilizando como herramienta un tramo de prueba con una sección patrón y una con un contenido óptimo de cal hidratada previamente diseñado para poder así observar el comportamiento de la mezcla en condiciones reales de deterioro poniendo principal atención en poder validar los efectos de reducción en el ahuellamiento y en la tasa de endurecimiento por la oxidación del asfalto.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Anguas, P. e. (2005). *Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas*. Intituto Mexicano del Transporte. México: Secretaria de comunicaciones y transporte.
- ASTM. (2013). *Annual Book of ASTM Standards: Road and Paving materials* (Vol. 04.03). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Bari, J., & Witczak, M. (2005). *Evaluation of the effect of Lime Modification on the Dynamic Modulus Stiffness of Hot-Mix Asphalt use with the new Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*. Transportation Research Record.
- Bianchetto, H. e. (17 de Febrero de 2007). *Mezclas Asfálticas: Resistencia al envejecimiento de las mezclas bituminosas en caliente: beneficios y limitaciones de las incorporación de filleres comerciales*. Recuperado el 20 de Mayo de 2014, de Primera Parte: Estudios en base al método UCL: <http://www.latindex.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/viewFile/2062/2025>
- Bianchetto, H. e. (2008). *Resistencia al envejecimiento de las mezclas bituminosas en caliente: beneficios y limitaciones de la incorporación de filleres comerciales. Segunda parte: estudios sobre los ligantes mediante ensayos reológicos y técnicas de analítica macromolecular*. Universidad Nacional de La Plata/Universidad Politécnica de Cataluña, LaPIV/ Laboratorio de Caminos. Buenos Aires: Red Ibero-Americana de Investigación de Carreteras.
- BID. (2014). *Carreteras Pavimentadas (% del total de carreteras)* . Recuperado el 26 de Mayo de 2014, de Indicadores de Desarrollo, Banco Interamericano de Desarrollo: <http://datos.bancomundial.org/indicador/IS.ROD.PAVE.ZS/countries/GT?display=graph>
- Brock, J. (2008). *Oxidación del Asfalto*. Recuperado el Junio de 18 de 2014, de http://www.astecinc.com/images/file/literature/T103_SP.PDF
- Brown, E. e. (1989). *Effect of Aggregates on performance of bituminous concrete"*. Philadelphia: American Society of Testing and Materials STP10116.
- Caminos, D. G. (2001). *Especificaciones Generales para construcción de carreteras y puentes*. Guatemala: Ministerio de comunicaciones, Infraestructura y Vivienda.
- CIV. (2013). *Longitud de la red Vial de la república de Guatemala según calificación por departamento y tipo de rodadura*. Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda, Dirección General de Caminos, Guatemala.
- COGUANOR. (2011). *NTG 41006: Terminología referente al concreto y agregados para concreto*. Guatemala: COGUANOR.

- Coronado, J. (2002). *Manual Centroamericano para diseño de pavimentos*. USASID-SIECA.
- Cortes, C. e. (2010). *Envejecimiento Foto-oxidativo de betunes asfálticos*. Centro para el Desarrollo Tecnológico. ASFAMA.
- EULA, European Lime Association. (Septiembre de 2010). *Hydrated Lime: A Proven Additive for Durable Asphalt Pavement*. (E. L. Association, Ed.) Recuperado el 21 de 5 de 2014, de http://www.britishlime.org/documents/EuLA_Literature_Review_Lime_in_Aspphalt.pdf
- FHWA. (2001). *Information Series 128: HMA Pavement Mix Type Selection Guide*. Washington D.C, Estados Unidos: NAPA.
- Hao, P., & Hachiya, Y. (2003). Moisture susceptibility of asphalt mixture and effectiveness of anti-stripping additives. *Proc. Japan Soc. Civil Engineers*(61), 265-273.
- Instituto Salvadoreño del Asfalto. (2012). *Glosario Especializado de Terminología Asfáltica*. San Salvador.
- Ishai, I., & Craus, J. (1977). *Effect of the filler on aggregate-bitumen adhesion properties in bituminous mixtures*. (P. A. Technologists, Ed.) Recuperado el 5 de Mayo de 2014, de http://issuu.com/lawjuris/docs/the_development_of_modern_highways_
- Kao Chemicals S.A. (2004). *Gripper L: antistripping agent resistant to heat effects*. Obtenido de <http://www.kaochemicals-eu.com/sites/default/files/tds/266557.pdf>
- Kennedy, D. T. (1984). *Use of Hydrated Lime in Asphalt Paving Mixtures*. Arlington, Va.: National Lime Association.
- Lee, S. (2007). *Investigation of the effect of lime in the performance of HMA Using Advanced Testing and Modeling Techniques*. ProQuest.
- Lesuer, D., Petite, J., & Ritter, H. (Junio de 2012). Increasing the durability of asphalt mixtures by hydrated lime addition: What evidence? *5th Eurobitume and Eurasphalt Congress*. Estambul.
- Lesuer, D; Petit, J; Ritter, J. (5 de diciembre de 2012). En *The Mechanisms of hydrated lime modification on asphalt mixtures: a state of the art review*. (Vol. 14, págs. 1-16). Koln: Bundesverband der Deutschen Klkindustrie.
- LIME. (2001). *Hydrated Lime: More than just a Filler*. Recuperado el 9 de junio de 2014, de <http://www.asamblea.go.cr/Lanamme%20UCR/Informes%202009/2009/LM-AT-41-09%20Evaluacion%20dise%C3%B1os%20de%20MAC/ANEXOS/LM-AT-41-09%20Evaluacion%20dise%C3%B1os%20de%20MAC%20Anexo%20C.pdf>

- Lime Organization. (3 de mayo de 2003). *Using Lime in asphalt*. Obtenido de <http://www.lime.org/ENV02/Construction802.htm>
- Little, D. E. (2001). *The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt*. National Lime Association.
- Little, D. J. (2010). *Chemical and Mechanical Processes of Moisture Damage in Hot-Mix Asphalt Pavement*. Texas: Texas A&M University.
- Maxil, C. (2014). *Asfalto Modificado con Polímero*. Puebla: Universidad de las Américas Puebla.
- MeadWestvaco Corporation. (2012). *Morelife 5000 Adhesion promoter*. Charleston, North Carolina: MWV.
- Melara, E. (2009). *Uso de Cal en mezclas asfálticas*. Investigación aplicada, San Salvador.
- Mercado, R., Bracho, C., & Avendaño, J. (2008). *Emulsiones asfálticas: Usos - Rompimiento*. FIRP S365A, Universidad de los Andes, Laboratorio de formulación, interfases, reología y procesos, Mérida.
- Minaya, S. O. (s.f.). *Manual de Pavimentos: Tipos de Mezclas asfálticas*. Instituto de la Construcción y Gerencia.
- MINECO. (2013). *Guía Sectorial: Pavimentos*. Recuperado el 24 de junio de 2014, de Dirección de Inversión-Pública-Ministerio-de-Economía: http://www.ec.gba.gov.ar/sceoci/inversion_publica/Documentos/GUIA%20PAVIMENTO S.pdf
- MOP Paraguay. (2011). *Manual de Carreteras del Paraguay: Normas para Materiales y Ensayos de Materiales* (Vol. II). MOP.
- Moreno, M. (2011). *La Influencia de la naturaleza del filler de aportación en la adhesividad árido-ligante para mezclas bituminosas*. Zaragoza: Escuela de Omgemiería y Arquitectura Universidad de Zaragoza.
- National Lime Association. (September de 2003). *How to add hidrated lime to asphalt: An overview of current methods*. Recuperado el 18 de junio de 2014, de http://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/how-to-add-lime.pdf
- Quesada, I. (2006). Capítulo 2: Introducción al reciclado de pavimentos.
- Read, J., & Whiteoak, D. (2003). *The Shell Bitumen Handbook* (5th ed.). (T. Telford, Ed.) Thomas Telford Publishing.
- Reyes, F. e. (Julio de 2012). Determinación de las fracciones sara de asfaltos colombianos envejecidos al medio ambiente empleando cromatografía líquida en columna. *Revista EIA, Número 17*, 47-56.

- Salazar, J. (Diciembre de 2011). Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el reglamento técnico centroamericano (RTCA 75.0122:047). *Métodos y Meteriales, I*, 25-38.
- Sebaaly, P. (2007). *Comparison of Lime and Liquid Additives on the Moisture Damage of Hot Miz Asphalt Mixtures*. LIME. Reno, Nevada: National Lime Association.
- SIECA. (Marzo de 2004). *Manual Centroamericano: Especificaciones para la construcción de carreteras y puentes regionales*. Recuperado el mayo de 2014, de <https://es.scribd.com/doc/107192988/sieca-2004>
- Vargas, X. R. (Diciembre de 2010). El Fenómeno de envejecimiento de los asfaltos. *Ingeniería e Investigación, 30. No3* , 27-44.
- Villegas, R., Aguiar, J., Loria, L., & Navas, A. (2012). Métodos modernos de incorporación polimérica en matrices asfálticas. *Revista Ingeniería de Obras Civiles, I*, 60-67.
- Wulf, F. (2008). *Análisis de pavimento asfáltico modificado con polímero*. Facultad de ciencias en la ingeniería, Escuela de construcción civil. Universidad Austral de Chile.

X. APÉNDICES

A. Resumen de ensayos utilizados en el diseño de mezclas Marshall y ensayos complementarios

1. Método estándar para el ensayo Marshall de estabilidad y flujo de materiales bituminosos ASTM D 2927-06. El método se aplica para evaluar la resistencia de flujo plástico de especímenes cilíndricos de 4” de diámetro y altura de 2.5” hechos de mezcla bituminosa y cargado perpendicularmente a su sección transversal para ser ensayado usando la máquina de Marshall. El ensayo es aplicable a TMA 1”. El flujo de Marshall permite evaluar la deformación elástica y plástica a una tasa de 50mm/min. El ensayo permite observar la carga máxima que soporta una probeta justo antes de su falla. Cuando la falla que ocurre no se observa de manera muy clara, el punto de flujo puede seleccionarse como el punto en la curva que se encuentra 6 puntos a la derecha de la línea tangente. Como mínimo deben realizarse 3 especímenes por cada incremento de porcentaje de asfalto. Antes de ensayar las muestras es necesario que se enfríen a temperatura ambiente para luego dejarse en curado a una temperatura de 60°C±1 durante 30-40 min si es por inmersión o 120-130 min si es en horno luego se retira y no deben pasar más de 30 seg de sacarlo del baño en agua o del horno para ser ensayados. Previa a su ensayo deben determinarse las propiedades volumétricas de la mezcla y determinar las temperaturas de mezclado.

Grado de Desempeño	Temperatura (°F)	Temperatura (°C)
PG 64-22, PG 70-22	275-295	135-146
PG 70-22	300-320	148-160
PG 82-22	305-325	150-162

2. Determinación de la gravedad específica “bulk” en mezcla impermeable (cuando el agua absorbida < 2%) ASTM D2726. Se debe pesar la probeta cilíndrica en condición de superficie seca saturada (B), sumergida en agua a 25°C por 3-5min (C) y seco a masa constante en horno a 110°C (A). Determinando la gravedad Bulk como:

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

- i. Pesar la probeta en seco una vez esta posea la temperatura ambiente.
- ii. Sumergir probeta en baño de agua a 25 ± 1°C por 3-5 min y determinar peso sumergido. Si la probeta difiere más de 2°C la temperatura del agua esperar al equilibrio térmico entre 10-15min.
- iii. Sacar la probeta secando su superficie rápidamente y pesarla en condición SSS.

Además, se determina el agua absorbida y si es mayor al 2% se debe usar el método D1188 o D6752 para sacar la densidad.

$$\% \text{ Agua} = \frac{(B - C)}{(B - A)} * 100\%$$

3. Gravedad específica Bulk en mezcla porosa (agua absorbida >2%) ASTM D1188 (Por parafina) y D6752 (Sellado al vacío).

a. El método de parafina. El método consiste en pesar los cilindros al aire en estado seco (A) para luego sellar con parafina su superficie, pesarlo (D) y sumergirlos en agua obteniendo su peso (E). Se debe conocer el peso específico de la parafina (F) y si es desconocido determinarlo según la norma.

$$Gmb = \frac{A}{D - E - \frac{D - A}{Ft}}$$

b. Sello al vacío. Si el método es sellado al vacío, se debe determinar la masa del cilindro en condición seca en temperatura ambiente (A), luego se debe pesar el espécimen introducido en la bolsa plástica en que se va a sumergir (B) para ser introducida a condiciones de vacío, se debe conocer la densidad de la bolsa según el fabricante a 25°C y luego se sumerge en agua a 25°C pesando el espécimen sumergido (E) para luego sacar la muestra del sello al vacío y pesarla (C).

$$Gmb = \frac{A}{(C + [B - A]) - E - \frac{B - A}{Ft}}$$

4. Medición del espesor de los especímenes ASTM D3549.

- i. Para la corrección de Marshall se debe determinar esto midiendo 4 secciones longitudinales distintas y promediando su resultado.
- ii. Otro modo (para mezclas densas con menos de 10% espacios vacíos) es dividiendo el volumen dentro del el área de la sección.

$$V = \frac{D - E - (D - A)/F}{1} o \frac{B - C}{1}$$

5. Densidad específica y gravedad específica máxima (Gmm) teórica de la mezcla sin incluir aire (RISE) ASTM D2041 M-11. Este ensayo permite determinar la densidad máxima teórica de mezclas bituminosas sin compactar a 25°C. Para realizarlo es necesario tomar una muestra de 2500g si el TMNA es de 1" y 1500g de ½" o menor. Teóricamente, es necesario conocer la gravedad específica neta del agregado (Gsb), la gravedad específica efectiva del agregado (Gse), el porcentaje de asfalto sobre la masa total de la mezcla a ensayar (Pb), la gravedad específica del asfalto (Gb) y el contenido de agregado sobre la masa total de la mezcla (Ps).

$$G_{mm} = \frac{100}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}}$$

6. Fórmulas útiles para el cálculo de Parámetros volumétricos¹⁶

De los agregados

a. Gravedad específica neta (Gsb)

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

Donde:

G_{sb} es la gravedad específica neta para el agregado total, P_n es el porcentaje individual que representa la masa de cierto agregado en la mezcla y G_n la gravedad específica neta individual del agregado.

De la mezcla asfáltica

b. Vacíos en el agregado mineral (VMA)

$$VMA = 100 * \frac{G_{mb} - P_s}{G_{sb}}$$

Donde:

VMA es el porcentaje del volumen neto de vacíos en el agregado mineral, G_{sb} gravedad específica neta del total de agregado, G_{mb} gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada (ASTM D 1188 o D 2726/ AASHTO T 166) y P_s es contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica.

c. Vacíos de aire (Va)

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

Donde:

V_a es el porcentaje del volumen total de vacíos de aire en la mezcla compactada, G_{mm} es la gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica y G_{mb} es la gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada.

¹⁶ Todas las ecuaciones contenidas en el epígrafe 6 del anexo fueron extraídas de (Anguas, 2005).

d. Vacíos llenos de asfalto (VFA)

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

Donde:

VFA es el porcentaje del volumen de vacíos llenos con asfalto, VMA es el porcentaje del volumen total de vacíos en el agregado mineral y V_a es el porcentaje del volumen total de vacíos en la mezcla compactada.

e. Absorción de asfalto

$$P_{ba} = 100 * \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} * G_{se}} * G_b$$

Donde:

P_{ba} es el porcentaje de asfalto absorbido sobre la masa del agregado, G_{se} es la gravedad específica efectiva del agregado, G_{sb} es la gravedad específica neta del agregado y G_b es la gravedad específica del asfalto.

f. Contenido de asfalto efectivo

$$P_{be} = 100 * \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} * G_{se}} * G_b$$

Donde:

P_{be} es el contenido de asfalto efectivo sobre el porcentaje de la masa total de la mezcla, P_b es el contenido de asfalto sobre el porcentaje de la masa total de la mezcla, P_{ba} es el porcentaje de asfalto absorbido sobre la masa del agregado y P_s es el contenido de agregados expresado como porcentaje sobre el total de la masa de la mezcla.

g. Ensayo RTFOT (ASTM D2872)

El ensayo se realiza con el objetivo de observar los efectos de oxidación en el asfalto durante su mezclado en planta. Además de esto puede determinarse la volatilidad del asfalto. Para ello se somete el material a rotación de 15 rev/min durante 85 min a 163°C (o a la temperatura que se alcance la viscosidad de clasificación) averiguar para C-20 dentro de un horno ventilado con un flujo de aire de 40mL/min. El procedimiento inicia con la elevación de la temperatura del betún sin exceder los 150°C asegurando su fluidez y mezclándolo sin la inclusión de aire. Logrado esto se deben incluir 35 g de muestra en contenedores de vidrio que se colocan de manera horizontal para permitir que se enfríen al ambiente durante 60-120 min los cuales son pesados luego del enfriamiento para determinar el cambio de masa. Una vez determinado el cambio, se debe introducir en la máquina y horno (debe alcanzar 325°C en menos de 10 min) el grupo de muestras para ensayar y rotar las mezclas a una temperatura. Se deja reposar nuevamente el material a

temperatura ambiente entre 60-180 min y se pesa. El residuo se ensaya 72 h luego de haber sido sometido a RTFOT.

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	GRADO DE DESEMPEÑO						
		PG 46	PG 52	PG 58	PG 64	PG 70	PG 76	PG 82
Promedio 7-días	S	-34- 40 -46	-10 -16 -22- 28- 34- 40 -46	-16- 22- 28- 34 -40	-10- 16- 22- 28 -34 -40	-10 -16 -22- 28- 34 -40	-10 -16- 22 -28-34	-10- 16- 22 - 28-34
Temperatura Máxima de Diseño de Pavimento	°C	<46	<52	<58	<64	<70	<76	<82
Temperatura Mínima de Diseño de Pavimento ¹⁾	°C	>-34>-40>-46	>-10>-16>- 22>-28>-34 >- 40>-46	>-16>-22 >-28>-34 >-40	>-10>-16 > -22 >-28>-34 >-40	>-10>-16> -22>-28>-34 >-40	>-10>-16 >-22 >-28 >-34	>-10>-16 >-22>-28 >-34

Horno Sobre Película Delgada Rodante (Método de Prueba D-2872)								
Pérdida de Masa, máxima	%	1,0						
Cizalla Dinámica: G*/sen δ, mín. 2,20 kPa, Plato de 25-mm, 1-mm de Espacio, Temp. de Prueba a 10 rad/s	°C	46	52	58	64	70	76	82

h. Ensayo en hoyo de presión PAV (ASTM D6521). Este ensayo pretende simular las condiciones de envejecimiento que sufre el asfalto al someterse a años de uso. Las muestras utilizadas deben pasar previamente el proceso de RTFOT para ser acondicionadas por 20h±10min a una temperatura de 100°C y presión de 2.10MPa (304 Psi). Según las especificaciones de ASTM D6373-7 (Clasificación PG) se debe escoger la presión y temperatura que simula cierto grado de envejecimiento. Una vez terminado el RTFOT se debe recolectar el material que queda del ensayo para verter 50 g en contenedores que formen películas delgadas. Si el ensayo no va a realizarse el mismo día que las muestras salen de RTFOT estas se deben dejar enfriar a temperatura ambiente y luego ser calentadas cuando vayan a ser utilizadas.

Residuo de Recipiente para Envejecimiento a Presión (AASHTO PP1)								
Temperatura de Envejecimiento PAV ³⁾	°C	90	90	100	100	100 (110)	100 (110)	100 (110)
Cizalla Dinámica: G*/sen δ, máx. 5000 kPa, Plato de 8 mm, 2 mm de Espacio, Temp. de Prueba a 10 rad/s	°C	10 7 4	25 22 19 16 13 10 7	25 22 19 16 13	31 28 25 22 19 16	34 31 28 25 22 19	37 34 31 28 25	40 37 34 31 28
Resistencia a la Fluencia: ⁴⁾ S, máx. 300 MPa, valor m: mín. 0.300, Temp. de Prueba en 60 s	°C	-24 -30 -36	0 -6 -12 -18 -24 -30 -36	-6 -12 -18 -24 -30	0 -6 -12 -18 - 24 -30	0 -6 -12 -18 -24 -30	0 -6 -12 -18 -24	0 -6 -12 -18 -24
Tensión Directa: ⁴⁾ Falla de Deformación, mín. 1,0 %, Temp. de Prueba a 1,0 m/minuto	°C	-24 -30 -36	0 -6 -12 -18 -24 -30 -36	-6 -12 -18 -24 -30	0 -6 -12 -18 - 24 -30	0 -6 -12 -18 -24 -30	0 -6 -12 -18 -24	0 -6 -12 -18 -24

¹⁾ Las temperaturas del pavimento se estiman por medio de las temperaturas del aire utilizando un algoritmo contenido en el Programa de Computadora SUPERPAVE.

²⁾ Para control de calidad de la producción de cemento asfáltico sin modificar, la medida de viscosidad del cemento asfáltico original puede sustituir a las medidas de cizalla dinámica de G*/sen δ en las temperaturas de prueba donde el asfalto es un fluido Newtoniano. Se puede utilizar cualquier norma adecuada para medir la viscosidad, incluyendo viscosímetro capilar o rotacional (Métodos de Prueba D-2170 ó D-2171).

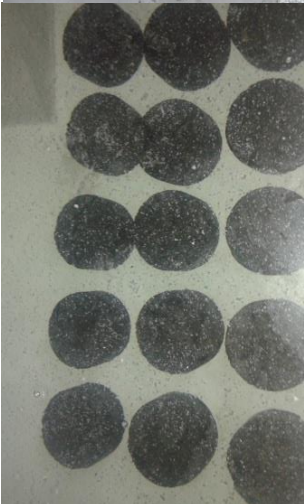
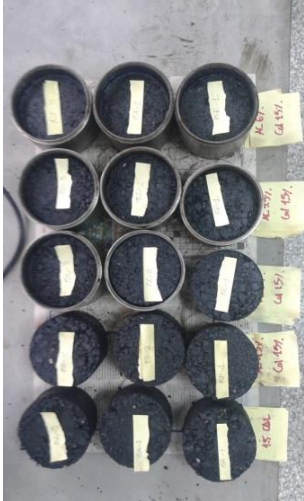
³⁾ La temperatura de envejecimiento PAV se basa en condiciones climáticas simuladas y es una de estas tres temperaturas 90°C, 100°C ó 110°C. La temperatura de envejecimiento PAV es 100°C para PG 64 y grados superiores, excepto para climas desérticos donde es 110°C.

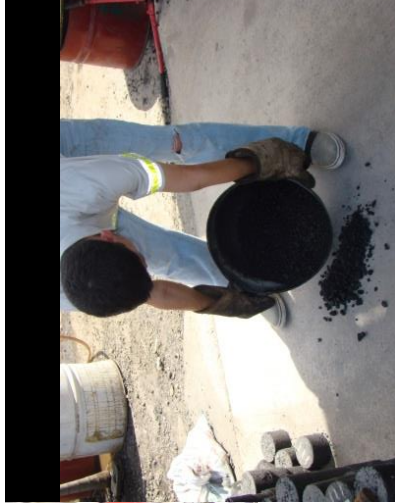
⁴⁾ Si la dureza a la deformación gradual es menor que 300 MPa, no se requiere la prueba de tensión directa. Si la dureza a la deformación está entre 300 y 600 MPa el requerimiento de falla de deformación de la tensión directa se puede utilizar en lugar del requerimiento del esfuerzo a la fluencia. El requerimiento del valor m se debe satisfacer en ambos casos.

i. Ensayo de efectos de la humedad en mezclas de pavimentación de concreto asfáltico TSR (ASTM D4867). Este ensayo permite medir el potencial de daño por humedad que puede ocurrir en una mezcla asfáltica y la susceptibilidad a la falla que esta posee. Además, permite analizar el efecto de la incorporación de aditivos y la dosis óptima para maximizar sus efectos. La metodología es aplicable a briquetas Marshall con gradación densa según especificación ASTM D 3515 fabricadas en condiciones de laboratorio. Para realizar el ensayo es necesaria la fabricación de por lo menos 6 especímenes, 3 para ser ensayados en seco y 3 para ensayarse luego de saturarse parcialmente y acondicionarse húmedamente. Los especímenes se compactan a un porcentaje de vacíos entre el 6-8% dividiendo las muestras en los dos grupos anteriormente mencionados usando como criterio de discriminación las probetas con más o menos el mismo contenido de aire. El procedimiento de ensayo una vez se ha determinado la energía de compactación necesaria para obtener vacíos entre 5-8% en las 6 briquetas consiste en determinar la gravedad específica bulk y gravedad específica teórica máxima de las briquetas en concordancia con ASTM D2726 y D2041. Se mide la altura de cada espécimen como se indica en ASTM D 3549 y se calcula el porcentaje de vacíos separando en dos grupos de 3 briquetas de tal manera que el porcentaje promedio de vacíos de cada grupo sea similar. El grupo de especímenes a condicionarse en humedad se sumerge y satura de agua por 5 minutos en una cámara a presión de 525 mm Hg para luego determinar el volumen de la biqueta según el método ASTM D2527. El grado de saturación alcanzado de cada biqueta debe encontrarse entre 55-80%, por lo tanto si el grado de saturación es menor a 55% se debe reducir la presión de saturación y someter el espécimen de nuevo al proceso. De otro modo si la saturación es mayor al 80% se debe descartar la muestra. Luego, se acondicionan las probetas saturadas a 60 ± 1 °C por 24 h y luego acondicionarlas 1 h a 25 ± 1 °C. Se mide la altura del espécimen y su volumen para determinar el hinchamiento del espécimen en relación al volumen original. Luego se determina el grado de saturación el cual debe encontrarse superior al 80% y se ensaya en tensión diametral a 25°C para encontrar la carga máxima que soportó.

B. Fotografías de la fase de pruebas piloto y experimental del proyecto









C. Informes de laboratorio para el control de calidad de las materias primas utilizadas.

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA ASTM C 136

LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CONSTRUCTORA DISA S.A DE C.V

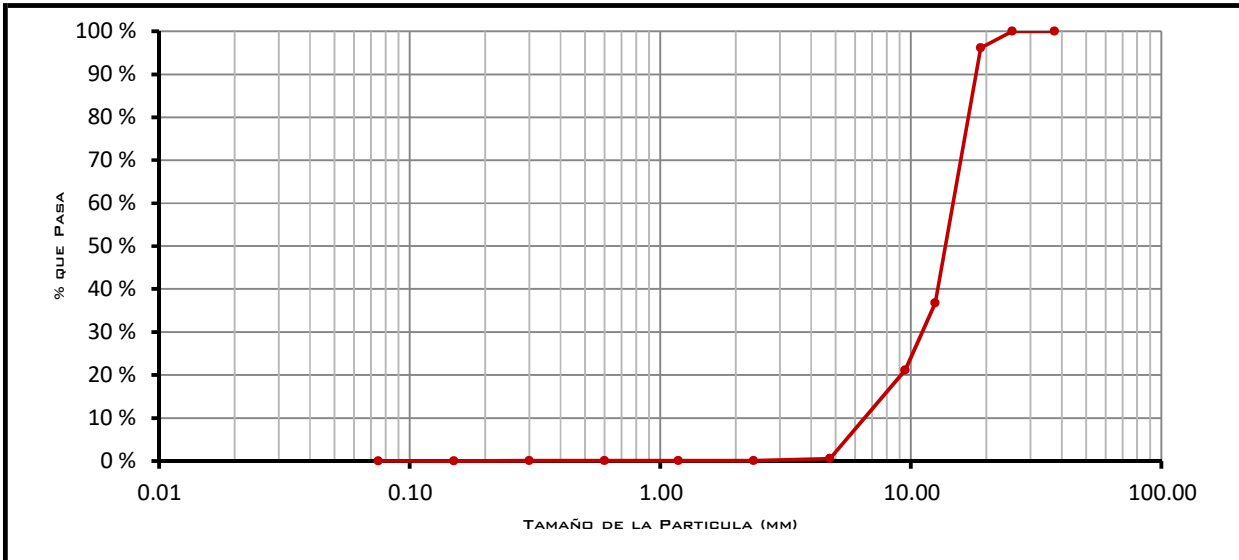
PROYECTO:	Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente
SOLICITANTE:	Planta Asfáltica Constructora DISA
PROCEDENCIA:	
DESCRIPCIÓN:	Grava Mal Graduada, Color Gris Oscuro con T.M.N 3/4"
FECHA DE ENSAYO:	29/11/2014

PESO INICIAL= 4,885.20 G	TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL =
---------------------------------	--------------------------------

MALLA		PESO RETENIDO PARCIAL	PORCENTAJE RETENIDO PARCIAL	PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO	PORCENTAJE QUE PASA	ESPECIFICACIÓN	
NOMBRE	MM					MÍNIMO	MÁXIMO
1 1/2"	37.50	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %		
1"	25.40	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %		
3/4"	19.00	189.30 g	3.87 %	3.87 %	96.13 %		
1/2"	12.50	2,898.40 g	59.33 %	63.21 %	36.79 %		
3/8"	9.50	764.40 g	15.65 %	78.85 %	21.15 %		
No. 4	4.75	1,005.20 g	20.58 %	99.43 %	0.57 %		
No. 8	2.36	23.90 g	0.49 %	99.92 %	0.08 %		
No. 16	1.18	0.60 g	0.01 %	99.93 %	0.07 %		
No. 30	0.60	1.00 g	0.02 %	99.95 %	0.05 %		
No. 50	0.30	0.50 g	0.01 %	99.96 %	0.04 %		
No. 100	0.15	0.50 g	0.01 %	99.97 %	0.03 %		
No. 200	0.075	0.50 g	0.01 %	99.98 %	0.02 %		
FONDO		0.90 g	0.02 %	100.00 %	0.00 %		

TOTALES	4,885.20 G	100.00 %			
----------------	------------	----------	--	--	--

GRAVA= 99.43 %	ARENA= 0.55 %	FINOS= 0.02 %	SUMA= 100.00 %
-----------------------	----------------------	----------------------	-----------------------



OBSERVACIONES:		
ELABORÓ: NELSON MEJIA	REVISÓ: TEC. CARMEN RAMOS	

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA ASTM C 136

LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CONSTRUCTORA DISA S.A DE C.V

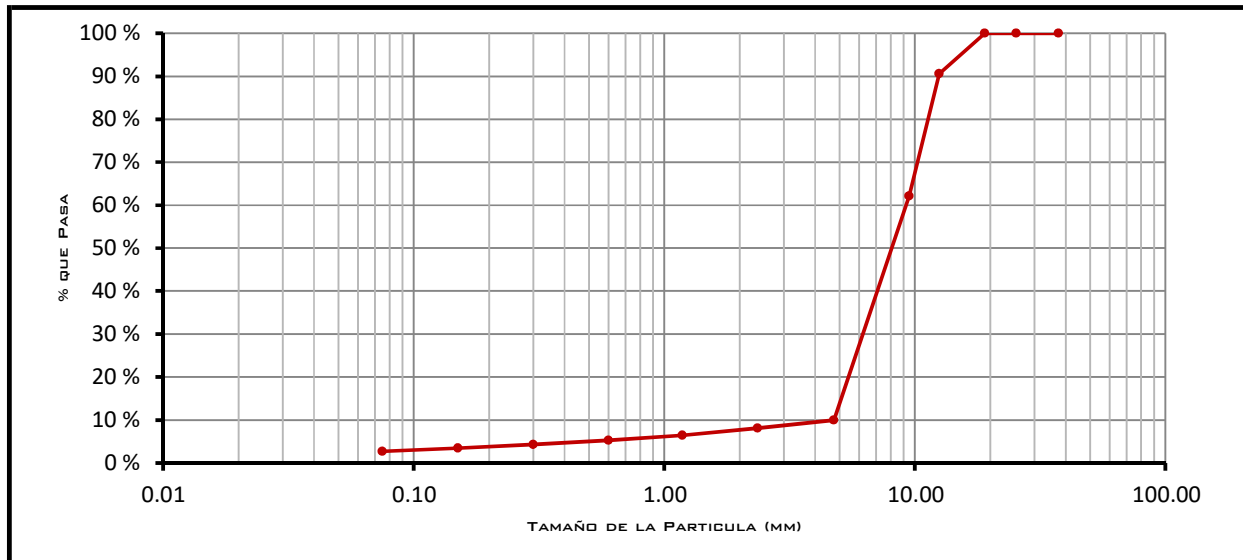
PROYECTO:	Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente
SOLICITANTE:	Planta Asfáltica Constructora DISA
PROCEDENCIA:	
DESCRIPCIÓN:	Grava Mal Graduada, Color Gris Oscuro con T.M.N 1/2"
FECHA DE ENSAYO:	29/11/2014

PESO INICIAL= 2,293.80 G	TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL =
---------------------------------	--------------------------------

MALLA		PESO RETENIDO PARCIAL	PORCENTAJE RETENIDO PARCIAL	PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO	PORCENTAJE QUE PASA	ESPECIFICACIÓN	
NOMBRE	MM					MÍNIMO	MÁXIMO
1 1/2"	37.50	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %		
1"	25.40	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %		
3/4"	19.00	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %		
1/2"	12.50	216.10 g	9.42 %	9.42 %	90.58 %		
3/8"	9.50	652.90 g	28.46 %	37.88 %	62.12 %		
No. 4	4.75	1,196.00 g	52.14 %	90.03 %	9.97 %		
No. 8	2.36	42.30 g	1.84 %	91.87 %	8.13 %		
No. 16	1.18	38.20 g	1.67 %	93.53 %	6.47 %		
No. 30	0.60	28.00 g	1.22 %	94.76 %	5.24 %		
No. 50	0.30	22.50 g	0.98 %	95.74 %	4.26 %		
No. 100	0.15	18.10 g	0.79 %	96.53 %	3.47 %		
No. 200	0.075	17.50 g	0.76 %	97.29 %	2.71 %		
FONDO		62.20 g	2.71 %	100.00 %	0.00 %		

TOTALES	2,293.80 g	100.00 %			
----------------	------------	----------	--	--	--

GRAVA= 90.03 %	ARENA= 7.26 %	FINOS= 2.71 %	SUMA= 100.00 %
-----------------------	----------------------	----------------------	-----------------------



OBSERVACIONES:		
ELABORÓ:	REVISÓ:	
NELSON MEJIA	TEC. CARMEN RAMOS	

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA ASTM C 136

LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CONSTRUCTORA DISA S.A DE

C.V

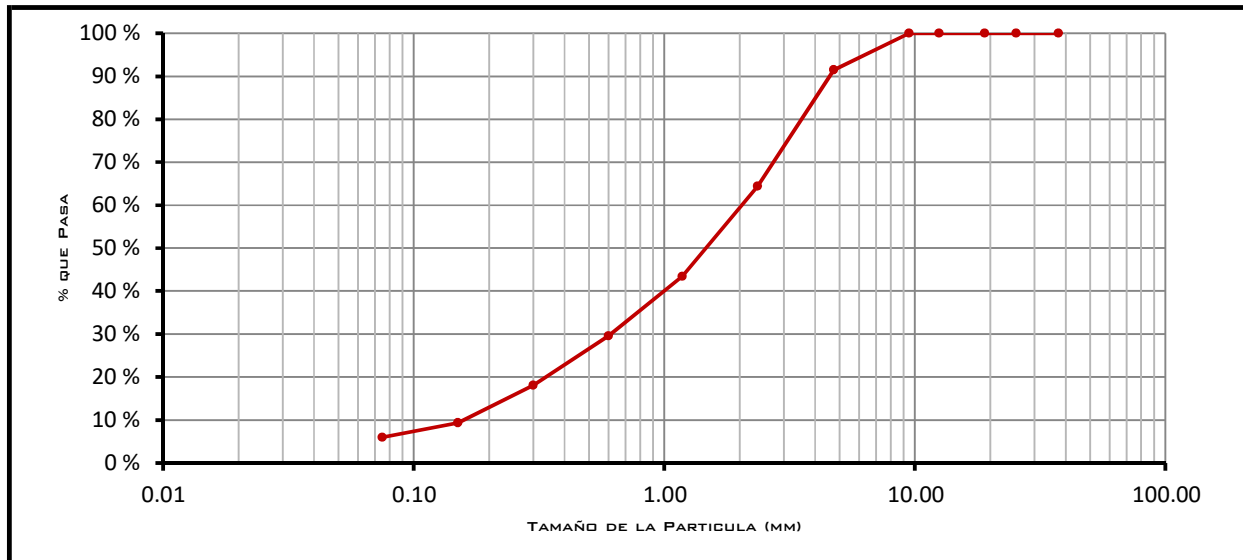
PROYECTO:	Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente
SOLICITANTE:	Planta Asfáltica Constructora DISA
PROCEDENCIA:	
DESCRIPCIÓN:	Arena Mal Graduada, Color Gris Oscuro
FECHA DE ENSAYO:	29/11/2014

PESO INICIAL= 637.70 g	TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL =
-------------------------------	--------------------------------

MALLA		PESO RETENIDO PARCIAL	PORCENTAJE RETENIDO PARCIAL	PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO	PORCENTAJE QUE PASA	ESPECIFICACIÓN	
NOMBRE	MM					MÍNIMO	MÁXIMO
1 1/2"	37.50	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %		
1"	25.40	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %		
3/4"	19.00	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %		
1/2"	12.50	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %		
3/8"	9.50	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %		
No. 4	4.75	54.30 g	8.51 %	8.51 %	91.49 %		
No. 8	2.36	172.80 g	27.10 %	35.61 %	64.39 %		
No. 16	1.18	133.60 g	20.95 %	56.56 %	43.44 %		
No. 30	0.60	88.20 g	13.83 %	70.39 %	29.61 %		
No. 50	0.30	73.60 g	11.54 %	81.94 %	18.06 %		
No. 100	0.15	55.80 g	8.75 %	90.69 %	9.31 %		
No. 200	0.075	21.30 g	3.34 %	94.03 %	5.97 %		
FONDO		38.10 g	5.97 %	100.00 %	0.00 %		

TOTALES	637.70 g	100.00 %				
----------------	----------	----------	--	--	--	--

GRAVA= 8.51 %	ARENA= 85.51 %	FINOS= 5.97 %	SUMA= 100.00 %
----------------------	-----------------------	----------------------	-----------------------



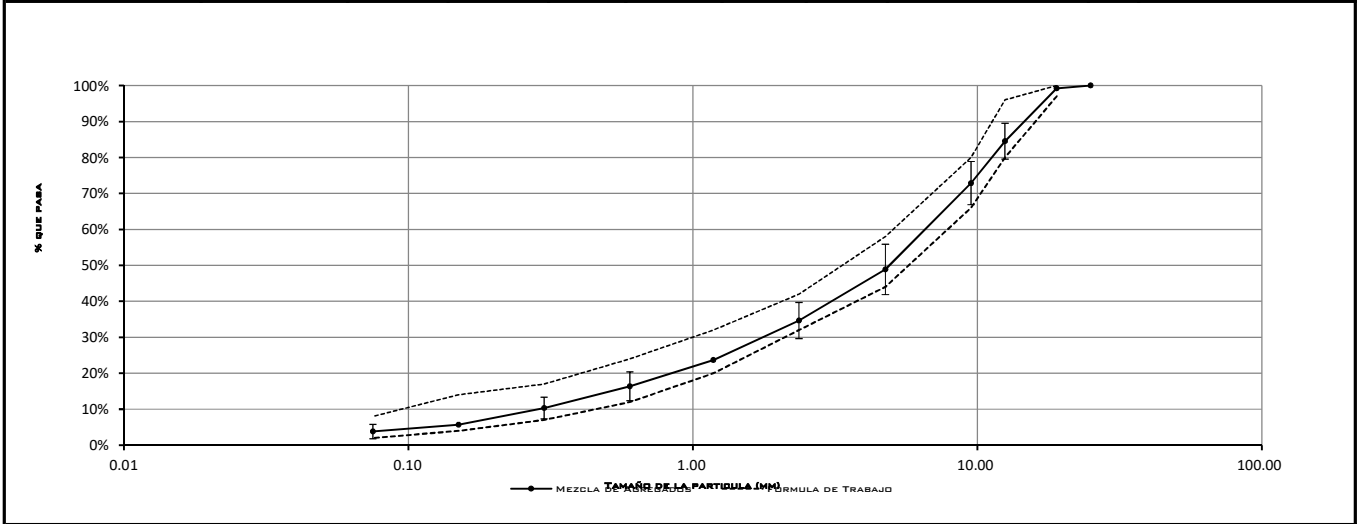
OBSERVACIONES:		
ELABORÓ:	REVISÓ:	
NELSON MEJIA	TEC. CARMEN RAMOS	

CONSTRUCTORA DIBA S.A. DE C.V. PLANTA ASFÁLTICA	MEZCLA DE AGREGADOS PÉTREOS PARA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE	FECHA: MEZCLA:	4/12/2014
--	--	-------------------	-----------

LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD PLANTA ASFÁLTICA DIBA S.A. DE C.V.

NO.	NOMBRE	G.E. BULK	PORCENTAJE	PROCEDENCIA
1	GRAVA 3/4"	2.563	20.00 %	LA CANTERA SAN DIEGO LA LIBERTAD
2	GRAVA 1/2"	2.570	30.00 %	LA CANTERA SAN DIEGO LA LIBERTAD
3	ARENA TRITURADA	2.522	50.00 %	LA CANTERA SAN DIEGO LA LIBERTAD
4	CAL HIDRATADA	2.522	VARÍA*	CEMENTOS PROGRESO, PLANTA SAN MIGUEL, SANARATE, GUATEMALA

MEZCLA DE AGREGADOS PÉTREOS													
MALLA		GRAVA 3/4"	GRAVA 1/2"	ARENA	CAL	MEZCLA DE AGREGADOS	MEZCLA CON 1 % CAL	MEZCLA CON 2 % CAL	SIECA 703-B GRADUACIÓN B		TOL.	FORMULA DE TRABAJO	
NOMBRE	MM	20.00 %	30.00 %	50.00 %	0.00%	100.00 %	100.00 %	100.00 %	MÍN.	MÁX.		MÍN.	MÁX.
1"	25.00	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0					
3/4"	19.00	96.1	100.0	100.0	100.0	99.2	99.2	99.2	97	100		97	100
1/2"	12.50	36.8	90.6	100.0	100.0	84.5	84.7	84.8	80	96	±5	80	96
3/8"	9.50	21.1	62.1	100.0	100.0	72.9	73.1	73.4	66	80	±6	66	80
Nd. 4	4.75	0.6	10.0	91.5	100.0	48.8	49.4	49.9	44	58	±7	44	58
Nd. 8	2.36	0.1	8.1	64.4	100.0	34.6	35.3	36.0	33	42	±5	32	42
Nd. 16	1.18	0.1	6.5	43.4	100.0	23.7	24.4	25.2	20	32		20	32
Nd. 30	0.60	0.0	5.2	29.6	99.8	16.4	17.2	18.1	12	24	±4	12	24
Nd. 50	0.30	0.0	4.3	18.1	99.8	10.3	11.2	12.1	7	17	±3	7	17
Nd. 100	0.15	0.0	3.5	9.3	99.8	5.7	6.6	7.6	4	14		4	14
Nd. 200	0.075	0.0	2.7	6.0	99.4	3.8	4.8	5.7	2	8	±2	2	8



**ENSAYO DE EQUIVALENTE DE ARENA
ASTM D 2419**

**LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CONSTRUCTORA DISA S.A DE
C.V**

PROYECTO:	DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE
SOLICITANTE:	PLANTA ASFÁLTICA CONSTRUCTORA DISA
PROCEDENCIA:	ACOPIO QUEZALTEPEQUE RAP
DESCRIPCIÓN:	ARENA LIMOSA GRIS OSCURO (SP-SM)
FECHA DE ENSAYO:	27/11/2014

MUESTRA N°	ALTURA DEL SEDIMENTO (H)	ALTURA DE ARENA DESPUES DE INTRODUCIR EN PISTON (H)	EQUIVALENTE DE ARENA
1	3.5	4.5	77.8%
2	3.6	4.6	78.3%
		PROMEDIO	78.0%

OBSERVACIONES:		
ELABORÓ:	REVISÓ:	
HENRY ADALID PEREZ	TEC. CARMEN RAMOS	

**DETERMINACIÓN DE LOS PESOS VOLUMETRICOS Y VACIOS EN EL AGREGADOS
ASTM C29**

LABORATORIO CONTROL DE CALIDAD PLANTA ASFALTICA DISA S.A DE C.V

PROYECTO:	DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE
SOLICITANTE:	PLANTA ASFÁLTICA CONSTRUCTORA DISA
PROCEDENCIA:	La Cantera San Diego La Libertad
DESCRIPCIÓN:	Arena Mal Graduada, Color Gris Oscuro
FECHA DE ENSAYO:	17/11/2014

ALTURA 0.154 M	DIAMETRO 0.151 M	PESO MOLDE 1646.7 GRS.	VOLUMEN 0.0027478 M3
----------------	------------------	------------------------	----------------------

PESO VOLUMETRICO SUELTO

PESO DE LA MUESTRA + MOLDE	PESO DEL MOLDE	PESO NETO	VOLUMEN	PESO VOLUMETRICO
6231.50 GRS	1646.70 GRS	4584.80 GRS	2757.80 M3	1.662
6169.10 GRS	1646.70 GRS	4522.40 GRS	2757.80 M3	1.640
6280.00 GRS	1646.70 GRS	4633.30 GRS	2757.80 M3	1.680
6200.70 GRS	1646.70 GRS	4554.00 GRS	2757.80 M3	1.651
			PROMEDIO	1.658

PESO VOLUMETRICO VARRILLADO

PESO DE LA MUESTRA + MOLDE	PESO DEL MOLDE	PESO NETO	VOLUMEN	PESO VOLUMETRICO
6731.60 GRS	1646.70 GRS	5084.90 GRS	2757.80 M3	1.844
6669.90 GRS	1646.70 GRS	5023.20 GRS	2757.80 M3	1.821
6621.00 GRS	1646.70 GRS	4974.30 GRS	2757.80 M3	1.804
6678.50 GRS	1646.70 GRS	5031.80 GRS	2757.80 M3	1.825
			PROMEDIO	1.823

OBSERVACIONES: _____

ELABORÓ:		REVISÓ:
NELSÓN MEJÍA		TEC.CARMEN RAMOS

**DETERMINACIÓN DE LOS PESOS VOLUMETRICOS Y VACIOS EN EL AGREGADOS
ASTM C29**

LABORATORIO CONTROL DE CALIDAD PLANTA ASFALTICA DISA S.A DE C.V

PROYECTO:	DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE
SOLICITANTE:	PLANTA ASFÁLTICA CONSTRUCTORA DISA
PROCEDENCIA:	La Cantera, San Diego La Libertad
DESCRIPCIÓN:	Grava Mal Graduada, Color Gris Oscuro con T.M.N.= 1/2"
FECHA DE ENSAYO:	28/11/2014

ALTURA 0.154 M	DIAMETRO 0.151 M	PESO MOLDE 1646.7 GRS.	VOLUMEN 0.0027478 M
----------------	------------------	------------------------	---------------------

PESO VOLUMETRICO SUELTO

PESO DE LA MUESTRA + MOLDE	PESO DEL MOLDE	PESO NETO	VOLUMEN	PESO VOLUMETRICO
5533.70 GRS	1646.70 GRS	3887.00 GRS	2757.80 M3	1.409
5515.20 GRS	1646.70 GRS	3868.50 GRS	2757.80 M3	1.403
5585.90 GRS	1646.70 GRS	3939.20 GRS	2757.80 M3	1.428
5571.60 GRS	1646.70 GRS	3924.90 GRS	2757.80 M3	1.423
			PROMEDIO	1.416

PESO VOLUMETRICO VARRILLADO

PESO DE LA MUESTRA + MOLDE	PESO DEL MOLDE	PESO NETO	VOLUMEN	PESO VOLUMETRICO
5845.00 GRS	1646.70 GRS	4198.30 GRS	2757.80 M3	1.522
5851.00 GRS	1646.70 GRS	4204.30 GRS	2757.80 M3	1.525
5852.00 GRS	1646.70 GRS	4205.30 GRS	2757.80 M3	1.525
5858.30 GRS	1646.70 GRS	4211.60 GRS	2757.80 M3	1.527
			PROMEDIO	1.525

OBSERVACIONES: _____

ELABORÓ:		REVISÓ:
HENRY ADALID PEREZ		TEC. CARMEN RAMOS

**DETERMINACIÓN DE LOS PESOS VOLUMETRICOS Y VACIOS EN EL AGREGADOS
ASTM C29**

LABORATORIO CONTROL DE CALIDAD PLANTA ASFALTICA DISA S.A DE C.V

PROYECTO:	DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE
SOLICITANTE:	PLANTA ASFÁLTICA CONSTRUCTORA DISA
PROCEDENCIA:	LA CANTERA SAN DIEGO LA LIBERTAD
DESCRIPCIÓN:	GRAVA MAL GRADUADA, COLOR GRIS OSCURO CON T.M.N.= 3/4"
FECHA DE ENSAYO:	25/11/2014

ALTURA 0.275 M	DIAMETRO 0.256 M	PESO MOLDE 6187 GRS.	VOLUMEN 0.014044 M ³
----------------	------------------	----------------------	---------------------------------

PESO VOLUMETRICO SUELTO

PESO DE LA MUESTRA + MOLDE	PESO DEL MOLDE	PESO NETO	VOLUMEN	PESO VOLUMETRICO
5422.00 GRS	1646.70 GRS	3775.30 GRS	2757.80 M3	1.369
5429.00 GRS	1646.70 GRS	3782.30 GRS	2757.80 M3	1.371
5313.00 GRS	1646.70 GRS	3666.30 GRS	2757.80 M3	1.329
5413.00 GRS	1646.70 GRS	3766.30 GRS	2757.80 M3	1.366
			PROMEDIO	1.359

PESO VOLUMETRICO VARRILLADO

PESO DE LA MUESTRA + MOLDE	PESO DEL MOLDE	PESO NETO	VOLUMEN	PESO VOLUMETRICO
5790.40 GRS	1646.70 GRS	4143.70 GRS	2757.80 M3	1.503
5765.00 GRS	1646.70 GRS	4118.30 GRS	2757.80 M3	1.493
5899.00 GRS	1646.70 GRS	4252.30 GRS	2757.80 M3	1.542
5826.20 GRS	1646.70 GRS	4179.50 GRS	2757.80 M3	1.516
			PROMEDIO	1.513

OBSERVACIONES: _____

ELABORÓ:		REVISÓ:
NELSON MEJÍA		TEC. CARMEN RAMOS

**DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO
Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO
ASTM C 127 / AASTHO T 85**

LABORATORIO CONTROL DE CALIDAD PLANTA ASFALTICA DISA S.A DE C.V

PROYECTO:	DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE
SOLICITANTE:	PLANTA ASFÁLTICA CONSTRUCTORA DISA
PROCEDENCIA:	LA CANTERA, SAN DIEGO LA LIBERTAD
DESCRIPCIÓN:	GRAVA MAL GRADUADA, COLOR GRIS OSCURO CON T.M.N.= 1/2"
FECHA DE ENSAYO:	15/11/2014

MUESTRA NO.		1	2	3
PESO MUESTRA SECA (G)	A	2,086.67 G	2,083.98 G	2,088.83 G
PESO DE MATERIAL S.S.S. (G)	B	2,113.35 G	2,112.29 G	2,115.98 G
PESO DEL MATERIAL SUMERGIDO (G)	C	1,301.50 G	1,301.40 G	1,303.02 G

PESO ESPECÍFICO SECO	A / (B - C)	2.570	2.570	2.569
PESO ESPECÍFICO SECO PROMEDIO		2.570		

PESO ESPECÍFICO S.S.S.	B / (B - C)	2.603	2.605	2.603
PESO ESPECÍFICO S.S.S. PROMEDIO		2.603		

PESO ESPECÍFICO APARENTE	A / (A - C)	2.658	2.663	2.658
PESO ESPECÍFICO APARENTE PROMEDIO		2.660		

PORCENTAJE DE ABSORCIÓN	(B - A) / A	1.279 %	1.358 %	1.300 %
PORCENTAJE DE ABSORCIÓN PROMEDIO		1.312 %		

OBSERVACIONES:		
ELABORÓ:	REVISÓ:	
HENRY ADALID PERÉZ	TEC. CARMEN RAMOS	

**DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO
Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO
ASTM C 127 / AASTHO T 85**

LABORATORIO CONTROL DE CALIDAD PLANTA ASFALTICA DISA S.A DE C.V

PROYECTO:	DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE
SOLICITANTE:	PLANTA ASFÁLTICA CONSTRUCTORA DISA
PROCEDENCIA:	LA CANTERA, SAN DIEGO LA LIBERTAD
DESCRIPCIÓN:	GRAVA MAL GRADUADA, COLOR GRIS OSCURO CON T.M.N.= 3/4"
FECHA DE ENSAYO:	4/12/2014

MUESTRA NO.		1	2	3
PESO MUESTRA SECA (G)	A	2,438.10 G	2,435.40 G	2,435.20 G
PESO DE MATERIAL S.S.S. (G)	B	2,453.10 G	2,453.00 G	2,453.30 G
PESO DEL MATERIAL SUMERGIDO (G)	C	1,502.80 G	1,502.20 G	1,502.60 G

PESO ESPECÍFICO SECO	A / (B - C)	2.566	2.561	2.561
PESO ESPECÍFICO SECO PROMEDIO		2.563		

PESO ESPECÍFICO S.S.S.	B / (B - C)	2.581	2.580	2.581
PESO ESPECÍFICO S.S.S. PROMEDIO		2.581		

PESO ESPECÍFICO APARENTE	A / (A - C)	2.607	2.610	2.611
PESO ESPECÍFICO APARENTE PROMEDIO		2.609		

PORCENTAJE DE ABSORCIÓN	(B - A) / A	0.615 %	0.723 %	0.743 %
PORCENTAJE DE ABSORCIÓN PROMEDIO		0.694 %		

OBSERVACIONES:		
ELABORÓ:	REVISÓ:	
HENRY ADALID PERÉZ	TEC. CARMEN RAMOS	

**DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO
Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO
ASTM C 128**

LABORATORIO CONTROL DE CALIDAD PLANTA ASFÁLTICA DISA S.A DE C.V

PROYECTO:	DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE
SOLICITANTE:	PLANTA ASFÁLTICA CONSTRUCTORA DISA
PROCEDENCIA:	LA CANTERA, SAN DIEGO, LA LIBERTAD
DESCRIPCIÓN:	Arena Mal Graduada, Color Gris Oscuro
FECHA DE ENSAYO:	4/12/2014

MUESTRA NO.		1	2	3
PESO DE MATERIAL S.S.S. (G)	W	500.30 G	500.40 G	500.20 G
PESO SECO (G)	A	492.80 G	492.20 G	493.20 G
PESO DE PICNÓMETRO + AGUA (G)	B	1,451.00 G	1,450.50 G	1,451.30 G
PESO DE PICNÓMETRO + AGUA + MATERIAL	C	1,757.10 G	1,757.20 G	1,757.50 G

PESO ESPECÍFICO S.S.S.	$W / (B + W - C)$	2.576	2.583	2.578
PESO ESPECÍFICO SSS PROMEDIO		2.579		

PESO ESPECÍFICO SECO	$A / (B + W - C)$	2.538	2.541	2.542
PESO ESPECÍFICO SECO PROMEDIO		2.540		

PESO ESPECÍFICO APARENTE	$A / (B + A - C)$	2.640	2.653	2.637
PESO ESPECÍFICO APARENTE PROMEDIO		2.643		

PORCENTAJE DE ABSORCIÓN	$(W - A) / A$	1.522 %	1.666 %	1.419 %
PORCENTAJE DE ABSORCIÓN PROMEDIO		1.536%		

OBSERVACIONES:		
ELABORÓ:	REVISÓ:	
HENRY ADALID PERÉZ	TEC. CARMEN RAMOS	

**GRUMOS DE ARCILLA Y PARTICULAS DESMENUZABLES
ASTM C 142**

**LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CONSTRUCTORA DISA
S.A DE C.V**

PROYECTO: Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente

SOLICITANTE: Planta Asfáltica Constructora DISA

PROCEDENCIA: LA CANTERA, SAN DIEGO, LA LIBERTAD

DESCRIPCIÓN: ARENA MAL GRADUADA, COLOR GRIS OSCURO

FECHA DE ENSAYO: 2/12/2014

PESO INICIAL = _____ **TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL =** N° 4

TAMAÑO DE PARTICULAS	% RETENIDO	PESO DE LA MUESTRA ANTES DE ENSAYO (GR)	PESO DE LA MUESTRA DESPUES DE ENSAYO (GR)	PERDIDA DE MATERIAL	% DE GRUMOS
MAYOR DE 1-1/2"	0				
1-1/2" - 3/4"	0				
3/4" - 3/8"					
3/8" - N°4	8.5				
N°16	48.1	100	98	2.00%	0.96%
MENORES A LA N°16	60.4		% DE GRUMOS EN LA MUESTRA TOTAL		0.96%

OBSERVACIONES: _____

ELABORÓ:	REVISÓ:
HENRY ADALID PEREZ	TEC. CARMEN RAMOS

**GRUMOS DE ARCILLA Y PARTICULAS DESMENUZABLES
ASTM C 142**

**LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CONSTRUCTORA DISA
S.A DE C.V**

PROYECTO: Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente

SOLICITANTE: Planta Asfáltica Constructora DISA

PROCEDENCIA: LA CANTERA, SAN DIEGO, LA LIBERTAD

DESCRIPCIÓN: GRAVA MAL GRADUADA, COLOR GRIS OSCURO CON T.M.N 3/4"

FECHA DE ENSAYO: 2/12/2014

PESO INICIAL = _____ **TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL =** 3/4"

TAMAÑO DE PARTICULAS	% RETENIDO	PESO DE LA MUESTRA ANTES DE ENSAYO (GR)	PESO DE LA MUESTRA DESPUES DE ENSAYO (GR)	PERDIDA DE MATERIAL	% DE GRUMOS
MAYOR DE 1-1/2"	0				
1-1/2" - 3/4"	0				
3/4" - 3/8"	78.9	1000	995	0.50%	0.39%
3/8" - N°4	20.6	2000	1998	0.10%	0.02%
N°16	0.5				
MENORES A LA N°16	0.0		% DE GRUMOS EN LA MUESTRA TOTAL		0.42%

OBSERVACIONES: _____

ELABORÓ:	REVISÓ:
HENRY ADALID PEREZ	TEC. CARMEN RAMOS

**GRUMOS DE ARCILLA Y PARTICULAS DESMENUZABLES
ASTM C 142**

**LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CONSTRUCTORA DISA
S.A DE C.V**

PROYECTO: Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente

SOLICITANTE: Planta Asfáltica Constructora DISA

PROCEDENCIA: LA CANTERA, SAN DIEGO, LA LIBERTAD

DESCRIPCIÓN: GRAVA MAL GRADUADA, COLOR GRIS OSCURO CON T.M.N 1/2"

FECHA DE ENSAYO: 2/12/2014

PESO INICIAL= _____ **TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL =** 1/2"

TAMAÑO DE PARTICULAS	% RETENIDO	PESO DE LA MUESTRA ANTES DE ENSAYO (GR)	PESO DE LA MUESTRA DESPUES DE ENSAYO (GR)	PERDIDA DE MATERIAL	% DE GRUMOS
MAYOR DE 1-1/2"	0				
1-1/2" - 3/4"	0				
3/4" - 3/8"	38	1000	994	0.60%	0.23%
3/8" - N°4	52.1	2000	1995	0.25%	0.13%
N°16	3.4				
MENORES A LA N°16	6.5		% DE GRUMOS EN LA MUESTRA TOTAL		0.36%

OBSERVACIONES: _____

ELABORÓ:	REVISÓ:
HENRY ADALID PEREZ	TEC. CARMEN RAMOS

**ENSAYO DE PARTÍCULAS DE PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS
ASTM D 4791**

LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CONSTRUCTORA DISA S.A DE C.V

PROYECTO:	Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente
SOLICITANTE:	Planta Asfáltica Constructora DISA
PROCEDENCIA:	Cantera Hacienda Las Palmeras DISA
DESCRIPCIÓN:	Grava Mal Graduada, Color Gris Oscuro con T.M.N.= 1/2" RELACION 1-3
FECHA DE ENSAYO:	4/12/2014

PESO INICIAL= 1,685.00 g

TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL =

MALLA		% RETENIDO PARCIAL	CANTIDAD DE MUESTRA ENSAYADA	FRACCION DE PARTICULAS PLANAS	% PARTICULAS PLANAS	FRACCION DE PARTICULAS ALARGADAS	% PARTICULAS ALARGADAS	FRACCION DE PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS	% DE PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS
NOMBRE	MM								
1 1/2"	37.50								
1"	25.40								
3/4"	19.00	0.00 %							
1/2"	12.50	9.40 %	125.20	2.40	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00
3/8"	9.50	28.50 %	300.20	12.50	1.19	0.00	0.00	0.00	0.00
No. 4	4.75	52.10 %							
No. 8	2.36	1.80 %							
No. 16	1.18	1.70 %							
No. 30	0.60	1.20 %							
No. 50	0.30	1.00 %							
No. 100	0.15	0.80 %							
No. 200	0.075	0.80 %							
FONDO		2.70 %							
TOTAL		100.00 %		15	1.37 %	0	0.00 %	0	0.00 %

GRAVA=	47.90 %	ARENA=	51.30 %	FINOS=	0.80 %	SUMA=	100.00 %
---------------	---------	---------------	---------	---------------	--------	--------------	----------

RESUMEN

Peso original de la muestra total a ensayarse

% Particulas planas	1.37 %
% Particulas Alargadas =	0.00 %
% Particulas planas y alargadas =	0.00 %
% Particulas NO planas NI alargadas =	98.63 %

OBSERVACIONES: _____

ELABORÓ:	REVISADO POR:	REVISÓ:
HENRY ADALID PEREZ	TEC. CARMEN RAMOS	

**ENSAYO DE PARTÍCULAS DE PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS
ASTM D 4791**

LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CONSTRUCTORA DISA S.A DE C.V

PROYECTO:	Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente
SOLICITANTE:	Planta Asfáltica Constructora DISA
PROCEDENCIA:	Cantera Hacienda Las Palmeras DISA
DESCRIPCIÓN:	Grava Mal Graduada, Color Gris Oscuro con T.M.N.= 3/4" RELACION 1-3
FECHA DE ENSAYO:	4/12/2014

PESO INICIAL= 1,685.00 g

TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL = 3/4"

MALLA		% RETENIDO PARCIAL	CANTIDAD DE MUESTRA ENSAYADA	FRACCION DE PARTICULAS PLANAS	% PARTICULAS PLANAS	FRACCION DE PARTICULAS ALARGADAS	% PARTICULAS ALARGADAS	FRACCION DE PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS	% DE PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS
NOMBRE	MM								
1 1/2"	37.50								
1"	25.40								
3/4"	19.00	3.90 %							
1/2"	12.50	59.30 %	150.12	4.40	1.74	0.00	0.00	0.00	0.00
3/8"	9.50	15.70 %	355.60	22.50	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00
No. 4	4.75	20.60 %							
No. 8	2.36	0.50 %							
No. 16	1.18	0.00 %							
No. 30	0.60	0.00 %							
No. 50	0.30	0.00 %							
No. 100	0.15	0.00 %							
No. 200	0.075	0.00 %							
FONDO		0.00 %							
TOTAL		100.00 %		27	2.73 %	0	0.00 %	0	0.00 %

GRAVA= 79.40 % ARENA= 20.60 % FINOS= 0.00 % SUMA= 100.00 %

RESUMEN

Peso original de la muestra total a ensayarse

% Particulas planas	2.73 %
% Particulas Alargadas =	0.00 %
% Particulas planas y alargadas =	0.00 %
% Particulas NO planas NI alargadas =	97.27 %

OBSERVACIONES: _____

ELABORÓ:	REVISADO POR:	REVISÓ:
HENRY ADALID PEREZ	TEC. CARMEN RAMOS	

**ENSAYO DE PARTÍCULAS DE
CARAS FRACTURADAS
ASTM D 5821**

LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD DE CONSTRUCTORA DISA S.A DE C.V

PROYECTO:	DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE
SOLICITANTE:	PLANTA ASFÁLTICA CONSTRUCTORA DISA
PROCEDENCIA:	LA CANTERA SAN DIEGO LA LIBERTAD
DESCRIPCIÓN:	GRAVA MAL GRADUADA, COLOR GRIS OSCURO CON T.M.N.= 3/4"
FECHA DE ENSAYO:	2/12/2014

MALLA		PESO RETENIDO SEGÚN GRANULOMETRÍA	CANTIDAD DE PARTICULAS RETENIDAS (GR)	CANTIDAD DE PARTICULAS FRACTURADAS POR FRACCIÓN (GR)	CANTIDAD DE PARTICULAS NO FRACTURADAS POR FRACCIÓN (GR)	% PARTICULAS FRACTURADAS EN LA FRACCIÓN (P)	DUDOSA	CANTIDAD DE PARTICULAS FRACTURAS EN MUESTRA TOTAL (FT)
TAMAÑO DEL AGREGADO								
1"	3/4"	0.00	-					
3/4"	1/2"	3087.70	3,087.70	3087.70	0.00	100.00	-	3087.70
1/2"	3/8"	764.40	764.40	764.40	0.00	100.0	-	764.40
3/8"	No. 4	1005.20	1,005.20	1005.20	0.00	100.0	-	1005.20
No. 4	No. 8	23.90	23.90	23.90	0.00	100.0		23.90
FONDO		3.80						
TOTALES		4,885.0	4,881.2	4,881.2	0.00			4,881.20

CONSIDERACIONES DE ENSAYO

- 1 - PORCENTAJE DE PARTICULAS CON CARAS FRACTURADAS PFT = 99.9 %
- 2 - PORCENTAJE DE PARTICULAS CON CARAS NO FRACTURADAS = 0.1 %
- 3 - PORCENTAJE DE PARTICULAS CON CARAS DUDOSAS = 0.0 %
- 4 - CRITERIO PARA EL ENSAYO: DOS O MÁS CARAS FRACTURADAS

$$P = 100 * (F/(F+N))$$

$$PFT = 100 * FT / MT$$

OBSERVACIONES:		
ELABORÓ:	REVISÓ:	
HENRY ADALID PEREZ	TEC. CARMEN RAMOS	

**ENSAYO DE PARTÍCULAS DE
CARAS FRACTURADAS
ASTM D 5821**

LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD DE CONSTRUCTORA DISA S.A DE C.V

PROYECTO:	DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE
SOLICITANTE:	PLANTA ASFÁLTICA CONSTRUCTORA DISA
PROCEDENCIA:	LA CANTERA SAN DIEGO LA LIBERTAD
DESCRIPCIÓN:	GRAVA MAL GRADUADA, COLOR GRIS OSCURO CON T.M.N.= 1/2"
FECHA DE ENSAYO:	2/12/2014

MALLA		PESO RETENIDO SEGÚN GRANULOMETRÍA	CANTIDAD DE PARTICULAS RETENIDAS (GR)	CANTIDAD DE PARTICULAS FRACTURADAS POR FRACCIÓN (GR)	CANTIDAD DE PARTICULAS NO FRACTURADAS POR FRACCIÓN (GR)	% PARTICULAS FRACTURADAS EN LA FRACCIÓN (P)	DUDOSA	CANTIDAD DE PARTICULAS FRACTURAS EN MUESTRA TOTAL (FT)
TAMAÑO DEL AGREGADO								
1"	3/4"	0.00	-					
3/4"	1/2"	216.10	216.10	216.10	0.00	100.00	-	216.10
1/2"	3/8"	652.90	652.90	652.90	0.00	100.0	-	652.90
3/8"	No. 4	1196.00	1,196.00	1196.00	0.00	100.0	-	1196.00
No. 4	No. 8	42.30	42.30	42.30	0.00	100.0		42.30
FONDO		186.50						
TOTALES		2,293.8	2,107.3	2,107.3	0.00			2,107.30

CONSIDERACIONES DE ENSAYO

- 1 - PORCENTAJE DE PARTICULAS CON CARAS FRACTURADAS PFT = 91.9 %
- 2 - PORCENTAJE DE PARTICULAS CON CARAS NO FRACTURADAS = 8.1 %
- 3 - PORCENTAJE DE PARTICULAS CON CARAS DUDOSAS = 0.0 %
- 4 - CRITERIO PARA EL ENSAYO: DOS O MÁS CARAS FRACTURADAS

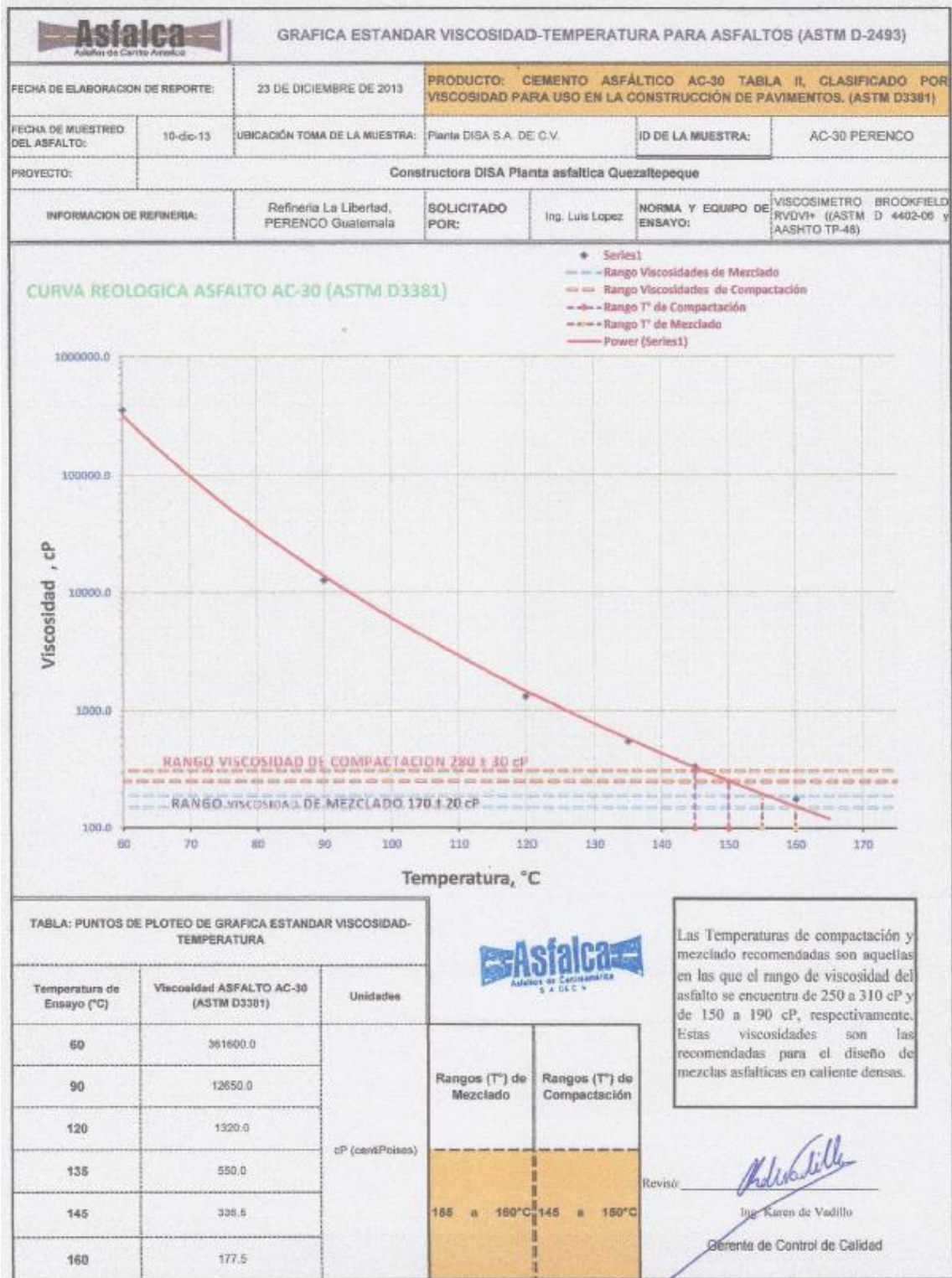
$$P = 100 * (F/(F+N))$$

$$PFT = 100 * FT / MT$$

OBSERVACIONES:		
ELABORÓ:	REVISÓ:	
HENRY ADALID PEREZ	TEC. CARMEN RAMOS	

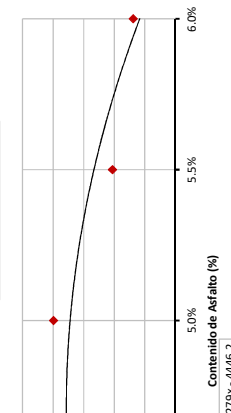
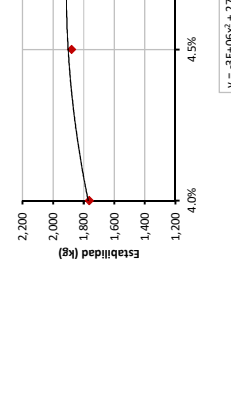
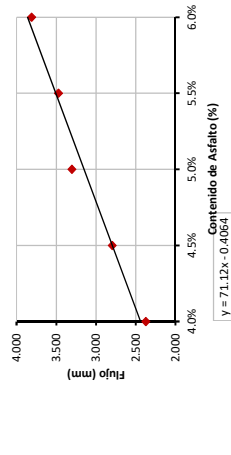
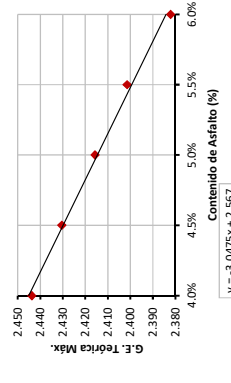
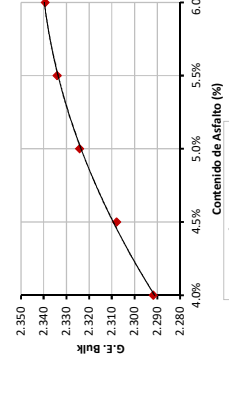
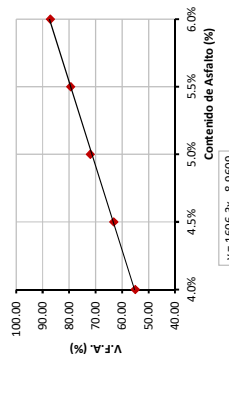
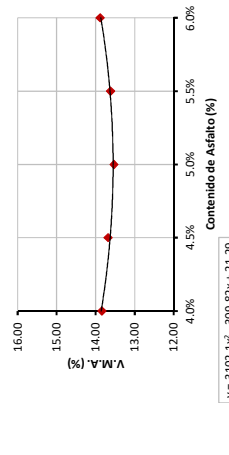
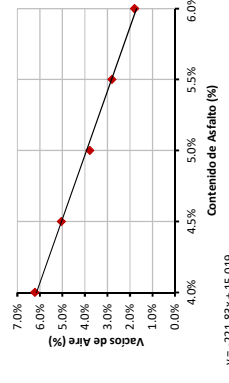
D. Reología y carta de viscosidad del cemento asfáltico.

TIPO DE ASFALTO:		AC-30		IDENTIFICACION ASFALTO:		AC-30 PERENCO	
PROYECTO:		PLANTA ASFALTICA CONSTRUCTORA DISA. QUEZALTEPEQUE		Solicitante		R. Lopez	
FECHA DE BIEN TREO:		17/02/2014		MUESTREADO POR:		R. Lopez	
FECHA DE REPORTE:		19/02/2014		ENSAYADO POR:			
ASTM D-4402-06: VISCOSIMETRO BROOKFIELD RVDVI+		Viscosidad Dinamica o Absoluta a 60° C.		Viscosidad Cinematica a 135° C.			
MUESTRA		1		1		1	
AGUJA N°		S29		S27		S29	
VELOCIDAD DE ROTACION DE LA AGUJA (rpm)		2.5		100		1.0	
RANGO DEL VISCOSIMETRO (cP)		0		400,000		0	
LECTURA DE VISCOSIDAD (centiPoises) (cP)		328,800		327,600		522.5	
PROMEDIO (centiPoises cP)		328,200		523		891,000	
VISCOSIDAD A TEMP DE ENSAYO (Pa.s)		328		523		891,500	
VISCOSIDAD A TEMP DE ENSAYO (mm ² /s)		ASTM D 38: Punto de ablandamiento		ASTM D 92: Punto de Llama		892	
ASTM D 5: Penetración a 25°C, 100 grs., 5 seg. (dmm)		1		2			
		65		50.5			
		50		PROMEDIO			
PROMEDIO		65		50.3			
ASTM D 1754: Ensayo de la película delgada al horno (TFOT) (%)							
DESCRIPCION		M1		M2		M3	
TARA (grs)		126.4489		129.3696		129.6681	
TARA + MUESTRA ANTES DEL HORNO (grs)		176.4943		179.4956		179.5368	
MUESTRA ANTES DEL HORNO (grs)		50.0454		50.1260		49.9562	
TARA + MUESTRA DESPUES DEL HORNO (grs)		176.2933		179.3002		179.3384	
DESPUES DEL HORNO - TARA (grs)		49.8444		49.9306		49.7578	
PERDIDA DE MASA (%)		-0.4016		-0.3898		-0.3971	
PROMEDIO (%)		-0.4002		-0.4121		-0.4121	
ASTM D 113: Ensayo de Ductilidad, 25°C, 5 cm/min d/TFOT							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
ASTM D 2042: Solubilidad en Tricloroetileno, (%)							
DESCRIPCION		M1		M2		M3	
TARA (grs)		126.4489		129.3696		129.6681	
TARA + MUESTRA ANTES DEL HORNO (grs)		176.4943		179.4956		179.5368	
MUESTRA ANTES DEL HORNO (grs)		50.0454		50.1260		49.9562	
TARA + MUESTRA DESPUES DEL HORNO (grs)		176.2933		179.3002		179.3384	
DESPUES DEL HORNO - TARA (grs)		49.8444		49.9306		49.7578	
PERDIDA DE MASA (%)		-0.4016		-0.3898		-0.3971	
PROMEDIO (%)		-0.4002		-0.4121		-0.4121	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
ASTM D 2042: Solubilidad en Tricloroetileno, (%)							
DESCRIPCION		M1		M2		M3	
TARA (grs)		126.4489		129.3696		129.6681	
TARA + MUESTRA ANTES DEL HORNO (grs)		176.4943		179.4956		179.5368	
MUESTRA ANTES DEL HORNO (grs)		50.0454		50.1260		49.9562	
TARA + MUESTRA DESPUES DEL HORNO (grs)		176.2933		179.3002		179.3384	
DESPUES DEL HORNO - TARA (grs)		49.8444		49.9306		49.7578	
PERDIDA DE MASA (%)		-0.4016		-0.3898		-0.3971	
PROMEDIO (%)		-0.4002		-0.4121		-0.4121	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	
		130		150		150	
PROMEDIO		143		143		143	
OBSERVACIONES:							
MUESTRA		1		2		3	



E. Libreta de tabulación de resultados para la fase de diseño bajo la metodología Marshall.

CONSTRUCTORA DISA S.A. DE C.V. PLANTA ASFALTICA		DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL SEGUN EL INSTITUTO DEL ASFALTO, MANUAL SERIES MB-2										FECHA: MEZCLA: 4/12/2014 PATRÓN 0% CAL			
LABORATORIO CONTROL DE CALIDAD PLANTA ASFALTICA DISA S.A DE C.V.															
MEZCLA TMN 3/4'															
% CEMENTO ASFALTICO N° DE PROBETA	4.0%			4.5%			5.0%			5.5%			6.0%		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
GRAVEDAD ESPECIFICA BULK	1,158.2	1,158.9	1,155.5	1,161.4	1,157.5	1,159.0	1,153.9	1,156.6	1,159.3	1,159.1	1,157.9	1,163.1	1,159.0	1,164.2	1,161.2
WAL/AIRE	1,164.4	1,166.8	1,162.1	1,165.3	1,161.3	1,165.1	1,156.7	1,158.5	1,162.0	1,164.9	1,159.6	1,164.9	1,160.9	1,165.5	1,162.3
W/BBS	661.2	658.9	658.1	662.9	660.0	661.8	660.9	660.6	662.8	663.7	664.1	665.7	665.0	667.1	667.1
W/BUNEBRIDO	503.3	507.9	504.1	502.5	501.3	503.3	495.8	497.9	499.2	496.3	495.5	499.2	495.9	498.4	495.2
V/PROBETA	2.301	2.282	2.292	2.312	2.309	2.303	2.327	2.323	2.322	2.335	2.337	2.330	2.337	2.336	2.345
DENSIDAD PROBETA	2.392														
DENSIDAD MEDIA	2.308														
LECTURA DEL ANILLO	415	402	402	440	428	430	458	460	460	365	420	330	350	342	330
FACTOR DE CORRECCION	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	0.96	1.00
ESTABILIDAD (KG)	1,802	1,745	1,745	1,912	1,859	1,868	1,991	2,000	2,000	1,583	1,824	1,430	1,517	1,482	1,430
ESTABILIDAD PROMEDIO	1,764														
LECTURA DEL ANILLO	10	9	9	11	11	11	13	13	13	14	14	13	15	15	15
FLUJO (MM)	2.54	2.29	2.29	2.79	2.79	2.79	3.30	3.30	3.30	3.56	3.56	3.30	3.81	3.81	3.81
FLUJO PROMEDIO	2.37														
ESTABILIDAD / DEFORMACION	744.1														
W/INDIAL	672.7														
W/INDIAL	2,510.20	2,538.60													
W/INDIAL	11,758.60	11,758.60													
W/INDIAL	14,268.80	14,297.20													
W/INDIAL	13,241.60	13,252.70													
W/INDIAL	1,027.20	1,044.50													
W/INDIAL	2,444														
% ASFALTO	4.0%	4.5%													
W/ASFALTO	9.167	10.386													
V/ASFALTO	8.616	9.761													
% AGREGADOS	96.0%	95.5%													
W/AGREGADO	220.011	220.404													
V/AGREGADO	86.162	86.316													
MEZCLA	94.778	96.077													
% VADIOS	6.22%	5.04%													
V.M.A.	13.838%	13.684%													
V.F.A.	55.067%	63.152%													



OBSERVACION	ÓPTIMO ASFALTO = 5.0%	LABORATORISTAS:	PABLO JOSÉ MENÉNDEZ JOSÉ NELSON MEJÍA	JEFE DE LABORATORIO:	TEC. CARMEN RAMOS	REVISÓ:	ING. LUIS LOPEZ
P.E. ASFALTO = 1.064							
P.E. AGG = 2.553							

CONSTRUCTORA DISA S.A. DE C.V. PLANTA ASFÁLTICA		CONTROL DE CALIDAD DE MEZCLA ASFÁLTICA EN GALIENTE PRODUCIDA EN PLANTA QUEZALTEPEQUE			FECHA COLOCACIÓN: 01 - dic - 2014									
PROYECTO: Investigación Cal Hidratada en asfaltos					FECHA ENSAYO:									
UBICACIÓN: Laboratorio de Planta asfáltica DISA Quezaltepeque, El Salvador					LUGAR DE MUESTREO:									
DESCRIPCIÓN: Mezcla Asfáltica en Caliente con asfalto AC-30 Tamaño Máximo Nominal 3/4" y 0% Cal hidratada					COLOCACIÓN INICIO:									
N° DE PROBETA					COLOCACIÓN FIN:									
GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK AASHTO T1166	W _{AL AIRE}	1,154.8	1,154.6	1,155.6	W _{INICIAL (G)} = 2,015.00	GRAVA (%) = 49.2 %	ARENA (%) = 45.5 %	FINO (%) = 5.3 %	φ MÁX = 3/4"					
	W _{SESS}	1,188.8	1,186.2	1,189.4	MALLA	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	FRANJA DE CONTROL					
	W _{SUPERFICIO}	660.6	658.9	662.8	NOMBRE	MM								
	V _{PROBETA}	498.2	497.3	496.6	1 1/2"	37.50	0.0	100.0	100					
	DENSIDAD PROBETA	2,318	2,322	2,327	1"	25.40	0.0	100.0	100					
	DENSIDAD MEDIA		2,322		3/4"	19.00	3.30	99.8	90					
	LECTURA DEL ANILLO	370	389	359	1/2"	12.50	256.20	12.9	87.1					
	F. CORRECCIÓN	1.04	1.09	1.04	3/8"	9.50	228.30	24.2	75.8					
	ESTABILIDAD (KG)	1,638.0	1,803.6	1,590.0	No.4	4.75	504.40	49.2	50.8					
	ESTABILIDAD (KG)		1,677		No.8	2.36	306.50	15.2	35.5					
FLUJO AASHTO T245	LECTURA DEL ANILLO	12	10	11	No.16	1.18	221.30	11.0	24.6					
	FLUJO (MM)	3.05	2.54	2.79	No.30	0.60	142.30	7.1	17.5					
	FLUJO (MM)		2.79		No.50	0.30	103.10	5.1	87.6					
	W _{INICIAL DE LA MUESTRA}		2,575.7		No.100	0.15	87.80	4.4	92.0					
	W _{PROBOMETRO + AGUA}		11,758.6		No.200	0.075	55.80	2.8	94.7					
	W _{ANTES DEL ENSAYO}		14,334.3		TOTALES		2,015.00	100.0	0.0					
	W _{DESPUES DEL ENSAYO}		13,269.7											
	W _{ANTES - W_{DESPUES}}		1,064.6											
	G.E. TEÓRICA MÁX.		2,419											
	W _{INICIAL DE LA MUESTRA}		2,152.00											
CONTENIDO DE ASFALTO ASTM D6307	PESO A MASA CONSTANTE		2,152.00											
	HUMEDAD		0.00											
	W _{PERDIDO}		137.00											
	W _{FINAL DE LA MUESTRA}		2,015.00											
	% PERDIDO		6.37%											
	FAJ		0.99%											
	FAJ COMPENSACION POR TEMPERATURA		0.14%											
	% ASFALTO		5.2 %											
	W _{ASFALTO}		12,161											
	V _{ASFALTO}		11,429											
ANÁLISIS DE VACÍOS	% AGREGADOS		94.8%											
	W _{AGREGADO}		220,082											
	V _{AGREGADO}		85,668											
	V _{MEZCLA}		97,097											
	% VACÍOS		4.009%											
	V.M.A.		14,332%											
	V.F.A.		72.031%											
	RESUMEN DE RESULTADOS													
	PARÁMETRO									RESULTADO				
	CONTENIDO DE ASFALTO (%)									5.2 %				
ESTABILIDAD MARSHALL (KG)				1,677.22 kg										
FLUJO (MM)				2,794										
GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK				2,322										
GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA				2,419										
VACÍOS DE AIRE (%)				4.0 %										
VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL (V.M.A.) (%)				14.3 %										
VACÍOS LLENADOS POR ASFALTO (V.F.A.) (%)				72.0 %										
RELACION FILLER/ASFALTO EFECTIVO				1:10										
LABORATORISTA:				Pablo Menéndez										
CONTROL DE CALIDAD:				Téc. Ricardo Méndez										

CONSTRUCTORA DISA S.A. DE C.V. PLANTA ASFÁLTICA		DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL SEGÚN EL INSTITUTO DEL ASFALTO, MANUAL SERIES MS-2										FECHA: MEZCLA:				
		LABORATORIO CONTROL DE CALIDAD PLANTA ASFÁLTICA DISA S.A DE C.V.										4/12/2014 1% GAL HIDRATADA				
% CEMENTO ASFÁLTICO		4.0%			4.5%			5.0%			5.5%			6.0%		
N° DE PROBETA		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK		1,144.8	1,149.0	1,150.2	1,160.8	1,161.1	1,160.3	1,163.2	1,160.0	1,121.7	1,161.8	1,164.6	1,163.1	1,158.0	1,161.9	1,165.7
W _{SEB}		1,152.3	1,154.4	1,155.8	1,164.1	1,164.2	1,164.1	1,164.8	1,163.7	1,123.4	1,164.9	1,165.5	1,164.9	1,159.2	1,162.4	1,166.2
W _{BULNEHEDIO}		650.7	653.7	653.6	658.9	659.3	660.1	664.4	663.6	640.9	663.7	665.4	665.7	664.9	665.6	669.0
V _{PROBETA}		501.6	500.7	502.2	505.2	504.9	504.0	500.4	500.4	482.4	498.6	500.1	499.2	494.3	496.8	497.2
DENSIDAD PROBETA		2.282	2.295	2.290	2.298	2.299	2.302	2.325	2.325	2.325	2.330	2.329	2.330	2.343	2.339	2.344
DENSIDAD MEDIA		2.289			2.300			2.323			2.330			2.342		
LECTURA DEL ANILLO		397	388	367	405	400	430	426	455	400	381	398	344	356	320	326
FACTOR DE CORRECCIÓN		1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	0.96	1.00	1.00
ESTABILIDAD (KG)		1,723	1,683	1,591	1,758	1,736	1,868	1,850	1,978	1,736	1,653	1,727	1,491	1,543	1,386	1,412
ESTABILIDAD PROMEDIO		1,666			1,797			1,855			1,624			1,447		
FLUJO DEL ANILLO		12	10	10	12	13	11	13	14	14	16	15	15	17	16	16
FLUJO (MM)		3.05	2.54	2.54	3.05	3.30	2.79	3.30	3.56	3.56	4.06	3.81	3.81	4.32	4.06	4.06
FLUJO PROMEDIO		2.71			3.05			3.47			3.89			4.15		
ESTABILIDAD / DEFORMACIÓN		614.9			586.4			534.3			416.9			348.8		
W _{INDIAL}		2,503.40			2,503.20			2,567.80			2,595.20			2,595.80		
W _{PICONOMETRÍA}		11,758.10			11,758.10			11,758.10			11,758.10			11,758.10		
W _{ANTEE DEL ENRAYO}		14,261.50			14,261.30			14,325.90			14,353.30			14,293.90		
W _{DEPUES DEL ENRAYO}		13,228.60			13,223.70			13,254.30			13,260.00			13,221.20		
W _{ANTEE - W_{DEPUES}}		1,032.90			1,037.60			1,071.60			1,093.30			1,072.70		
B.E. TEÓRICA MÁXIMA		2.424			2.412			2.396			2.374			2.364		
% ASFALTO		4.0%			4.5%			5.0%			5.5%			6.0%		
W _{ASFALTO}		9.156			10.349			11.616			12.813			14.052		
V _{ASFALTO}		8.606			9.727			10.917			12.043			13.207		
% AGREGADOS		96.0%			95.5%			95.0%			94.5%			94.0%		
W _{AGREGADO}		219.755			219.633			220.700			220.155			220.148		
V _{AGREGADO}		86.145			86.097			86.515			86.301			86.299		
MEZCLA		94.750			95.824			97.432			98.344			99.506		
% V _{VACIOS}		5.51%			4.670%			3.049%			1.856%			0.928%		
V.M.A.		13.855%			13.903%			13.485%			13.699%			13.701%		
V.F.A.		59.933%			66.410%			77.386%			86.452%			93.226%		

ANÁLISIS DE VACIOS	Y = 241.22x + 15.272	Y = 1547.5x ² - 165x + 18.033	Y = 1732.6x - 9.947	Y = -38.821x ² + 6.5947x + 2.086
Vacios de Aire (%)				
G.E. Teórica Máx.				

OBSERVACION	LABORATORISTA:	JEFE DE LABORATORIO:	REVISÓ:
P.E. ASFALTO = 1.064 P.E. AGG = 2.551	PABLO JOSÉ MENÉNDEZ JOSÉ NELSON MEJÍA	TEC. CARMEN RAMOS	ING. LUIS LOPEZ

CONSTRUCTORA DISA S.A. DE C.V. PLANTA ASFÁLTICA		CONTROL DE CALIDAD DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE PRODUCIDA EN PLANTA QUEZALTEPEQUE			FECHA COLOCACIÓN:	30-ene-2015			
PROYECTO: Investigación Cal Hidratada en asfaltos					FECHA ENSAYO:				
UBICACIÓN: Laboratorio de Planta asfáltica DISA Quezaltepeque, El Salvador					LUGAR DE MUESTREO:				
DESCRIPCIÓN: Mezcla Asfáltica en Caliente con asfalto AC30 con Tamaño Máximo Nominal 3/4" y 1% Cal hidratada					COLOCACIÓN INICIO:				
					COLOCACIÓN FIN:				
ENSAYO GRANULOMÉTRICO (ASTM D5444)									
GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK AASHTO T1166	W _{AL AIRE}	1,159.8	1,156.3	1,158.3	W _{INICIAL (G)} = 1,977.50	GRAVA (%) = 50.4 %	ARENA (%) = 45.5 %	FINO (%) = 4.1 %	φ MÁX = 3/4"
	W _{SESS}	1,163.0	1,159.1	1,160.9	MALLA	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	FRANJA DE CONTROL
ASTM D2726 AASHTO T1166	W _{SUENIDO}	659.2	659.0	659.3	NOMBRE	MM			
	V _{PROBETA}	503.8	500.1	501.6	1 1/2"	37.50	0.00	100.0 %	
ESTABILIDAD AASHTO T245	DENSIDAD PROBETA	2.302	2.312	2.309	1"	25.40	0.00	100.0 %	
	DENSIDAD MEDIA		2.308		3/4"	19.00	21.20	1.1 %	98.9 %
FLUJO AASHTO T245	LECTURA DEL ANILLO	410	405	410	1/2"	12.50	203.40	10.3 %	11.4 %
	F. CORRECCIÓN	1.04	1.04	1.04	3/8"	9.50	285.60	14.4 %	25.8 %
GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA ASTM D2041	ESTABILIDAD (KG)	1,812.3	1,790.6	1,812.3	No.4	4.75	486.80	24.6 %	50.4 %
	ESTABILIDAD (KG)		1,805		No.8	2.36	251.90	12.7 %	63.2 %
CONTENIDO DE ASFALTO DE ASTM D6307	LECTURA DEL ANILLO	13	12	13	No.16	1.18	195.40	9.9 %	73.0 %
	FLUJO (MM)	3.30	3.05	3.30	No.30	0.60	154.20	7.8 %	80.8 %
ANÁLISIS DE VACÍOS	FLUJO (MM)				No.50	0.30	136.80	6.9 %	87.8 %
	FLUJO (MM)				No.100	0.15	98.50	5.0 %	92.7 %
OBSERVACIONES:	FLUJO (MM)				No.200	0.075	62.60	3.2 %	95.9 %
					FONDO	0.00	81.10	4.1 %	100.0 %
		W _{INICIAL DE LA MUESTRA}		2,562.1	TOTALES		1,977.50	100.0 %	
		W _{PROBETAS + AGUA}		11,758.1					
		W _{ANTES DEL ENSAYO}		14,320.2					
		W _{DESPUES DEL ENSAYO}		13,250.2					
		W _{ANTES - W_{DESPUES}}		1,070.0					
		G.E. TEÓRICA MÁX.		2,394					
		W _{INICIAL DE LA MUESTRA}		2,096.00					
		PESO A MASA CONSTANTE		2,096.00					
		HUMEDAD		0.00					
		W _{PERDIDO}		118.50					
		W _{FINAL DE LA MUESTRA}		1,977.50					
		% PERDIDO		5.65%					
		FAJ		0.77%					
		FAJ COMPENSACION POR TEMPERATURA		0.14%					
		% ASFALTO		4.7 %					
		W _{ASFALTO}		10,948					
		V _{ASFALTO}		10,649					
		% AGREGADOS		95.3%					
		W _{AGREGADO}		219,838					
		V _{AGREGADO}		86,551					
		V _{MEZCLA}		97,200					
		% VACÍOS		3.618%					
		V.M.A.		13.449%					
		V.F.A.		73.102%					

RESUMEN DE RESULTADOS	
PARÁMETRO	RESULTADO
CONTENIDO DE ASFALTO (%)	4.7 %
ESTABILIDAD MARSHALL (KG)	1,805.08 kg
FLUJO (MM)	3.22
GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK	2,394
VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL (V.M.A.) (%)	3.6 %
VACÍOS LLENADOS POR ASFALTO (V.F.A.) (%)	73.1 %
RELACION FILLER/ASFALTO EFECTIVO	0.90

LABORATORISTA: CONTROL DE CALIDAD:
Pablo Menéndez Tec.Carmen Ramos

CONSTRUCTORA DISA S.A. DE C.V. PLANTA ASFÁLTICA		DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL SEGUN EL INSTITUTO DEL ASFALTO, MANUAL SERIES MS-2										FECHA: MEZCLA:													
		LABORATORIO CONTROL DE CALIDAD PLANTA ASFÁLTICA DISA S.A DE C.V.										4/12/2014 3% SAL HIDRATADA													
		MEZCLA TMN 3/4																							
% CEMENTO ASFÁLTICO		4.0%			5.0%			5.5%			6.0%														
N° DE PROBETA		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3												
GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK		1,156.9	1,156.9	1,154.3	1,161.0	1,162.6	1,160.6	1,161.4	1,160.1	1,164.5	1,160.0	1,162.9	1,158.0	1,161.9											
W _{AL,AIRE}		1,161.3	1,170.5	1,163.0	1,163.6	1,167.4	1,165.6	1,163.2	1,162.3	1,168.4	1,161.5	1,164.2	1,159.2	1,162.4											
W _{BUEBIBO}		647.1	656.2	650.9	655.4	656.7	656.5	658.2	657.7	662.5	661.0	662.3	660.0	667.1											
V _{PROBETA}		514.2	514.3	512.1	508.2	510.7	509.1	505.1	504.6	505.9	500.5	501.9	499.2	499.1											
DENSIDAD PROBETA		2.250	2.250	2.254	2.285	2.276	2.280	2.300	2.299	2.302	2.318	2.317	2.320	2.336											
DENSIDAD MEDIA		2.251																							
LECTURA DEL ANILLO		379	358	322	397	388	367	381	398	344	344	359	310	300											
FACTOR DE CORRECCIÓN		1.00	1.00	1.00	1.04	1.00	1.00	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	0.96	1.00											
ESTABILIDAD (KG)		1,644	1,552	1,395	1,723	1,688	1,591	1,658	1,727	1,491	1,491	1,556	1,521	1,298											
ESTABILIDAD PROMEDIO		1,530																							
LECTURA DEL ANILLO		8	8	10	10	11	12	13	14	12	14	12	14	15											
FLUJO (MM)		2.03	2.03	2.54	2.54	2.79	3.05	3.30	3.56	3.05	3.56	3.05	3.56	3.81											
FLUJO PROMEDIO		2.20																							
ESTABILIDAD / DEFORMACIÓN		763.8																							
W _{INDIAL}		2,573.00																							
W _{INDIOMETRÍA}		11,758.10																							
W _{ANTEE DEL ENRAYO}		14,331.10																							
W _{DEPUES DEL ENRAYO}		13,257.10																							
W _{ANTEE - W_{DEPUES}}		1,074.00																							
B.E. Teórica Máxima		2.418																							
% ASFALTO		4.0%																							
W _{ASFALTO}		9.005																							
V _{ASFALTO}		8.463																							
% AGREGADOS		96.0%																							
W _{AGREGADO}		216.120																							
V _{AGREGADO}		84.819																							
MEZCLA		93.283																							
% VACÍOS		6.905%																							
V.M.A.		15.181%																							
V.F.A.		54.512%																							
ANÁLISIS DE VACÍOS		<table border="1"> <tr><th>Contenido de Asfalto (%)</th><th>V.F.A. (%)</th></tr> <tr><td>4.0</td><td>18.037</td></tr> <tr><td>4.5</td><td>20.037</td></tr> <tr><td>5.0</td><td>22.037</td></tr> <tr><td>5.5</td><td>24.037</td></tr> <tr><td>6.0</td><td>26.037</td></tr> </table>												Contenido de Asfalto (%)	V.F.A. (%)	4.0	18.037	4.5	20.037	5.0	22.037	5.5	24.037	6.0	26.037
Contenido de Asfalto (%)	V.F.A. (%)																								
4.0	18.037																								
4.5	20.037																								
5.0	22.037																								
5.5	24.037																								
6.0	26.037																								
GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA		<table border="1"> <tr><th>Contenido de Asfalto (%)</th><th>V.M.A. (%)</th></tr> <tr><td>4.0</td><td>12.000</td></tr> <tr><td>4.5</td><td>13.000</td></tr> <tr><td>5.0</td><td>14.000</td></tr> <tr><td>5.5</td><td>15.000</td></tr> <tr><td>6.0</td><td>16.000</td></tr> </table>												Contenido de Asfalto (%)	V.M.A. (%)	4.0	12.000	4.5	13.000	5.0	14.000	5.5	15.000	6.0	16.000
Contenido de Asfalto (%)	V.M.A. (%)																								
4.0	12.000																								
4.5	13.000																								
5.0	14.000																								
5.5	15.000																								
6.0	16.000																								
ESTABILIDAD		<table border="1"> <tr><th>Contenido de Asfalto (%)</th><th>Estabilidad (kg)</th></tr> <tr><td>4.0</td><td>50.000</td></tr> <tr><td>4.5</td><td>60.000</td></tr> <tr><td>5.0</td><td>70.000</td></tr> <tr><td>5.5</td><td>80.000</td></tr> <tr><td>6.0</td><td>90.000</td></tr> </table>												Contenido de Asfalto (%)	Estabilidad (kg)	4.0	50.000	4.5	60.000	5.0	70.000	5.5	80.000	6.0	90.000
Contenido de Asfalto (%)	Estabilidad (kg)																								
4.0	50.000																								
4.5	60.000																								
5.0	70.000																								
5.5	80.000																								
6.0	90.000																								
FLUJO		<table border="1"> <tr><th>Contenido de Asfalto (%)</th><th>Flujo (mm)</th></tr> <tr><td>4.0</td><td>2.000</td></tr> <tr><td>4.5</td><td>2.500</td></tr> <tr><td>5.0</td><td>3.000</td></tr> <tr><td>5.5</td><td>3.500</td></tr> <tr><td>6.0</td><td>4.000</td></tr> </table>												Contenido de Asfalto (%)	Flujo (mm)	4.0	2.000	4.5	2.500	5.0	3.000	5.5	3.500	6.0	4.000
Contenido de Asfalto (%)	Flujo (mm)																								
4.0	2.000																								
4.5	2.500																								
5.0	3.000																								
5.5	3.500																								
6.0	4.000																								
ESTABILIDAD / DEFORMACIÓN		<table border="1"> <tr><th>Contenido de Asfalto (%)</th><th>Estabilidad Promedio (kg)</th></tr> <tr><td>4.0</td><td>1,200</td></tr> <tr><td>4.5</td><td>1,400</td></tr> <tr><td>5.0</td><td>1,600</td></tr> <tr><td>5.5</td><td>1,800</td></tr> <tr><td>6.0</td><td>2,000</td></tr> </table>												Contenido de Asfalto (%)	Estabilidad Promedio (kg)	4.0	1,200	4.5	1,400	5.0	1,600	5.5	1,800	6.0	2,000
Contenido de Asfalto (%)	Estabilidad Promedio (kg)																								
4.0	1,200																								
4.5	1,400																								
5.0	1,600																								
5.5	1,800																								
6.0	2,000																								
ANÁLISIS DE VACÍOS		<table border="1"> <tr><th>Contenido de Asfalto (%)</th><th>G.G. Teórica Máx. (%)</th></tr> <tr><td>4.0</td><td>2,350</td></tr> <tr><td>4.5</td><td>2,360</td></tr> <tr><td>5.0</td><td>2,370</td></tr> <tr><td>5.5</td><td>2,380</td></tr> <tr><td>6.0</td><td>2,390</td></tr> </table>												Contenido de Asfalto (%)	G.G. Teórica Máx. (%)	4.0	2,350	4.5	2,360	5.0	2,370	5.5	2,380	6.0	2,390
Contenido de Asfalto (%)	G.G. Teórica Máx. (%)																								
4.0	2,350																								
4.5	2,360																								
5.0	2,370																								
5.5	2,380																								
6.0	2,390																								
OBSERVACION		ÓPTIMO ASFALTO = 4.7%			LABORATORISTA: PABLO JOSÉ MENÉNDEZ JOSÉ NELSON MEJÍA			JEFE DE LABORATORIO: TEG. CARMEN RAMOS			REVISÓ: ING. LUIS LOPEZ														
P.E. ASFALTO = 1.064		P.E. AGG = 2.548																							

F. Tabulación de resultados ensayo de tensión diametral indirecta y susceptibilidad a la humedad.

**ENSAYO DE EFECTO DE LA HUMEDAD EN MEZCLAS
DE CONCRETO ASFÁLTICO PARA PAVIMENTOS ASTM D4867**

LABORATORIO CONTROL DE CALIDAD DE MEZCLA ASFALTICA CONSTRUCTORA DISA S.A DE C.V

PROYECTO:	Diseño de Mezcla asfáltica en caliente
SOLICITANTE:	Planta Asfáltica Constructora DISA
DESCRIPCION:	Mezcla Asfáltica en Caliente Con Asfalto AC 30 Con TMN 3/4' y 0% cal hidratada
FECHA DE MUESTREO:	5/12/2014
FECHA DE ENSAYO:	6/12/2014

Muestra	1	2	3	4	5	6
Diámetro mm D	101	101	101	101	101	101
Espesor mm t	62.12	62.28	61.92	63.15	63.40	63.63
Peso seco al aire A	1133.53	1133.18	1135.98	1152.92	1155.83	1158.42
Peso Saturado con Superficie Seca B	1143.4	1145.59	1144.16	1170.41	1170.9	1172.29
Peso sumergido C	639.76	640.72	642.14	658.43	656.9	656.43
Volumen (B-C) E	503.64	504.87	502.02	511.98	514	515.86
Gravedad Bulk (A/E) F	2.251	2.244	2.263	2.252	2.249	2.246
Teórica Máxima G	2.420	2.420	2.420	2.420	2.420	2.420
% Vacíos (100(G-F)/G) H	7.00	7.25	6.50	6.95	7.08	7.21
Volumen de vacíos de aire HE/100 I	35.24	36.61	32.61	35.57	36.38	37.17
Lectura	190	175	180			
Coefficiente	1.04	1.04	1.04			
Carga Kg P	844.36 Kg	777.81 Kg	800.00 Kg			
Carga N P	8283.18 N	7630.27 N	7847.96 N			

Muestras Parcialmente Saturadas 5 minutos a 525 mm Hg

Peso Saturado con Superficie Seca B'				1178.56	1178.26	1179.91
Peso sumergido C'				660.12	657.91	657.8
Volumen (B'-C') E'				518.44	520.35	522.11
Volumen Abs de Agua (B'-A) J'				25.64	22.43	21.49
% Saturación (100J'/I)				72.09	61.65	57.81
% Hinchamiento (100(E'-E)/E)				1.26	1.24	1.21

Muestras Sumergidas 24 h en Agua a 60 °C

Espesor mm t''				64.56	64.92	64.99
Peso Saturado con Superficie Seca B''				1183.49	1186.23	1188.4
Peso sumergido C''				660.14	659.91	661.51
Volumen (B''-C'') E''				523.35	526.32	526.89
Volumen Abs de Agua (B''-A) J''				30.57	30.4	29.98
% Saturación (100J''/I)				85.95	83.55	80.65
% Hinchamiento (100(E''-E)/E)				2.22	2.40	2.14
Lectura				160	160	160
Coefficiente				0.96	0.96	0.96
Carga, Kg f P''				656.49 Kg	656.49 Kg	656.49 Kg
Carga N P''				6440.21 N	6440.21 N	6440.21 N
Tensión Seca 2000 P/πtD S _{td}	840.42	772.29	798.83			
Tensión Seca Promedio		803.85				
Tensión Húmeda 2000 P''/πt''D S _{tm}				628.8205734	625.2721673	624.5957356
Tensión Húmeda Promedio					626.23	

Grado de Tensión TSR 100(S_{tm}/S_{td})

77.90

Daño por Humedad Visual	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro
Agregado con grietas o Fracturado	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro

OBSERVACIONES: SE PUDO OBSERVAR QUE LA HUMEDAD LLEGÓ HASTA EL INTERIOR DE LAS BRIQUETAS.

ELABORÓ:	REVISÓ:
PABLO JOSÉ MENÉNDEZ	TEC. CARMEN RAMOS

**ENSAYO DE EFECTO DE LA HUMEDAD EN MEZCLAS
DE CONCRETO ASFÁLTICO PARA PAVIMENTOS ASTM D4867**

LABORATORIO CONTROL DE CALIDAD DE MEZCLA ASFALTICA CONSTRUCTORA DISA S.A DE C.V

PROYECTO:	Diseño de Mezcla asfáltica en caliente
SOLICITANTE:	Planta Asfáltica Constructora DISA
DESCRIPCION:	Mezcla Asfáltica en Caliente Con Asfalto AC 30 Con TMN 3/4' con 0.5% de cal
FECHA DE MUESTREO:	17/12/2014
FECHA DE ENSAYO:	18/12/2014

Muestra	1	2	3	4	5	6
Diámetro mm D	101	101	101	101	101	101
Espesor mm t	62.11	61.76	61.82	62.06	61.54	61.70
Peso seco al aire A	1131.19	1130.61	1133.5	1128.23	1125.51	1130.53
Peso Saturado con Superficie Seca B	1141.91	1140.17	1142.84	1138.83	1133.64	1139.48
Peso sumergido C	638.4	639.45	641.7	635.71	634.75	639.29
Volumen (B-C) E	503.51	500.72	501.14	503.12	498.89	500.19
Gravedad Bulk (A/E) F	2.247	2.258	2.262	2.242	2.256	2.260
Teórica Máxima G	2.405	2.405	2.405	2.405	2.405	2.405
% Vacíos (100(G-F)/G) H	6.59	6.11	5.95	6.76	6.19	6.02
Volumen de vacíos de aire HE/100 I	33.16	30.61	29.83	34.00	30.90	30.12
Lectura	231	243	212			
Coefficiente	1.04	1.04	1.04			
Carga Kg P	1026.03 Kg	1079.13 Kg	941.89 Kg			
Carga N P	10065.35 N	10586.29 N	9239.91 N			

Muestras Parcialmente Saturadas 5 minutos a 525 mm Hg

Peso Saturado con Superficie Seca B'				1151.03	1147.4	1151.99
Peso sumergido C'				637.98	637.4	641.24
Volumen (B'-C') E'				513.05	510	510.75
Volumen Abs de Agua (B'-A) J'				22.8	21.89	21.46
% Saturación (100J'/I)				67.06	70.84	71.26
% Hinchamiento (100(E'-E)/E)				1.97	2.23	2.11

Muestras Sumergidas 24 h en Agua a 60 °C

Espesor mm t''				63.69	63.31	62.84
Peso Saturado con Superficie Seca B''				1158.53	1154.45	1155.18
Peso sumergido C''				642.18	641.2	645.75
Volumen (B''-C'') E''				516.35	513.25	509.43
Volumen Abs de Agua (B''-A) J''				30.3	28.94	24.65
% Saturación (100J''/I)				89.11	93.65	81.85
% Hinchamiento (100(E''-E)/E)				2.63	2.88	1.85
Lectura				180	185	190
Coefficiente				1	1	1
Carga, Kg f P''				769.23 Kg	790.56 Kg	811.89 Kg
Carga N P''				7546.12 N	7755.38 N	7964.60 N
Tensión Seca 2000 P/πtD S _{td}	1021.50	1080.36	942.17			
Tensión Seca Promedio		1014.68				
Tensión Húmeda 2000 P''/πt''D S _{tm}				746.7897141	772.1348617	798.9104802
Tensión Húmeda Promedio					772.61	

Grado de Tensión TSR 100(S_{tm}/S_{td})

76.14

Daño por Humedad Visual	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro
Agregado con grietas o Fracturado	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro

OBSERVACIONES: SE PUDO OBSERVAR QUE LA HUMEDAD LLEGÓ HASTA EL INTERIOR DE LAS BRIQUETAS.

ELABORÓ:	REVISÓ:
PABLO JOSÉ MENÉNDEZ	TEC. CARMEN RAMOS

**ENSAYO DE EFECTO DE LA HUMEDAD EN MEZCLAS
DE CONCRETO ASFÁLTICO PARA PAVIMENTOS ASTM D4867**

LABORATORIO CONTROL DE CALIDAD DE MEZCLA ASFALTICA CONSTRUCTORA DISA S.A DE C.V

PROYECTO:	Diseño de Mezcla asfáltica en caliente
SOLICITANTE:	Planta Asfáltica Constructora DISA
DESCRIPCION:	Mezcla Asfáltica en Caliente Con Asfalto AC 30 Con TMN 3/4' con 1.0% de cal
FECHA DE MUESTREO:	17/12/2014
FECHA DE ENSAYO:	18/12/2014

Muestra	1	2	3	4	5	6
Diámetro mm D	101	101	101	101	101	101
Espesor mm t	61.78	61.73	61.83	62.05	61.53	61.83
Peso seco al aire A	1126.31	1129.25	1127.85	1131.48	1124.43	1129.67
Peso Saturado con Superficie Seca B	1136.44	1135.26	1137.03	1142	1130.55	1137.03
Peso sumergido C	635.55	634.83	635.75	638.99	631.73	635.77
Volumen (B-C) E	500.89	500.43	501.28	503.01	498.82	501.26
Gravedad Bulk (A/E) F	2.249	2.257	2.250	2.249	2.254	2.254
Teórica Máxima G	2.404	2.404	2.404	2.404	2.404	2.404
% Vacíos (100(G-F)/G) H	6.46	6.13	6.41	6.43	6.23	6.25
Volumen de vacíos de aire HE/100 I	32.38	30.69	32.12	32.34	31.09	31.35
Lectura	200	210	215			
Coefficiente	1.04	1.04	1.04			
Carga Kg P	888.70 Kg	933.03 Kg	955.18 Kg			
Carga N P	8718.18 N	9152.98 N	9370.29 N			

Muestras Parcialmente Saturadas 5 minutos a 525 mm Hg

Peso Saturado con Superficie Seca B'				1152.62	1144.03	1153.6
Peso sumergido C'				639.64	636.1	640.8
Volumen (B'-C') E'				512.98	507.93	512.8
Volumen Abs de Agua (B'-A) J'				21.14	19.6	23.93
% Saturación (100J'/I)				65.36	63.05	76.34
% Hinchamiento (100(E'-E)/E)				1.98	1.83	2.30

Muestras Sumergidas 24 h en Agua a 60 °C

Espesor mm t''				63.41	62.91	63.31
Peso Saturado con Superficie Seca B''				1158.55	1150.01	1157.5
Peso sumergido C''				644.5	639.98	644.24
Volumen (B''-C'') E''				514.05	510.03	513.26
Volumen Abs de Agua (B''-A) J''				27.07	25.58	27.83
% Saturación (100J''/I)				83.69	82.29	88.78
% Hinchamiento (100(E''-E)/E)				2.19	2.25	2.39
Lectura				173	172	178
Coefficiente				1	1	1
Carga, Kg f P''				739.35 Kg	735.09 Kg	760.69 Kg
Carga N P''				7253.06 N	7211.19 N	7462.40 N
Tensión Seca 2000 P/πtD S _{td}	889.41	934.63	955.19			
Tensión Seca Promedio		926.41				
Tensión Húmeda 2000 P''/πt''D S _{tm}				720.9995353	722.4871107	742.9505535
Tensión Húmeda Promedio					728.81	

Grado de Tensión TSR 100(S_{tm}/S_{td})

78.67

Daño por Humedad Visual	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro
Agregado con grietas o Fracturado	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro

OBSERVACIONES: SE PUDO OBSERVAR QUE LA HUMEDAD LLEGÓ HASTA EL INTERIOR DE LAS BRIQUETAS.

ELABORÓ:	REVISÓ:
PABLO JOSÉ MENÉNDEZ	TEC. CARMEN RAMOS

**ENSAYO DE EFECTO DE LA HUMEDAD EN MEZCLAS
DE CONCRETO ASFÁLTICO PARA PAVIMENTOS ASTM D4867**

LABORATORIO CONTROL DE CALIDAD DE MEZCLA ASFALTICA CONSTRUCTORA DISA S.A DE C.V

PROYECTO: Diseño de Mezcla asfáltica en caliente
 SOLICITANTE: Planta Asfáltica Constructora DISA
 DESCRIPCION: Mezcla Asfáltica en Caliente Con Asfalto AC 30 Con TMN 3/4' con 1.5% de cal
 FECHA DE MUESTREO: 18/12/2014
 FECHA DE ENSAYO: 19/12/2014

Muestra	1	2	3	4	5	6
Diámetro mm D	101	101	101	101	101	101
Espesor mm t	62.54	62.59	62.98	63.29	64.24	63.79
Peso seco al aire A	1142.97	1138.8	1151.49	1152.4	1173.62	1166.42
Peso Saturado con Superficie Seca B	1153.95	1152.04	1162.33	1162.95	1183.2	1175.32
Peso sumergido C	646.92	644.61	651.79	649.85	662.4	658.2
Volumen (B-C) E	507.03	507.43	510.54	513.1	520.8	517.12
Gravedad Bulk (A/E) F	2.254	2.244	2.255	2.246	2.253	2.256
Teórica Máxima G	2.402	2.402	2.402	2.402	2.402	2.402
% Vacíos (100(G-F)/G) H	6.15	6.57	6.10	6.50	6.18	6.09
Volumen de vacíos de aire HE/100 I	31.19	33.33	31.15	33.33	32.20	31.52
Lectura	255	231	239			
Coefficiente	1.04	1.04	1			
Carga Kg P	1132.20 Kg	1026.03 Kg	1020.61 Kg			
Carga N P	11106.93 N	10065.35 N	10012.19 N			

Muestras Parcialmente Saturadas 5 minutos a 525 mm Hg

Peso Saturado con Superficie Seca B'				1171.36	1193.06	1189.5
Peso sumergido C'				652.4	664.19	660.6
Volumen (B'-C') E'				518.96	528.87	528.9
Volumen Abs de Agua (B'-A) J'				18.96	19.44	23.08
% Saturación (100J'/I)				56.88	60.37	73.23
% Hinchamiento (100(E'-E)/E)				1.14	1.55	2.28

Muestras Sumergidas 24 h en Agua a 60 °C

Espesor mm t''				64.11	65.04	64.56
Peso Saturado con Superficie Seca B''				1179.77	1200.11	1192.1
Peso sumergido C''				660.02	672.8	668.69
Volumen (B''-C'') E''				519.75	527.31	523.41
Volumen Abs de Agua (B''-A) J''				27.37	26.49	25.68
% Saturación (100J''/I)				82.11	82.27	81.48
% Hinchamiento (100(E''-E)/E)				1.30	1.25	1.22
Lectura				213	212	212
Coefficiente				1	0.96	0.96
Carga, Kg f P''				909.92 Kg	869.43 Kg	869.43 Kg
Carga N P''				8926.32 N	8529.15 N	8529.15 N
Tensión Seca 2000 P/πtD S _{td}	1119.38	1013.61	1002.12			
Tensión Seca Promedio		1045.04				
Tensión Húmeda 2000 P''/πt''D S _{tm}				877.6005959	826.5298712	832.6884591
Tensión Húmeda Promedio					845.61	

Grado de Tensión TSR 100(S_{tm}/S_{td})

80.92

Daño por Humedad Visual	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro
Agregado con grietas o Fracturado	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro

OBSERVACIONES: SE PUDO OBSERVAR QUE LA HUMEDAD LLEGÓ HASTA EL INTERIOR DE LAS BRIQUETAS.

ELABORÓ:	REVISÓ:
PABLO JOSÉ MENÉNDEZ	TEC. CARMEN RAMOS

**ENSAYO DE EFECTO DE LA HUMEDAD EN MEZCLAS
DE CONCRETO ASFÁLTICO PARA PAVIMENTOS ASTM D4867**

LABORATORIO CONTROL DE CALIDAD DE MEZCLA ASFALTICA CONSTRUCTORA DISA S.A DE C.V

PROYECTO:	Diseño de Mezcla asfáltica en caliente
SOLICITANTE:	Planta Asfáltica Constructora DISA
DESCRIPCION:	Mezcla Asfáltica en Caliente Con Asfalto AC 30 Con TMN 3/4' con 2.0% de cal
FECHA DE MUESTREO:	18/12/2014
FECHA DE ENSAYO:	19/12/2014

Muestra	1	2	3	4	5	6
Diámetro mm D	101	101	101	101	101	101
Espesor mm t	63.37	62.90	64.19	63.43	62.98	63.00
Peso seco al aire A	1150.76	1151.58	1151.14	1154.16	1148.28	1151.47
Peso Saturado con Superficie Seca B	1160.12	1161.91	1161.15	1165.44	1157.4	1159.41
Peso sumergido C	646.4	651.96	640.75	651.25	646.79	648.63
Volumen (B-C) E	513.72	509.95	520.4	514.19	510.61	510.78
Gravedad Bulk (A/E) F	2.240	2.258	2.212	2.245	2.249	2.254
Teórica Máxima G	2.410	2.410	2.410	2.410	2.410	2.410
% Vacíos (100(G-F)/G) H	7.05	6.30	8.21	6.86	6.69	6.46
Volumen de vacíos de aire HE/100 I	36.23	32.12	42.75	35.29	34.15	32.99
Lectura	210	216	222			
Coefficiente	1	1	1			
Carga Kg P	897.14 Kg	922.70 Kg	948.25 Kg			
Carga N P	8800.94 N	9051.68 N	9302.35 N			

Muestras Parcialmente Saturadas 5 minutos a 525 mm Hg

Peso Saturado con Superficie Seca B'				1175.16	1171.54	1171.22
Peso sumergido C'				653.66	650.5	652.55
Volumen (B'-C') E'				521.5	521.04	518.67
Volumen Abs de Agua (B'-A) J'				21	23.26	19.75
% Saturación (100J'/I)				59.51	68.12	59.86
% Hinchamiento (100(E'-E)/E)				1.42	2.04	1.54

Muestras Sumergidas 24 h en Agua a 60 °C

Espesor mm t''				65.20	64.60	64.49
Peso Saturado con Superficie Seca B''				1184.33	1177.38	1179.38
Peso sumergido C''				655.74	653.65	656.58
Volumen (B''-C'') E''				528.59	523.73	522.8
Volumen Abs de Agua (B''-A) J''				30.17	29.1	27.91
% Saturación (100J''/I)				85.50	85.22	84.60
% Hinchamiento (100(E''-E)/E)				2.80	2.57	2.35
Lectura				198	203	196
Coefficiente				0.96	0.96	1
Carga, Kg P''				812.16 Kg	832.62 Kg	837.47 Kg
Carga N P''				7967.26 N	8167.98 N	8215.58 N

Tensión Seca 2000 P/πtD S _{td}	875.43	907.03	913.43			
Tensión Seca Promedio		898.63				
Tensión Húmeda 2000 P''/πt''D S _{tm}				770.2098096	796.9408474	803.0115354
Tensión Húmeda Promedio					790.05	

Grado de Tensión TSR 100(S_{tm}/S_{td})

87.92

Daño por Humedad Visual	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro
Agregado con grietas o Fracturado	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro

OBSERVACIONES: SE PUDO OBSERVAR QUE LA HUMEDAD LLEGÓ HASTA EL INTERIOR DE LAS BRIQUETAS.

ELABORÓ:	REVISÓ:
PABLO JOSÉ MENÉNDEZ	TEC. CARMEN RAMOS

**ENSAYO DE EFECTO DE LA HUMEDAD EN MEZCLAS
DE CONCRETO ASFÁLTICO PARA PAVIMENTOS ASTM D4867**

LABORATORIO CONTROL DE CALIDAD DE MEZCLA ASFALTICA CONSTRUCTORA DISA S.A DE C.V

PROYECTO:	Diseño de Mezcla asfáltica en caliente
SOLICITANTE:	Planta Asfáltica Constructora DISA
DESCRIPCION:	Mezcla Asfáltica en Caliente Con Asfalto AC 30 Con TMN 3/4' con 0.3% de MORELIFE
FECHA DE MUESTREO:	19/12/2014
FECHA DE ENSAYO:	20/12/2014

Muestra	1	2	3	4	5	6
Diámetro mm D	101	101	101	101	101	101
Espesor mm t	63.48	63.54	63.66	63.13	63.36	62.76
Peso seco al aire A	1138.09	1144.88	1139.98	1137.85	1138.52	1135.17
Peso Saturado con Superficie Seca B	1149.34	1156.41	1153.41	1151.28	1153.1	1147.66
Peso sumergido C	634.73	641.3	637.31	639.5	639.44	638.83
Volumen (B-C) E	514.61	515.11	516.1	511.78	513.66	508.83
Gravedad Bulk (A/E) F	2.212	2.223	2.209	2.223	2.216	2.231
Teórica Máxima G	2.405	2.405	2.405	2.405	2.405	2.405
% Vacíos (100(G-F)/G) H	8.04	7.58	8.16	7.55	7.84	7.24
Volumen de vacíos de aire HE/100 I	41.39	39.07	42.10	38.66	40.26	36.83
Lectura	193	205	214			
Coefficiente	1	1	1			
Carga Kg P	824.68 Kg	875.83 Kg	914.18 Kg			
Carga N P	8090.10 N	8591.93 N	8968.11 N			

Muestras Parcialmente Saturadas 5 minutos a 525 mm Hg

Peso Saturado con Superficie Seca B'				1161.27	1163.88	1158.61
Peso sumergido C'				642.3	641.01	640.55
Volumen (B'-C') E'				518.97	522.87	518.06
Volumen Abs de Agua (B'-A) J'				23.42	25.36	23.44
% Saturación (100J'/I)				60.58	62.99	63.65
% Hinchamiento (100(E'-E)/E)				1.40	1.79	1.81

Muestras Sumergidas 24 h en Agua a 60 °C

Espesor mm t''				64.85	65.38	64.76
Peso Saturado con Superficie Seca B''				1171.83	1173.31	1167.14
Peso sumergido C''				646.08	643.31	642.12
Volumen (B''-C'') E''				525.75	530	525.02
Volumen Abs de Agua (B''-A) J''				33.98	34.79	31.97
% Saturación (100J''/I)				87.89	86.41	86.81
% Hinchamiento (100(E''-E)/E)				2.73	3.18	3.18
Lectura				197	190	200
Coefficiente				0.96	0.96	0.96
Carga, Kg f P''				808.06 Kg	779.41 Kg	820.34 Kg
Carga N P''				7927.11 N	7646.01 N	8047.55 N
Tensión Seca 2000 P/πtD S _{td}	803.33	852.33	887.94			
Tensión Seca Promedio		847.87				
Tensión Húmeda 2000 P''/πt''D S _{tm}				770.4680519	737.1875609	783.2618825
Tensión Húmeda Promedio					763.64	

Grado de Tensión TSR 100(S_{tm}/S_{td})


90.07

Daño por Humedad Visual	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro
Agregado con grietas o Fracturado	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro	No se encontro

OBSERVACIONES: SE PUDO OBSERVAR QUE LA HUMEDAD LLEGÓ HASTA EL INTERIOR DE LAS BRIQUETAS.

ELABORÓ:	REVISÓ:
PABLO JOSÉ MENÉNDEZ	TEC. CARMEN RAMOS

G. Documentos de respaldo e información utilizada para análisis de la información



Asfalca
Asfaltos de Centroamérica
www.asfalca.com

ASFALTOS DE CENTROAMERICA, S.A. DE C.V.
Fabricación de Emulsiones Asfálticas
www.asfalca.com

OFICINA SAN SALVADOR
95 Av. Ivonne B&L
Cofonia Escalón, San Salvador.
PBX: 2209-2500
FAX: (503) 2209-0200
Email: asfalca@interaja.com.sv

OFICINA PLANTA
Kilómetro 38.5 Carretera
a Sonsonate, Cantón 3 Calbas,
Armeria, Sonsonate.

COMPROBANTE DE CREDITO FISCAL
13DS000C
No. 1900
NRC: 32725 - 5
NIE: 0634 - 260728 - 002 - 2

01 C-046

6451 1900

CONSTRUCTORA DISA, S.A. DE C.V.

SEÑOR: AVENIDA RIO AMAZONAS NO.10, JARDINES DE GUADALUPE, ANTIGUO CUSCATLAN.

DIRECCION: 8992-3

REGISTRO No.: 0614-191084-003-0

GIRO: INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION

FECHA: 12/05/2019

MUNICIPIO: ANTIGUO CUSCA

DEPARTAMENTO: LA LIBERTAD

NOTA DE REMISION: CREDITO

COND. DE PAGO:

CANTIDAD	UNIDAD	CODIGO	DESCRIPCION	P. UNIT.	VTAS. NO SUJETAS	VENTAS EXENTAS	VENTAS AFECTAS	
1,032.33	KGS	MDA-013	MOALIFE 5000 ORDEN DE COMPRA: 4511 REMISION: 1558	4.0563			4,268.65	
SON: CUATRO MIL OCHOCIENTOS VEINTITRES 577100 DOLARES ***								
ASFALCA, S.A. DE C.V., No aceptará ningún reclamo después de que este producto haya salido de sus instalaciones. La mercancía viaja por cuenta y riesgo del Cliente, una vez abandona las instalaciones de ASFALCA, S.A. DE C.V.							Sumas	4,268.65
							IVA	554.92
							Sub-Total	4,823.57
							(-) IVA Retenido	0.00
							Venta Exenta	0.00
							Ventas No Sujetas	4,823.57
							Venta Total	4,823.57

ENTREGO

NOMBRE: *Osvaldo Carmona*

NETOUI: 00553217-0

FIRMA: *[Firma]*

RECIBIÓ

NOMBRE:

NETOUI:

FIRMA:

PAGARE SIN PROTESTO
DEBO Y PAGARE A ASFALTOS DE CENTROAMERICA, S.A. DE C.V. EL VALOR DE LOS PRODUCTOS DETALLADOS EN ESTE DOCUMENTO, EN CASO DE MORA RECONOCERE EL 2% DE INTERES MENSUAL.

FIRMA AUTORIZADA ASFALCA

RECIBIÓ CONFIRMA

ORIGINAL-CLIENTE