



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON DILUIDO RC-250 Y EMULSIÓN

Freddy Erick Rolando Franco

Piura, Abril de 2002

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Civil

Abril 2002



Esta obra está bajo una [licencia](#)
[Creative Commons Atribución-](#)
[NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura

UNIVERSIDAD DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA



“Estudio comparativo entre mezclas asfálticas con diluido RC-250 y emulsión”

Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil

Freddy Erick Rolando Franco

Asesor: Ing. Jorge Timaná Rojas

A Dios, a quien debemos todo.

A mis padres Freddy y Silvia, por su amor, su esfuerzo y la confianza que depositaron en mí. A mis hermanas Karen y María Sophía, por su constante apoyo. A Marita, por alentarme a seguir siempre adelante. A mis profesores, por su amistad y sus buenas enseñanzas. A todos mis amigos.

RESUMEN

A nivel mundial, el uso de los asfaltos diluidos está siendo reemplazado por el de las emulsiones asfálticas debido a las ventajas que éstas presentan. Dentro de ellas podemos mencionar las más importantes, como son: económicas, ambientales y de seguridad.

Esta tesis tiene como objetivo principal hacer un estudio comparativo entre las mezclas asfálticas con diluido y las mezclas asfálticas con emulsión y verificar así lo descrito en el párrafo anterior.

Para cumplir con dicho objetivo se realizaron ensayos en el Laboratorio de Suelos de la Universidad de Piura y en el de la empresa BITUPER en Lima. El diluido utilizado es el RC-250 y la emulsión elegida es del tipo catiónica de rotura lenta, por tener ésta una mejor afinidad con el agregado empleado, perteneciente a las canteras de Sojo y Cerromochó.

Al comparar los resultados con ambos tipos de mezcla, se llega a la conclusión de que el uso de emulsiones asfálticas en Piura sería una buena alternativa para mejorar la calidad de las carpetas asfálticas, incluida la durabilidad, que es el principal problema que nos aqueja.

INDICE GENERAL

Página

INTRODUCCION

CAPITULO I

MATERIALES QUE CONFORMAN UNA MEZCLA ASFALTICA	1
1.1 Asfalto	1
1.1.1 Origen y naturaleza del asfalto	1
1.1.1.1 Refinación de petróleo	1
1.1.1.2 Refinación de asfalto	2
1.1.2 Clasificación, propiedades físicas y químicas del asfalto	2
1.1.2.1 Clasificación y grados del asfalto	2
1.1.2.2 Propiedades químicas del asfalto	3
1.1.2.3 Propiedades físicas del asfalto	5
1.2 Agregado	6
1.2.1 Clasificación de agregados	6
1.2.1.1 Rocas sedimentarias	6
1.2.1.2 Rocas ígneas	7
1.2.1.3 Rocas metamórficas	7
1.2.2 Fuentes de agregados	9
1.2.2.1 Agregados naturales	9
1.2.2.2 Agregados procesados	9
1.2.2.3 Agregados sintéticos	10
1.2.3 Propiedades del agregado y su evaluación	10

1.2.3.1	Gradación y tamaño máximo de la partícula	11
1.2.3.2	Limpieza	13
1.2.3.3	Dureza	13
1.2.3.4	Forma de partícula	13
1.2.3.5	Textura superficial	14
1.2.3.6	Capacidad de absorción	14
1.2.3.7	Peso específico	14
1.2.3.8	Afinidad con el asfalto	15

CAPITULO II

ASFALTOS DILUIDOS Y EMULSIONADOS	17
2.1 Asfaltos diluidos	17
2.1.1 Especificaciones y ensayos para asfaltos diluidos	17
2.2 Emulsiones asfálticas	18
2.2.1 Fluidificación del cemento asfáltico	18
2.2.2 Definición de emulsión y aspectos fisicoquímicos	19
2.2.3 Clasificación de emulsiones	21
2.2.4 Rompimiento de una emulsión	21
2.2.5 Mecanismo de rotura	23
2.2.5.1 Rotura por evaporación	24
2.2.5.2 Mecanismo fisicoquímico	24
2.2.6 Caracterización de emulsiones asfálticas	26
2.2.7 Especificaciones y ensayos para emulsiones asfálticas	26

2.2.8 Evaluación y afinidad con el agregado de obra	26
2.2.9 Acopio y manipulación de emulsiones	30
2.2.10 Almacenaje y transporte	31
2.2.11 Aplicaciones de las emulsiones. Clasificación	32
CAPITULO III	
MEZCLAS ASFALTICAS	35
3.1 Introducción	35
3.2 Características y comportamiento de la mezcla	35
3.2.1 Densidad	36
3.2.2 Vacíos de aire (o simplemente vacíos)	36
3.2.3 Vacíos en el agregado mineral	36
3.2.4 Contenido de asfalto	37
3.3 Propiedades consideradas en el diseño de mezclas	38
3.3.1 Estabilidad	38
3.3.2 Durabilidad	39
3.3.3 Impermeabilidad	40
3.3.4 Trabajabilidad	41
3.3.5 Flexibilidad	42
3.3.6 Resistencia a la fatiga	42
3.3.7 Resistencia al deslizamiento	43
3.4 Método de diseño para mezclas con asfaltos diluidos usando el procedimiento del ensayo Marshall	44
3.4.1 Aplicabilidad	44

3.4.2 Bosquejo del método	44
3.5 Método propuesto de Illinois para el diseño en frío emulsión-agregado	45
3.5.1 Aplicabilidad	45
3.5.2 Bosquejo del método	45
3.5.3 Objetivo	46
CAPITULO IV	
ENSAYOS REALIZADOS EN LABORATORIO	47
4.1 Ensayos realizados en el agregado grueso	47
4.1.1 Análisis granulométrico por tamizado considerando todo el agregado grueso (ASTM C-136)	47
4.1.2 Peso específico y absorción (ASTM C-127)	47
4.1.3 Peso unitario (ASTM C-29)	47
4.1.4 Ensayo de abrasión por la máquina de Los Angeles (ASTM C-131)	48
4.1.5 Afinidad con el asfalto (ASTM D-1664)	48
4.2 Ensayos realizados en el agregado fino	48
4.2.1 Análisis granulométrico por tamizado, vía húmeda (ASTM C-117)	48
4.2.2 Peso específico y absorción (ASTM C-128)	49
4.2.3 Peso unitario (ASTM C-29)	50
4.2.4 Afinidad con el asfalto	50
4.3 Diseño de mezclas	51
4.3.1 Proporción de agregados	51
4.3.2 Diseño de mezclas con asfaltos diluidos usando el procedimiento del ensayo Marshall	53

4.3.2.1 Determinación del peso específico Bulk de las briquetas (Gmb)	55
4.3.2.2 Determinación de estabilidad y flujo	55
4.3.2.3 Determinación de estabilidad y flujo de muestras sometidas a inmersión	57
4.3.2.4 Contenido óptimo de asfalto	58
4.3.2.5 Criterios de diseño	60
4.3.2.6 Resultados de laboratorio: mezcla asfáltica con RC-250	60
4.3.2.6.1 Contenido óptimo de asfalto	64
4.3.3 Diseño de mezclas asfálticas con emulsión usando el método propuesto de Illinois	64
4.3.3.1 Ensayo de recubrimiento	68
4.3.3.1.1 Resultados obtenidos en el laboratorio	70
4.3.3.2 Preparación de muestras	71
4.3.3.3 Contenido óptimo de agua de compactación	72
4.3.3.3.1 Resultados obtenidos en el laboratorio	73
4.3.3.4 Variación el contenido de asfalto residual	75
4.3.3.5 Determinación del peso específico Bulk, estabilidad y flujo de las briquetas	75
4.3.3.6 Contenido óptimo de asfalto	75
4.3.3.7 Criterios de diseño	75
4.3.3.8 Resultados de laboratorio: mezclas asfálticas con emulsión	76
4.3.3.8.1 Contenido óptimo de asfalto	78

CAPITULO V

ANALISIS Y COMPARACION DE RESULTADOS	84
--------------------------------------	----

5.1 Generalidades	84
5.2 Mezclas asfálticas con RC-250	84
5.2.1 Afinidad con el asfalto	84
5.2.2 Resultados en el diseño de mezclas	85
5.3 Mezclas asfálticas con emulsión CSS	89
5.3.1 Afinidad con el asfalto	90
5.3.2 Resultados en el diseño de mezclas	90
5.4 Comparación de resultados para mezclas asfálticas con RC-250 y emulsión CSS	91
5.5 Ventajas de las mezclas asfálticas con emulsión frente a las mezclas asfálticas con diluidos	92
5.5.1 Ventajas económicas	93
5.5.2 Ventajas ambientales	97
CAPITULO VI	
CONCLUSIONES	98
BIBLIOGRAFIA	99

INTRODUCCION

El desarrollo de la tecnología de las emulsiones asfálticas y de sus procesos de aplicación a nivel mundial han dado como resultado la sustitución de los asfaltos diluidos por emulsiones, en la mayoría de los casos en que aquellos se utilizan. Cuando las respuestas técnicas son comparables, entran en juego factores económicos, de seguridad y de protección del medio ambiente como elementos determinantes de que se elija la emulsión frente al diluido.

El Perú no es ajeno a ello y como respuesta ya hace algunos años el uso de la emulsión asfáltica está tomando bastante acogida. Es conocido que ya se han realizado numerosas obras de pavimentación en ciudades de la costa, sierra y selva de nuestro país con resultados satisfactorios.

En nuestra región todavía no se emplea esta nueva alternativa debido al pobre conocimiento de este nuevo componente de la mezcla asfáltica. Sin embargo, la experiencia obtenida en otros lugares ha demostrado que este material presenta ventajas frente a los diluidos, resumiéndose ellas en una mejor durabilidad del pavimento, siendo este el principal problema que nos aqueja.

Por tal motivo, esta tesis lo que pretende es incentivar a las entidades encargadas de las obras viales (CTAR, Municipalidades, MTC) a que en las futuras obras viales de nuestra región la emulsión sea tomada en cuenta y verificar así los mejores resultados que se podrían obtener con su uso.

CAPITULO I

MATERIALES QUE CONFORMAN UNA MEZCLA ASFÁLTICA

1.1 ASFALTO

El asfalto es un material negro, cementante, que varía ampliamente en consistencia, entre sólido y semisólido (sólido blando), a temperaturas ambientales normales. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual permite cubrir las partículas de agregado durante la producción de mezcla en caliente.

El asfalto usado en pavimentación, generalmente llamado cemento asfáltico, es un material viscoso y pegajoso. Se adhiere fácilmente a las partículas de agregado y, por lo tanto, es un excelente cemento para unir partículas de agregado en un pavimento. El cemento asfáltico es un excelente material impermeabilizante y no es afectado por los ácidos, los álcalis (bases) o sales. Esto significa que un pavimento de concreto asfáltico construido adecuadamente es impermeable y resistente a muchos tipos de daño químico.

El asfalto cambia cuando es calentado o envejecido. Tiende a volverse duro y frágil y también a perder parte de su capacidad de adherirse a las partículas de agregado. Estos cambios pueden ser minimizados si se comprenden las propiedades del asfalto y si durante la construcción, se toman medidas necesarias para garantizar que el pavimento terminado sea construido de tal manera que pueda retardarse el proceso de envejecimiento.

En esta tesis se tratarán los cementos asfálticos diluidos y los emulsionados. A grandes rasgos, un asfalto diluido es la combinación de un cemento asfáltico “puro” con un solvente del petróleo, el cual tiene la finalidad de disminuir la viscosidad de dicho asfalto. Un asfalto emulsionado, es la combinación de cemento asfáltico, agua y un agente emulsificante. Un asfalto emulsionado es menos viscoso que un asfalto diluido.

Sin embargo, en una mezcla asfáltica usando como ligante un asfalto diluido o uno emulsionado, tanto el solvente del petróleo como el agua se evaporan (curado de la mezcla), quedando como residuo el cemento asfáltico “puro”. Por tal motivo, interesa conocer las propiedades de este ligante final puesto que es el que permanecerá en el pavimento durante su vida útil. No obstante, la durabilidad del mismo dependerá del tratamiento inicial que se le dé a cada mezcla en particular, ya que ambas poseen diferentes características, las que serán estudiadas más adelante.

Es por esta razón que en esta tesis, cuando se cite la palabra asfalto al tratar las mezclas asfálticas, nos estaremos refiriendo a ese cemento asfáltico final, que queda luego del proceso de curado de la mezcla. Además, veremos que en el diseño de mezclas asfálticas lo que se tiene en cuenta es el porcentaje de éste en la mezcla.

1.1.1 Origen y naturaleza del asfalto

1.1.1.1 Refinación de petróleo

El crudo de petróleo es refinado por destilación. Este es un proceso en el cual las diferentes fracciones (productos) son separadas fuera del crudo por medio de un aumento, en etapas, de la temperatura.

Las fracciones livianas se separan por destilación simple. Los destilados más pesados, usualmente llamados gasóleos, pueden ser separados solamente mediante una combinación de calor y vacío. El asfalto puede ser producido usando destilación por vacío a una temperatura aproximada de 480°C. Esta temperatura puede variar un poco, dependiendo del crudo de petróleo que se esté refinando, o del grado de asfalto que se esté produciendo.

La figura 1.1 es una ilustración esquemática de una refinería típica. La figura muestra el flujo de petróleo durante el proceso de refinación.

1.1.1.2 Refinación de asfalto

Diferentes usos requieren diferentes tipos de asfalto. Los refinadores de crudo deben tener maneras de controlar las propiedades de los asfaltos que producen para que estos cumplan ciertos requisitos. Esto se logra, usualmente, mezclando varios tipos de crudos de petróleo antes de procesarlos. El hecho de poder mezclar permite al refinador combinar crudos que contienen asfaltos de características variables, para que el producto final posea exactamente las características solicitadas por el usuario.

Existen dos procesos por lo cuales puede ser producido un asfalto, después que se han combinado los crudos de petróleo: destilación por vacío y extracción con solventes. Como se discutió anteriormente, la destilación por vacío consiste en separar el asfalto del crudo mediante la aplicación de calor y vacío. En el proceso de extracción con solvente, se remueven mas gasóleos del crudo, dejando así un asfalto residual.

Una vez que los asfaltos han sido procesados, estos pueden ser mezclados entre sí, en ciertas proporciones, para producir grados intermedios de asfalto. Es así como un asfalto muy viscoso y uno menos viscoso pueden ser combinados para producir una asfalto de viscosidad intermedia.

En resumen, para producir asfaltos con características específicas, se usa el crudo de petróleo o mezclas de crudos de petróleo. El asfalto es separado de las otras fracciones del crudo por medio de destilación por vacío o extracción con solventes.

1.1.2 Clasificación, propiedades físicas y químicas del asfalto

1.1.2.1 Clasificación y grados del asfalto

Los asfaltos de pavimentación pueden clasificarse bajo tres tipos generales:

- Cemento asfáltico
- Asfalto diluido (o cortado)
- Asfalto emulsionado

Los asfaltos diluidos y los emulsificados son usados, casi por completo, en mezclas en frío y en riegos. Los cementos asfálticos, por el contrario, en mezclas en caliente y no se discutirán más por no ser tema de estudio para la presente tesis.

1.1.2.2 Propiedades químicas del asfalto

El asfalto tiene propiedades químicas únicas que lo hacen muy versátil como material de construcción de carreteras. Los técnicos de asfalto y los diseñadores de pavimentos han aprendido a identificar y caracterizar estas propiedades y a usarlas, dentro de la estructura del pavimento, en la forma más ventajosa posible. Una breve introducción de las propiedades más importantes nos ayudará a entender la naturaleza de los pavimentos.

La composición química es uno de los medios usados, más precisos, para identificar las propiedades de cualquier sustancia. Sin embargo, existen varias razones por las cuales la química no ha llegado a ser parte de los sistemas de clasificación de los asfaltos:

- En la actualidad no hay una prueba normal para composición química de asfaltos que sea aceptada mutuamente por los vendedores, los compradores y los usuarios del material.
- Los ensayos existentes para analizar composición química requieren de equipos sofisticados y pericia técnica que no está disponible en la mayoría de los laboratorios donde se hacen pruebas de asfaltos.
- La relación entre la composición química del cemento asfáltico y su comportamiento en la estructura del pavimento es todavía incierta.

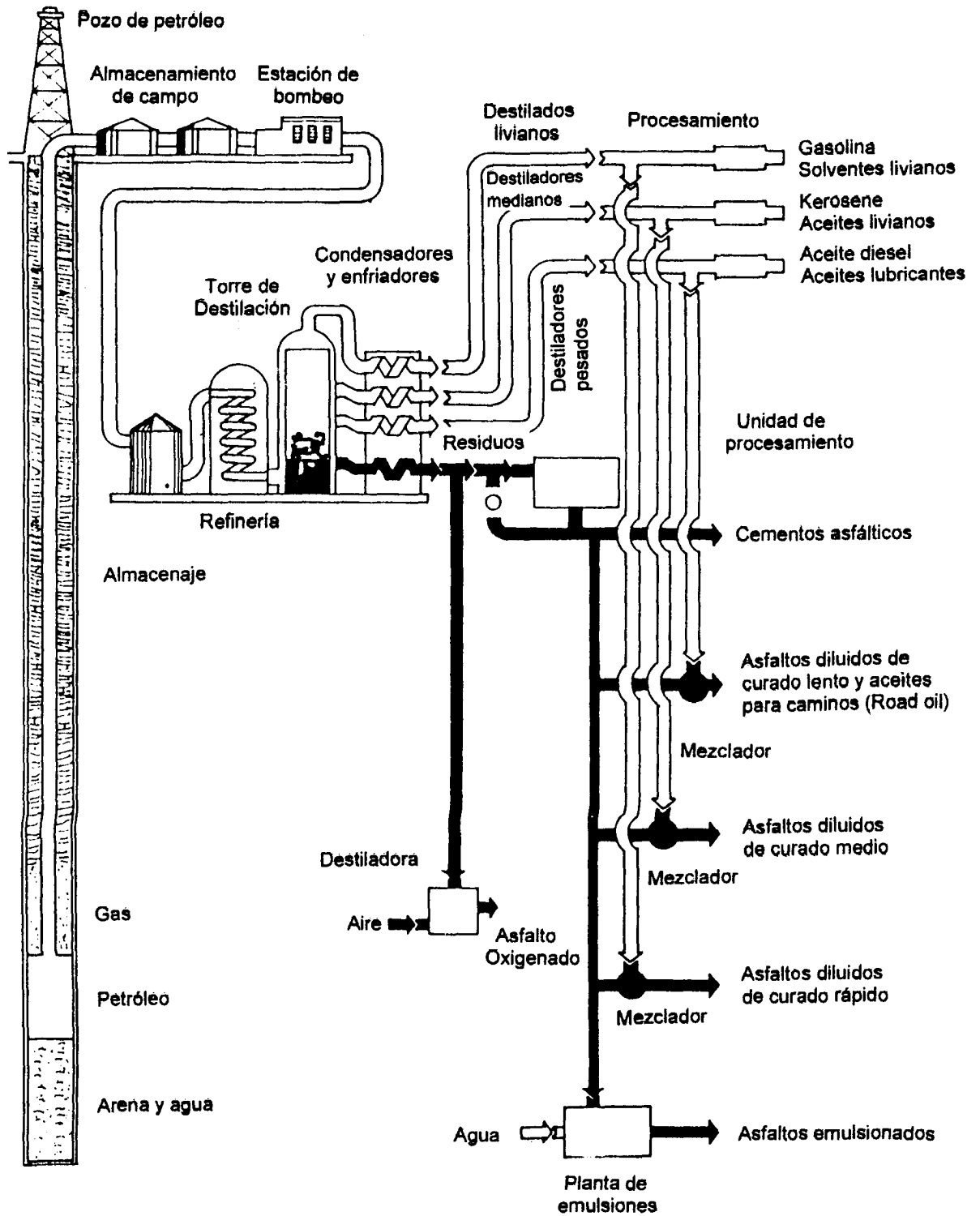
De todas maneras, una breve descripción de la química del asfalto ayudará a entender la naturaleza del material.

Básicamente, el asfalto está compuesto por varios hidrocarburos (combinaciones moleculares de hidrógeno y carbono) y algunas trazas de azufre, oxígeno, nitrógeno y otros elementos. El asfalto, cuando es disuelto en un solvente como el heptano, puede separarse en dos partes principales: asfaltenos y maltenos.

Los asfaltenos no se disuelven en el heptano. Los asfaltenos, una vez separados de los maltenos, son usualmente de color negro o pardo oscuro y se parecen al polvo grueso de grafito. Los asfaltenos le dan al asfalto su color y dureza.

Los maltenos se disuelven en el heptano. Son líquidos viscosos compuestos de resinas y aceites. Las resinas son, por lo general, líquidos pesados de color ámbar o pardo oscuro, mientras que los aceites son de color más claro. Las resinas proporcionan las cualidades adhesivas (pegajosidad) en el asfalto, mientras que los aceites actúan como un medio de transporte para los asfaltenos y las resinas. La proporción de asfaltenos y maltenos en el asfalto puede variar debido a un sinnúmero de factores, incluyendo altas temperaturas, exposición a la luz y al oxígeno, tipo de agregado usado en la mezcla del pavimento, y al espesor de la película de asfalto en las partículas del agregado. Las reacciones y cambios que pueden ocurrir incluyen: la evaporación de los compuestos más

Figura 1.1. Proceso típico de refinación



volátiles, oxidación (combinación de moléculas de hidrocarburo con moléculas de oxígeno), polimerización (combinación de dos o más moléculas para formar una sola molécula más pesada), y otros cambios químicos que pueden afectar considerablemente las propiedades del asfalto. Las resinas se convierten gradualmente en asfaltenos, durante estas reacciones, y los aceites se convierten en resinas, ocasionando así un aumento en la viscosidad del asfalto.

1.1.2.3 Propiedades físicas del asfalto

Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras son: durabilidad, adhesión, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento.

- **Durabilidad**

Es la medida de que tanto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. Es una propiedad juzgada principalmente a través del comportamiento del pavimento, y por consiguiente es difícil de definir solamente en términos de las propiedades del asfalto. Esto se debe a que el comportamiento del pavimento está afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado, la mano de obra en construcción y otras variables que incluyen la misma durabilidad del asfalto.

- **Adhesión y cohesión**

La adhesión es la capacidad del asfalto para adherirse o pegarse al agregado en la mezcla de pavimentación. La cohesión es la capacidad del asfalto de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento terminado.

No existe un ensayo directo sobre el asfalto el cual mida estas propiedades. Sin embargo, sí es posible medir la adherencia de un asfalto con un agregado específico. Esta es una propiedad muy importante en una mezcla asfáltica por lo que se discutirá más adelante con más detalle.

- **Susceptibilidad a la temperatura**

Todos los asfaltos son termoplásticos; esto es, se vuelven más duros (más viscosos) a medida que su temperatura disminuye, y más blandos (menos viscosos) a medida que su temperatura aumenta. Esta característica se conoce como susceptibilidad a la temperatura y es una de las propiedades más valiosas en un asfalto. La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de petróleos de diferente origen, aún si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia.

Es muy importante conocer la susceptibilidad a la temperatura del asfalto que va a ser utilizado pues ella indica la temperatura adecuada a la cual se debe mezclar el asfalto con el agregado, y la temperatura a la cual se debe compactar la mezcla sobre la base de la carretera.

Es de vital importancia que un asfalto sea susceptible a la temperatura puesto que debe tener suficiente fluidez para que pueda cubrir las partículas de agregado durante el mezclado y así permitir que estas partículas se desplacen unas respecto a otras durante la compactación. Luego deberá volverse lo suficientemente viscoso, a temperaturas ambientales normales, para mantener unidas las partículas de agregado.

- **Endurecimiento y envejecimiento**

Los asfaltos tienden a endurecerse en la mezcla asfáltica durante la construcción, y también en el pavimento terminado. Este endurecimiento es causado principalmente por el proceso de oxidación (el asfalto combinándose con el oxígeno), el cual ocurre más fácilmente a altas temperaturas y en películas delgadas de asfalto (como la película que recubre las partículas de agregado).

No todos los asfaltos se endurecen a la misma velocidad cuando son calentados en películas delgadas. Por lo tanto, cada asfalto debe ser ensayado por separado para poder determinar sus características de envejecimiento, y así poder ajustar las técnicas constructivas para minimizar el endurecimiento. Estos ajustes incluyen mezclar el asfalto con el agregado a la temperatura más baja posible y durante el tiempo más corto que pueda obtenerse en la práctica.

El endurecimiento del asfalto continua después de la construcción. Una vez más, las causas principales son la oxidación y la polimerización. Estos procesos pueden ser retardados si se mantiene, en el pavimento terminado, una cantidad pequeña de vacíos (de aire) interconectados, junto con una capa gruesa de asfalto cubriendo las partículas de agregado.

1.2 AGREGADO

El agregado, también conocido como material granular o agregado mineral, es cualquier mineral duro e inerte usado, en forma de partículas graduadas o fragmentos, como parte de un pavimento de mezcla asfáltica. Los agregados típicos incluyen arena, grava, piedra triturada, escoria y polvo de roca. El agregado constituye entre el 90 y el 95 por ciento, en peso, y entre el 75 y el 85 por ciento, en volumen, de la mayoría de las estructuras de pavimento. El comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el agregado mismo proporciona la mayoría de las características de capacidad portante.

1.2.1 Clasificación de agregados

Las rocas se dividen en tres tipos generales: sedimentarias, ígneas y metamórficas (Tabla 1.2). Esta clasificación está basada en el tipo de formación de cada roca.

1.2.1.1 Rocas sedimentarias

Las rocas sedimentarias se forman por la acumulación de sedimentos (partículas finas) en el agua o a medida que el agua se deposita. El sedimento puede consistir de partículas minerales o fragmentos (como es el caso de la areniscas y la arcilla esquistosa), de residuos de productos animales (algunas calizas), de plantas (carbón), de los productos finales de una acción química o una evaporación (sal, yeso), o de la combinación de cualquiera de estos tipos de materiales.

Dos términos que usualmente se aplican a rocas sedimentarias son silíceo y calcáreo. Rocas sedimentarias silíceas son aquellas que contienen un alto porcentaje de sílice. Aquellas rocas que contienen un alto porcentaje de carbonato de calcio (calizas) son llamadas calcáreas.

Las rocas sedimentarias se encuentran, normalmente, en capas (estratos), dentro de la corteza terrestre. Esta estratificación es el resultado directo de la manera en que se formaron las rocas sedimentarias: a partir de depósitos de partículas finas, generalmente sedimentados sobre el fondo de lagos o mares antiguos.

1.2.1.2 Rocas ígneas

Las rocas ígneas constan de material fundido (magma) que se ha enfriado y solidificado. Hay dos tipos de rocas ígneas: extrusivas e intrusivas.

Las rocas ígneas extrusivas son formadas a partir del material que se ha vertido afuera, sobre la superficie terrestre, durante una erupción volcánica o alguna actividad geológica similar. La roca resultante tiene una apariencia y estructura vidriosa, debido a que el material se enfría rápidamente al ser expuesto a la atmósfera. La riolita, la andesita y el basalto son ejemplos de rocas extrusivas.

Las rocas intrusivas, por otro lado, se forman a partir del magma que queda atrapado en las profundidades de la corteza terrestre. Al ser atrapado en la corteza, el magma se enfría y endurece lentamente, permitiendo la formación de una estructura cristalina. En consecuencia, la roca ígnea intrusiva es cristalina en estructura y apariencia; siendo ejemplos el granito, la diorita y el gabro. Los movimientos terrestres y los procesos de erosión traen rocas intrusivas a la superficie terrestre, donde pueden ser explotadas en canteras y posteriormente usadas.

1.2.1.3 Rocas metamórficas

Las rocas metamórficas son, generalmente, rocas sedimentarias o ígneas que han sido transformadas por procesos de intensa presión y calor dentro de la tierra, y también por reacciones químicas. Es muy difícil determinar el origen exacto de una roca metamórfica en particular, debido a que los procesos de formación son muy complejos.

Muchos tipos de rocas metamórficas presentan un rasgo característico: los minerales están alineados en capas o planos paralelos. Partir la roca en el sentido de sus planos es mucho más fácil que partirla en sus otras direcciones. Las rocas metamórficas

Tabla 1.2. Clasificación de rocas

CLASIFICACION GENERAL DE ROCAS		
Clase	Tipo	Familia
Sedimentarias	Calcáreas	Caliza Dolomita
	Silíceas	Arcilla esquistosa Arenisca Horsteno Conglomerado Breccia
Metamórficas	Foliadas	Gneis Esquisto Anfibolita Pizarra
	No foliadas	Cuarcita Mármol Serpentina
Ígneas	Intrusivas	Granito Sienita Diorita Gabbro Periodotila Piroxenita Hornablendita
	Extrusivas	Obsidiana Pómez Tufa Riolita Traquita Andesita Basalto Diabasa

que exhiben este tipo de estructura se denominan foliadas. Ejemplos de rocas foliadas son los gneises, los esquistos (formados de rocas ígneas) y la pizarra (formada de la arcilla esquistosa; una roca sedimentaria).

No todas las rocas metamórficas son foliadas. El mármol (formado de calizas) y la cuarcita (formada de las areniscas) son tipos comunes de rocas metamórficas que no presentan foliación.

Los agregados empleados en esta tesis pertenecen a las canteras de Sojo y Cerromochó. Estos agregados se pueden clasificar como rocas metamórficas de origen sedimentario – silíceo¹.

1.2.2 Fuentes de agregados

Los agregados usados en el pavimento asfáltico se clasifican, generalmente, de acuerdo a su origen. Estos incluyen: agregados naturales, agregados procesados y agregados sintéticos o artificiales.

1.2.2.1 Agregados naturales

Los agregados naturales son aquellos que son usados en su forma natural, con muy poco o ningún procesamiento. Ellos están constituidos por partículas producidas mediante procesos naturales de erosión y degradación, tales como la acción del viento, el agua, el movimiento del hielo y los químicos. La forma de las partículas individuales es producto de los agentes que actúan sobre ellas. Los glaciares por ejemplo, usualmente producen rocas y guijarros redondeados y las corrientes de agua producen partículas lisas y redondeadas.

Los principales tipos de agregado natural usados en la construcción de pavimentos son la grava y la arena. La grava se define, usualmente, como partículas de un tamaño igual o mayor que 6.35mm (1/4 pulgada). La arena se define como partículas de un tamaño menor que 6.35mm pero mayor que 0.075mm (No.200). Las partículas de un tamaño menor que 0.075mm son conocidas como relleno mineral (filler), el cual consiste principalmente de limo y arcilla.

Las gravas y las arenas son clasificadas, además, de acuerdo a su origen. Los materiales producidos en canteras abiertas y usados sin ningún procesamiento adicional son conocidos como materiales en bruto y los materiales de la ribera de los ríos son conocidos como materiales de canteras de ríos.

Los depósitos de gravas varían ampliamente en composición, pero usualmente contienen alguna cantidad de arena y limo. Los depósitos de arena también contienen, comúnmente, alguna cantidad de arcilla y limo. Las arenas de playa están compuestas de partículas de tamaño regularmente uniforme, mientras que las arenas de río contienen proporciones grandes de grava, limo y arcilla.

Según esta clasificación; se puede decir que la arena (agregado fino), tanto de las canteras de Sojo y Cerromochó, proviene de fuentes naturales. La grava (agregado grueso) de la cantera de Sojo, se puede clasificar como un agregado procesado, el cual se define a continuación.

1.2.2.2 Agregados procesados

¹ Ingeniero Wilfredo Castillo, profesor de Geología de la Universidad de Piura.

Los agregados procesados son aquellos que han sido triturados y tamizados antes de ser usados. Existen dos fuentes principales de agregados procesados: las gravas naturales que son trituradas para volverlas más apropiadas para pavimentos de mezcla asfáltica y los fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes que deben ser reducidos en tamaño antes de ser usados en la pavimentación.

La roca es triturada por tres razones: para cambiar la textura superficial de las partículas de lisa a rugosa, para cambiar la forma de la partícula de redonda a angular y para reducir y mejorar la distribución y el rango (graduación) de los tamaños de las partículas. El propósito principal de la trituración, en el caso de los fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes, es reducir las piedras a un tamaño que sea manejable. Sin embargo, los cambios en la textura superficial, y en la forma de las partículas, son también muy importantes.

El tamizado de los materiales, después de triturarlos, da como resultado una granulometría con cierto rango de tamaño de partícula. Un factor importante en la construcción de pavimentos de buena calidad consiste en mantener graduaciones específicas de agregados. Sin embargo, por razones económicas, el material triturado es usado tal y como sale del triturador, con muy poco o ningún tamizado. Un control adecuado de las operaciones de triturado determina si la graduación resultante del agregado cumple, o no, con los requisitos de la obra. El agregado triturado, sin tamizar, es conocido como agregado triturado sin cribar, y es usado satisfactoriamente en muchos proyectos de construcción de pavimentos. Sin embargo, es esencial garantizar que la operación de triturado sea continuamente supervisada para poder producir un agregado que cumpla con las especificaciones.

1.2.2.3 Agregados sintéticos

Los agregados sintéticos o artificiales no existen en la naturaleza. Ellos son el producto del procesamiento físico o químico de materiales. Algunos son subproductos de procesos industriales de producción como el refinamiento de metales. Otros son producidos mediante el procesamiento de materias primas, para ser usados específicamente como agregado.

El producto secundario más comúnmente usado es la escoria de alto horno. Es una sustancia no metálica que brota a la superficie del hierro fundido durante el proceso de reducción. Una vez que es removida de la superficie del hierro, la escoria es transformada en pequeñas partículas templándola inmediatamente en agua, o triturándola una vez que se ha enfriado.

Los agregados sintéticos manufacturados son relativamente nuevos en la industria de la pavimentación. Ellos son producidos al quemar arcilla, arcilla esquistosa, tierra diatomacea procesada, vidrio volcánico, escoria y otros materiales. Los productos finales son típicamente livianos y tienen una resistencia muy alta al desgaste.

1.2.3 Propiedades del agregado y su evaluación

En un pavimento densamente graduado de mezcla asfáltica, el agregado conforma el 90 a 95 por ciento, en peso, de la mezcla de pavimentación. Esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor crítico en el comportamiento del pavimento. Sin embargo, además de la calidad, se aplican otros criterios que forman parte de la selección de un agregado en una obra de pavimentación. Estos criterios incluyen el costo y la disponibilidad del agregado. Aún más, un agregado que cumple con los requisitos de costo y disponibilidad deberá poseer también ciertas propiedades para poder ser considerado apropiado para pavimento asfáltico de buena calidad. Estas propiedades son:

- Graduación y tamaño máximo de partícula
- Limpieza
- Dureza
- Forma de partícula
- Textura de la superficie
- Capacidad de absorción
- Peso específico
- Afinidad con el asfalto

Algunas de estas propiedades se pueden determinar mediante ensayos de laboratorio, otras por simple inspección. Estos ensayos, según la American Standar Testing Methods (ASTM), que son las normas tomadas como referencia para esta tesis, se muestran en la Tabla 1.3.

1.2.3.1 Gradación y tamaño máximo de partícula

Todas las especificaciones de pavimento asfáltico requieren que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas este presente en ciertas proporciones (huso granulométrico). Esta distribución de varios tamaños de partículas dentro del agregado es comúnmente llamada graduación del agregado o graduación de la mezcla. Es necesario entender cómo se mide el tamaño de partículas y la graduación para determinar si la granulometría del agregado cumple o no con las especificaciones.

- Tamaño máximo de partícula

El tamaño de las partículas más grandes en la muestra debe ser determinado, debido a que las especificaciones hablan de un tamaño máximo de partículas para cada agregado usado. Existen dos formas de designar tamaños máximos de partículas:

- Tamaño máximo nominal de partícula, designado como el tamiz más grande que el primer tamiz que retiene más del 10 por ciento de las partículas de agregado, en una serie normal de tamices.
- Tamaño máximo de partícula, designado como un tamiz más grande que el tamaño máximo nominal de partícula. Típicamente, este es el tamiz más pequeño por el cual pasa el 100 por ciento de las partículas de agregado.

Una mezcla de pavimentación se clasifica de acuerdo a su tamaño máximo o a su tamaño máximo nominal.

Tabla 1.3. Ensayos para evaluar las propiedades de los agregados

Propiedad	Ensayo	Norma
Graduación y Tamaño máximo	Análisis granulométrico Por tamizado	ASTM D-421
Limpieza	Equivalente De arena	ASTM D-2419
Dureza	Abrasión por la Máquina de Los Angeles	ASTM C-131
Capacidad de absorción y Peso específico	Gravedad específica y Absorción	ASTM C-127 ASTM C-128
Afinidad con el Asfalto	Ensayo de adherencia Agregado grueso	ASTM D-1664
Afinidad con el Asfalto	Riedel Weber (Agregado fino)	D.E.E.MA-8

- Granulometría del agregado

La granulometría de partículas es determinada por un análisis de tamices (o granulometría) efectuado sobre las muestras de agregado. El análisis de tamices consiste en pasar la muestra por una serie de tamices, cada uno de los cuales tiene aberturas de un tamaño específico. Los tamices están denominados de acuerdo al tamaño de sus aberturas. Las partículas gruesas quedan atrapadas en los tamices superiores; las partículas de tamaño medio pasan a través de los tamices medianos y las partículas finas pasan a través de los tamices inferiores.

La granulometría del agregado, o graduación de la mezcla, tiene en cuenta el porcentaje (en peso) total de muestra que pasa por cada uno de los tamices. La granulometría es determinada al calcular el peso del contenido de cada tamiz, después de haber efectuado el análisis de tamices. Luego se resta el peso del contenido de cada tamiz del peso total de la muestra.

Los concretos asfálticos son clasificados de acuerdo a los porcentajes de partículas de agregado que contienen.

Ciertos términos son usados al hacer referencia a las fracciones de agregado, con el propósito de ayudar a la descripción de las mismas. Estos son:

- Agregado grueso, material retenido por el tamiz de 2.36mm (No.8).
- Agregado fino, material que pasa el tamiz de 2.36mm (No.8).
- Relleno mineral, fracciones de agregado fino que pasan el tamiz de 0.60mm (No.30).
- Polvo mineral, fracciones de agregado fino que pasan el tamiz de 0.075mm (No.200).

El relleno mineral y el polvo mineral están presentes en los agregados naturales y también son producidos, como subproducto, en la trituración de muchos tipos de roca. Ellos son esenciales para la producción de una mezcla densa, cohesiva, durable y resistente

a la penetración del agua. Sin embargo, un pequeño porcentaje de más, o de menos, de relleno o polvo mineral, puede causar que la mezcla aparezca excesivamente seca o excesivamente rica (o sea, la mezcla de pavimentación aparecerá como si tuviera muy poco asfalto o demasiado asfalto). Dichos cambios en la mezcla pueden ocurrir con pequeños cambios en la cantidad o en el tipo de relleno o polvo mineral utilizado. Por consiguiente, el tipo y la cantidad de relleno y polvo mineral usados en cualquier mezcla asfáltica de pavimentación deberán ser cuidadosamente controlados.

1.2.3.2 Limpieza

Las especificaciones de obra generalmente ponen un límite a los tipos y cantidades de materiales indeseables (vegetación, arcilla esquistosa, partículas blandas, terrones de arcilla, etc) en el agregado. Las cantidades excesivas de estos materiales pueden afectar desfavorablemente el comportamiento del pavimento.

La limpieza del agregado puede determinarse, usualmente, mediante inspección visual, pero un tamizado por lavado (donde el peso de la muestra de agregado antes de ser lavada es comparado con su peso después de ser lavada) proporciona una medida exacta del porcentaje de material indeseable más fino que 0.075mm (No.200). El ensayo de equivalente arena (ASTM D-2419) es un método para determinar la proporción indeseable de polvo fino y arcilla en la fracción de agregado que pasa el tamiz de 4.75mm (No.4).

1.2.3.3 Dureza

Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión (desgaste irreversible) y degradación durante la producción, colocación y compactación de la mezcla de pavimentación y durante la vida de servicio del pavimento. Los agregados que están en, o cerca de, la superficie, deben ser más duros (tener más resistencia) que los agregados usados en las capas inferiores de la estructura del pavimento. Esto se debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de las cargas de tránsito.

El ensayo de abrasión por la máquina de Los Angeles (ASTM C-131) mide la resistencia de un agregado al desgaste y a la abrasión.

1.2.3.4 Forma de partícula

La forma de la partícula afecta la trabajabilidad de la mezcla de pavimentación durante su colocación, así como la cantidad de fuerza necesaria para compactar la mezcla a la densidad requerida. La forma de la partícula también afecta la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida útil.

Las partículas irregulares y angulares generalmente resisten el desplazamiento (movimiento) en el pavimento, debido a que tienden a entrelazarse cuando son compactadas. El mejor entrelazamiento generalmente se da con partículas de bordes puntiagudos y de forma cúbica, producidas, casi siempre, por trituración.

Muchas de las mezclas asfálticas de pavimentación contienen partículas angulares y redondas. Las partículas gruesas (grandes) de agregado proporcionan la resistencia en el pavimento y provienen generalmente de piedra o grava triturada. Las partículas finas de agregado suministran la trabajabilidad necesaria en la mezcla y provienen generalmente de arenas naturales.

1.2.3.5 Textura superficial

La textura superficial de las partículas de agregado es otro factor que determina no sólo la trabajabilidad y resistencia final de la mezcla de pavimentación, sino también las características de resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento. Algunos consideran que la textura superficial es más importante que la forma de la partícula. Una textura áspera, como la del papel lija, aumenta la resistencia en el pavimento debido a que evita que las partículas se muevan unas respecto a otras, y a la vez provee un coeficiente alto de fricción superficial que hace que el movimiento del tránsito sea más seguro.

Adicionalmente, las películas de asfalto se adhieren más fácilmente a las superficies rugosas que a las superficies lisas. Las gravas naturales son frecuentemente trituradas durante su procesamiento, debido a que generalmente contienen superficies lisas. El trituramiento produce texturas superficiales rugosas en las caras fracturadas, así como cambios en la forma de la partícula.

No existe un método directo para evaluar la textura superficial. Es tan sólo una característica, como la forma de la partícula, que está reflejada en los ensayos de resistencia y en la trabajabilidad de la mezcla durante la construcción.

1.2.3.6 Capacidad de absorción

Todos los agregados son porosos, algunos más que otros. La cantidad de líquido que un agregado absorbe cuando es sumergido en un baño determina su porosidad.

La capacidad de un agregado de absorber agua (o asfalto) es un elemento importante de información. Si un agregado es altamente absorbente, entonces continuará absorbiendo asfalto después del mezclado inicial, dejando así menos asfalto en su superficie para ligar las demás partículas de agregado. Debido a esto, un agregado poroso requiere cantidades mucho mayores de asfalto que las que requieren un agregado menos poroso.

Los agregados altamente porosos y absorbentes no son normalmente usados, a menos de que posean otras características que los haga deseables, a pesar de su alta capacidad de absorción. Algunos ejemplos de dichos materiales son la escoria de alto horno y ciertos agregados sintéticos. Estos materiales son altamente porosos, pero también son livianos en peso y poseen alta resistencia al desgaste.

1.2.3.7 Peso específico

El peso específico de un agregado es la proporción entre el peso de un volumen dado de agregado y el peso de un volumen igual de agua. El peso específico es una forma de expresar las características de peso y volumen de los materiales. Estas características son especialmente importantes en la producción de mezclas de pavimentación debido a que el agregado y el asfalto son proporcionados, en la mezcla, de acuerdo al peso.

Una tonelada de agregado de bajo peso específico tiene un volumen mayor (ocupa más espacio) que una tonelada de agregado con un peso específico más alto. Por consiguiente, para poder cubrir todas las partículas de agregado, más asfalto debe ser adicionado a una tonelada de agregado con bajo peso específico (mayor volumen) que a una tonelada de agregado con un peso específico más alto (menor volumen).

Otra razón importante por la cual es necesario conocer el peso específico de los agregados usados es que este ayuda en el cálculo del porcentaje de vacíos de aire (espacios de aire) de las mezclas compactadas. Todas las mezclas de pavimentación deben incluir un cierto porcentaje (en volumen) de vacíos o espacios de aire, como será explicado más adelante. Estos espacios desempeñan una labor importante en el pavimento terminado. La única manera de calcular el porcentaje de vacíos de aire en un volumen dado de mezcla de pavimentación es midiendo el peso específico de una muestra de la mezcla y luego restando de su valor, los pesos específicos del agregado y asfalto que conforman la mezcla. El resultado es una indicación del volumen de vacíos de aire en la muestra.

Todos los agregados son, hasta cierto punto, porosos. Se han desarrollado tres tipos de peso específico para tener en cuenta la porosidad del agregado, debido a que esta afecta la cantidad de asfalto que se requiere para cubrir las partículas de agregado y también el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla final. Estos tres tipos son:

- Peso específico total
- Peso específico aparente, y
- Peso específico efectivo

El peso específico total de una muestra incluye todos los poros de la muestra.

El peso específico aparente no incluye, como parte del volumen de la muestra, los poros y espacios capilares que se llenarían de agua al mojar la muestra.

El peso específico efectivo excluye, del volumen de la muestra, todos los poros y espacios capilares que absorben asfalto.

El peso específico total asume que los poros que absorben agua no absorben asfalto. El peso específico aparente asume que todos los poros que son permeables al agua absorben asfalto. Ninguna de estas suposiciones, excepto en casos muy raros, es verdadera. Por lo tanto, el peso específico efectivo, el cual discrimina entre poros permeables al agua y poros permeables al asfalto, es el que más se acerca al valor correcto que debe ser usado en los cálculos de mezclas asfálticas.

1.2.3.8 Afinidad con el asfalto

La afinidad de un agregado con el asfalto es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto. Las calizas, las dolomitas y las rocas trapeanas tienen alta afinidad con el asfalto y son conocidas como hidrofóbicas (repelen el agua) porque resisten los esfuerzos del agua por separar el asfalto de sus superficies.

Los agregados hidrofílicos (atraen el agua) tienen poca afinidad con el asfalto. Por consiguiente, tienden a separarse de las películas de asfalto cuando son expuestos al agua. Los agregados silíceos (e.g. cuarcita y algunos granitos) son ejemplos de agregados susceptibles al desprendimiento y deben ser usados con precaución.

No es muy claro el porqué los agregados hidrofóbicos e hidrofílicos se comportan de tal manera. A pesar de esto, existen varios ensayos para determinar su afinidad con el asfalto y su tendencia al desprendimiento. En uno de estos ensayos, la mezcla de agregado-asfalto, sin compactar, es sumergida en agua y las partículas cubiertas son observadas visualmente. En otro ensayo, comúnmente conocido como ensayo de inmersión-compresión, dos muestras de mezclas son preparadas y una es sumergida en agua. Posteriormente, ambas son ensayadas para determinar sus resistencias. La diferencia en resistencia es considerada un indicativo de la susceptibilidad del agregado al desprendimiento.

Según lo expuesto en el numeral 1.2.1.3, los agregados de las canteras de Sojo y Cerromocho son agregados silíceos. Por lo tanto, según esta nueva clasificación (referida a su afinidad con el asfalto), se les puede definir como agregados hidrofílicos.

CAPITULO II

ASFALTOS DILUIDOS Y EMULSIONADOS

2.1 Asfaltos diluidos

Para disolver el cemento asfáltico se usan solventes de petróleo, conocidos también como diluyentes o destilados. Si el solvente para diluir el asfalto es altamente volátil, entonces se evaporará rápidamente. Por el contrario, los de baja volatilidad lo hacen más despacio. Por lo tanto, basándose en la velocidad relativa de evaporación, se puede dividir a los asfaltos diluidos en tres tipos:

a) Curado rápido (RC); constituido por cemento asfáltico y un diluyente liviano de alta volatilidad, generalmente con un punto de ebullición de rango similar a la nafta o gasolina.

b) Curado medio (MC); constituido por cemento asfáltico y un diluyente mediano de volatilidad media, generalmente en el orden del punto de ebullición del kerosene.

c) Curado lento (SC); constituido por cemento asfáltico y aceites de baja volatilidad.

El grado de fluidez de cada caso depende fundamentalmente de la proporción de solvente en el cemento asfáltico y en menor importancia, de la dureza del asfalto base del cual se hizo el diluido. Por lo tanto, de acuerdo al grado de fluidez, hay distintos tipos de asfaltos diluidos, algunos muy fluidos a temperatura ambiente, y otros más viscosos, que requerirán una pequeña cantidad de calor para hacerlos suficientemente fluidos para las operaciones a las que va a estar sometido.

2.1.1 Especificaciones y ensayos para asfaltos diluidos

Los asfaltos diluidos se clasifican según su tipo y grado. Los tipos RC, MC y SC, indican la velocidad relativa de evaporación del solvente y los grados, 70, 250, 800, 3000, la viscosidad cinemática mínima permitida a 60°C en centistokes. El valor máximo admisible de viscosidad para cada grado es dos veces el valor mínimo permitido. Un stoke es el cociente entre la viscosidad dinámica o absoluta (medida en poises) y la densidad, ambas a la misma temperatura.

Los grados más viscosos de los tres tipos de asfalto (RC-3000, MC-3000 y SC-3000) son sólo un poco menos viscosos que el cemento asfáltico de menor grado de viscosidad (AC-2.5). Los asfaltos diluidos de menor viscosidad (RC-70, MC-70 y SC-70) pueden ser vertidos con facilidad a temperatura ambiente (25°C). Tienen la misma consistencia que la crema de leche.

AASHTO y ASTM han adoptado especificaciones para los asfaltos diluidos. Además del ensayo de viscosidad a 60°C, en la Tabla 2.1 se enumeran los ensayos necesarios y el método apropiado según AASHTO y ASTM para determinar las propiedades específicas de estos productos.

Hablar de las propiedades de los asfaltos diluidos es casi referirnos a las propiedades del asfalto estudiadas en el primer capítulo. Por lo tanto, pasaremos inmediatamente a estudiar las emulsiones asfálticas, las cuales sí merecen una especial consideración por ser un tema relativamente nuevo en nuestro medio.

Tabla 2.1. Especificaciones y ensayos para asfaltos diluidos.

Ensayo	Método de Ensayo		Tipo y No. De especificación		
			AASHTO M81 ASTM D2028	AASHTO M82 ASTM D2027	ASTM D2026
	AASHTO	ASTM	RC	MC	SC
Viscosidad cinemática	T201	D2170	X	X	X
Pto. de inflamación (T.O.C.)	T79	D1310	X	X	----
Pto. de inflamación (C.O.C.)	T48	D92	----	----	X
Destilación	T78	D402	X	X	X
Penetración	T49	D5	----	----	----
Ductilidad	T51	D113	X	X	X
Viscosidad absoluta	T202	D2171	X	X	X
Residuo de penetración 100	T56	D243	----	----	X
Presencia de agua	T55	D95	X	X	X
Solución en tricloroetileno	T44	D2042	X	X	X
Ensayo de la mancha	T102	-----	X	X	X

2.2 Emulsiones asfálticas

2.2.1 Fluidificación del cemento asfáltico

Como se dijo en el primer capítulo, el asfalto es un material semisólido a temperatura ambiente, que se puede presentar en forma natural u obtenerse como residuo en la destilación de ciertos tipos de petróleo. Para utilizarlo con fines de construcción y mantenimiento de pavimentos se requiere reducir su viscosidad. Dicho objetivo se logra por medio de los siguientes procedimientos:

- Por simple calentamiento hasta una temperatura adecuada; en este caso las técnicas viales resultantes reciben el nombre genérico de “técnicas en caliente”.
- Por disolución en solventes derivados del petróleo, obteniéndose así los asfaltos diluidos o “cut-backs”, cuyas velocidades de endurecimiento están en relación directa con las volatilidades de los solventes empleados.

- Por emulsificación en agua, con la ayuda de agentes tensioactivos especiales; en este procedimiento se obtienen las emulsiones asfálticas, que también reciben los nombres de emulsiones bituminosas o asfaltos emulsionados.

Las dos últimas formas de fluidificación permiten la aplicación del cemento asfáltico a temperatura ambiente o levemente superior a ella.

El uso de los asfaltos diluidos en todo el mundo está en continuo retroceso desde hace años, mientras, en forma paralela, ha ido creciendo el consumo de asfalto en forma de emulsiones. Esta tendencia encuentra su fundamento en razones de índole muy variada, a saber:

- Técnicas: Las emulsiones reemplazan a los diluidos en la mayoría de las aplicaciones y en muchos casos con ventajas (como por ejemplo, mejor adherencia, posibilidad de mezclar con agregados húmedos, mayor número de aplicaciones, etc).
- Económicas: El uso de asfaltos diluidos involucra un gasto energético irrecuperable por la evaporación de los solventes de petróleo. En contraposición, el curado de una mezcla con emulsiones sólo produce la evaporación de agua.
- De seguridad: El manejo de asfaltos emulsionados elimina los riesgos de inflamación que son inherentes a los diluidos.
- De protección ambiental: La evaporación de agua hace que las emulsiones asfálticas sean no contaminantes, en tanto que los diluidos liberan solventes orgánicos a la atmósfera.

2.2.2 Definición de emulsión y aspectos fisicoquímicos

Desde el punto de vista fisicoquímico, una emulsión es una dispersión – más o menos estable – de un líquido en otro, en el cual es inmiscible.

Se conocen, en general, dos tipos de emulsiones: las emulsiones directas, en las cuales la fase dispersa (o interna) es hidrocarbonada y la fase dispersante (o externa) es agua. Por otro lado, en las emulsiones inversas la fase dispersa es la acuosa. Las primeras se designan o/w (“oil/water”) y las segundas w/o (“water/oil”).

En el caso particular que nos ocupa, una emulsión asfáltica es de tipo directa, siendo la fase dispersa un asfalto de petróleo.

La dispersión, en la práctica, se logra cuando el cemento asfáltico, convencionalmente fluidificado por calentamiento y una solución precalentada de un agente tensoactivo en agua, son introducidos simultáneamente en un dispositivo dispersor de alta energía, como un molino coloidal. El asfalto se dispersa en forma de glóbulos que son mantenidos estables por la acción del emulsificante, y cuyos diámetros no superan los 25 micrones, aproximadamente; la gran mayoría de ellos son inferiores a 10 micrones.

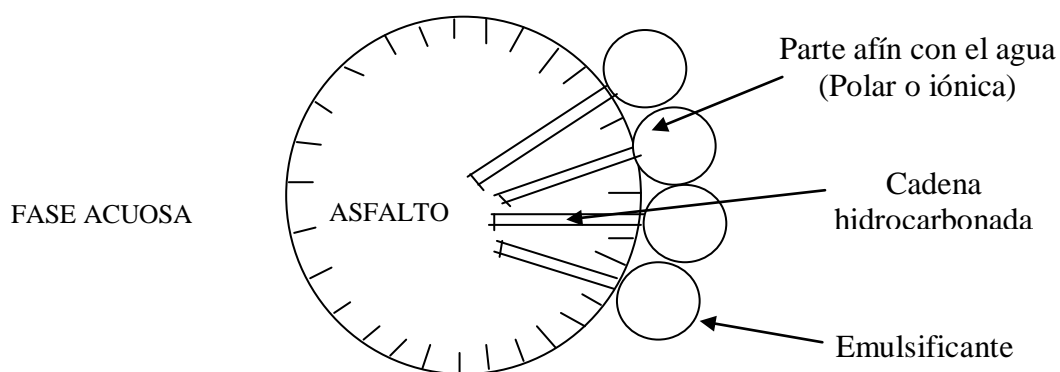
La función del emulsificante es disminuir la tensión interfacial del par asfalto-agua. Es sabido que la tensión interfacial es la energía que se debe suministrar a la superficie de

contacto entre dos líquidos no miscibles para agrandar su área. Disminuir esta tensión implica facilitar el aumento del área de contacto o mantenerla en un valor alto determinado. Para una masa dada de asfalto, cuanto mayor sea el grado de subdivisión (mayor número de esferas microscópicas), mayor será el área interfacial. La función del tensoactivo es, entonces, mantener elevada esa área interfacial, lo que significa mantener el asfalto disperso en forma de glóbulos, cuyos diámetros sean, en general, inferiores a 25 micrones. De no estar presente al emulsificante, las partículas formadas al pasar el asfalto y el agua por el molino coloidal, volverían a unirse entre sí en muy poco tiempo, con el resultado de la completa separación de las fases.

La acción del emulsificante, que conduce al descenso de la tensión interfacial, se puede interpretar teniendo en cuenta una característica que es común a todos los tensioactivos: las moléculas tienen un extremo que manifiesta afinidad por el agua, y una larga cadena hidrocarbonada que, por su naturaleza orgánica, es afín con el asfalto. Es así como, al ponerse en contacto las fases asfalto y agua en el molino coloidal, las moléculas del emulsificante se orientan en la interfase, creándose una capa monomolecular orientada, como se esquematiza en la Figura 2.2.

La ubicación de las moléculas del emulsificante en la superficie de los glóbulos constituye un verdadero nexo entre éstos y la fase acuosa; de este modo se puede interpretar químicamente la disminución de la tensión interfacial y la estabilización de la emulsión.

Fig.2.2. Interfase conformada por las moléculas del emulsificante.



Incidentalmente, si el emulsificante es de tipo iónico (aniónico o catiónico), lo cual sucede en la inmensa mayoría de las emulsiones para uso vial, los glóbulos están cargados eléctricamente en su superficie; siendo esta carga del mismo signo para todos los glóbulos, la repulsión electrostática contribuye a impedir que los glóbulos se unan entre sí; la carga eléctrica es, entonces, un factor adicional de estabilización.

El porcentaje de emulsificante que interviene en una emulsión asfáltica es rara vez superior al 1%, en especial si las emulsiones son catiónicas, donde puede ser tan bajo como 0.2%.

2.2.3 Clasificación de las emulsiones

El tipo de emulsificante y por consiguiente, la carga eléctrica de las partículas de asfalto, proporciona una primera forma de clasificar las emulsiones.

Cuando el glóbulo de asfalto, por la presencia del emulsificante en su superficie, adquiere carga positiva, se dice que la emulsión es catiónica (en un equipo de electrólisis produce depósito de asfalto en el electrodo negativo o cátodo).

Si por el contrario, la carga eléctrica del glóbulo es negativa, estaremos en presencia de una emulsión aniónica (en un equipo de electrólisis los glóbulos se dirigen al ánodo, terminal positivo).

También es posible preparar emulsiones bituminosas no iónicas, pero hasta el momento no se ha encontrado que sean ventajosas para el uso vial.

2.2.4 Rompimiento de una emulsión

Ya se ha visto el papel fundamental que juega el tensoactivo en la elaboración y estabilidad de una emulsión bituminosa. No obstante, su intervención no finaliza allí. Es bien conocido que una emulsión que fuera indefinidamente estable, no tendría ninguna utilidad en la construcción de pavimentos.

Cuando una emulsión se pone en contacto con un agregado pétreo, sea por riego o por acción de mezclado, debe iniciarse el proceso de rotura de aquella, esto es, la separación del asfalto del agua y el recubrimiento del mineral con una película del mismo. El agua debe liberarse y finalmente evaporarse. El cemento asfáltico depositado tendrá prácticamente las mismas propiedades que si hubiera sido aplicado en caliente o por medio de un solvente de petróleo. En cambio, el espesor de la película suele ser bastante menor.

Claro está que ese proceso de rompimiento no ocurre en todas las emulsiones a la misma velocidad. Allí es donde el emulsificante juega un rol fundamental, pues de acuerdo a su composición química y dosaje en la emulsión, será la velocidad de rotura de ésta (veremos más adelante que también influyen otros factores).

Precisamente la rapidez con que se presenta este fenómeno proporciona otra manera de clasificar a las emulsiones bituminosas.

Así, existen las emulsiones bituminosas rápidas, que son aquellas que experimentan un rompimiento en muy corto tiempo (usualmente algunos minutos) por lo cual se utilizan en trabajos de riego y tratamientos superficiales con agregados pétreos limpios. En general no son aptas para realizar mezclas con agregados que contengan finos, puesto que, en contacto con éstos, el rompimiento es casi instantáneo, siendo entonces insuficiente el

recubrimiento del resto del material pétreo. Sólo en algunos casos y mediante ciertos aditivos retardadores en el agua de prehumectación es posible utilizarlas en mezclas. Otras clases de emulsiones, según su velocidad de rotura, son las medias y las lentas, con las cuales es posible llevar a cabo una amplia gama de mezclas bituminosas en frío según el tipo y granulometría del árido, según las condiciones climáticas y las características de la maquinaria disponible.

Para ejemplificar el papel que juega el emulsificante en la velocidad de rotura de una emulsión frente a un agregado pétreo dado, podemos presentar el siguiente caso: dentro de los emulsificantes catiónicos, las diaminas de ácidos grasos en dosajes de 0.2 – 0.3% dan lugar a emulsiones de rotura rápida, mientras que en dosajes de 0.5 – 0.8% se producen emulsiones medias.

Otra variante que se puede presentar tiene que ver con el número de grupos ionizables de la especie emulsificante. A medida que ese número se incrementa (por ejemplo al pasar de diaminas a poliaminas) también disminuye la velocidad de rotura; es decir que, mientras una emulsión elaborada por medio de una diamina es rápida, otra emulsión donde se use una poliamina será media o lenta, según el número de grupos amino. (Todo esto a igualdad de otros factores, como contenido de cemento asfáltico, pH, radical orgánico, etc. y frente al mismo agregado pétreo).

El emulsificante es quizás el más importante de los factores que determinan la velocidad de rotura de una emulsión, pero no es el único. También influyen el pH de la emulsión, la distribución de tamaños de los glóbulos, la posible presencia de aditivos o fluidificantes, temperatura, etc. y factores no dependientes de la emulsión sino de los agregados, como el porcentaje de finos, equivalente de arena, grado de humedad, presencia de filler; o de factores externos, como temperatura y humedad ambientes, vientos fuertes, energía de mezclado, etc.

Químicamente el pH es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución acuosa, a través del logaritmo con signo negativo de la concentración de iones hidrógeno: $\text{pH} = -\log(\text{H}^+)$, siendo (H^+) la concentración de iones hidrógeno.

Esta magnitud se mide por medio del peachímetro, aparato de uso común en cualquier laboratorio químico y en el cual el dispositivo sensor es un electrodo de vidrio que se introduce en la solución acuosa (en este caso, la emulsión). La lectura del aparato da directamente el pH. Los valores de pH están, en cualquier solución acuosa, entre 0 y 14.

Se dice que una solución es ácida cuando su pH está entre 0 y 7, y alcalina cuando se encuentra entre 7 y 14. La neutralidad de la solución corresponde al valor de pH igual a 7.

En las emulsiones aniónicas, el pH es en general superior a 10, pues siempre hay en la emulsión un exceso de álcali fuerte. Por el contrario, en las emulsiones catiónicas el pH es siempre inferior a 7, y a veces tan bajo como 2 ó 1.5.

Lo importante de todas estas consideraciones es llegar a entender la necesidad de encontrar el par árido-emulsión más conveniente para un determinado proyecto, haciendo uso de las características señaladas anteriormente, es decir variando la naturaleza y/o

dosaje del emulsificante, el pH de la emulsión o incorporando aditivos de distinta naturaleza y funciones.

El pH es una variable que puede ser manejada en forma relativamente sencilla, produciendo muchas veces los efectos esperados. Para dar un ejemplo concreto de su utilidad en la optimización del par árido-ligante, es necesario tener una idea de cómo influye en la velocidad de rotura. Tratándose de emulsiones catiónicas, a medida que éstas son más ácidas, es decir a medida que el pH disminuye, también disminuye la velocidad de rotura frente a un agregado determinado. Puede suceder que una emulsión de pH=2 sea demasiado lenta para una mezcla y se produzcan demoras en el inicio de la compactación y librado al tránsito. Aprovechando este comportamiento del pH, es posible preparar una emulsión de pH=3, la cual probablemente será algo más rápida, producirá un corte en menos tiempo y dará solución al problema.

En general, se debe encontrar con esta variable (y también con otras) una solución de compromiso: no se puede aumentar el pH en forma indiscriminada pues a valores más altos (digamos 4 ó 5) podría verse afectada la estabilidad y calidad de la emulsión por falta de ionización del emulsificante.

El ejemplo dado anteriormente tiene la finalidad de apuntalar la idea central: la rotura de una emulsión bituminosa frente a un cierto agregado mineral es función de una serie de factores que manejados adecuadamente pueden resolver satisfactoriamente la casi totalidad de los problemas constructivos. Este hecho ha de computarse como una indudable ventaja de los asfaltos emulsionados frente a los otros tipos.

Del análisis efectuado en el laboratorio según la calidad de los agregados, la emulsión utilizada en esta tesis es una emulsión catiónica de rotura lenta, CSS-1 (clasificación según ASTM), con un pH=1.9. En el Capítulo IV numeral 4.3.3.1, "Resultados obtenidos en el laboratorio", se indica en detalle el procedimiento de elección de emulsión.

2.2.5 Mecanismo de rotura

Habiendo ya establecido que una emulsión asfáltica rompe en contacto con un agregado pétreo, dejando sobre éste una película de cemento asfáltico de similares propiedades que el aplicado en caliente o diluido, estamos en condiciones de ir un poco más adelante, hacia el mecanismo fisicoquímico por el cual ese rompimiento se produce.

Aunque este proceso no será muy detallado llegaremos a una conclusión fundamental: el mecanismo de rotura de las emulsiones catiónicas determina que éstas tengan mejor adherencia que las aniónicas frente a la gran mayoría de los agregados minerales. Como consecuencia de este hecho, ya suficientemente experimentado como consta en la literatura, el consumo de emulsiones catiónicas en todo el mundo ha crecido continuamente desde su aparición en la década del 50 hasta el día de hoy, en que es enormemente superior al de las aniónicas. Estas últimas fueron las primeras en aparecer, pero están en franco retroceso en cuanto a sus cifras de producción y su interés se limita cada vez más a lo histórico¹.

¹ Las emulsiones catiónicas pueden elaborarse con mayores residuos asfálticos (60 – 68%) que las aniónicas (55-60%), lo cual redundaría en el costo de transporte.

Yendo directamente al mecanismo de corte (o rotura) de la emulsión sobre el material pétreo, existen dos procesos fundamentales que determinan que se produzca la separación de fases y la formación de una película de cemento asfáltico sobre el mineral. Estos procesos son, por un lado, la evaporación de agua y, por el otro, una reacción fisicoquímica entre el emulsificante y la superficie del pétreo. Ambos procesos son simultáneos en las emulsiones, pero mientras en las catiónicas prevalece la reacción fisicoquímica, en las aniónicas el proceso principal es el de evaporación de agua.

2.2.5.1 Rotura por evaporación

Este proceso implica que la evaporación del agua va incrementando progresivamente la concentración de la emulsión en contacto con el agregado, hasta que ésta pueda llegar a invertirse, es decir, transformarse en una emulsión “agua en asfalto”. Esta inversión se produce en las cercanías del 74% de contenido en asfalto, mientras el agua se irá liberando progresivamente.

Algunos autores puntualizan que recién cuando el secado se ha completado, hay un contacto entre el bitumen y el material granular. Como es de imaginar, esta forma de contribución a la rotura es altamente dependiente de las condiciones atmosféricas: será favorecida por altas temperaturas, vientos fuertes y bajos porcentajes de humedad ambiente. Por otro lado, la caída de una lluvia durante la ejecución de una obra puede revertir este proceso, regenerando la emulsión directa o/w (asfalto en agua) y “lavando” la mezcla.

Obviamente es muy riesgoso para una mezcla depender de una evaporación para que el asfalto se adhiera al agregado.

2.2.5.2 Mecanismo fisicoquímico

La vía fisicoquímica está relacionada con una verdadera reacción entre los iones del emulsificante y la superficie del agregado mineral.

Según se entiende modernamente, este proceso involucra una adhesión de los iones emulsificantes presentes en la fase acuosa sobre el árido. Esta adhesión tiene la característica de una reacción química en el sentido de que se forma un nuevo enlace.

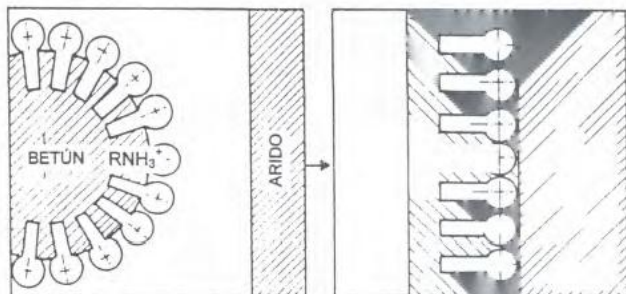
El fenómeno producido tiene dos importantes consecuencias:

- 1) La desaparición de iones del tensoactivo de la fase dispersante desequilibra la emulsión al inducir a los iones presentes en la interfase asfalto-agua a pasar a la solución para compensar a los que se han depositado.

- 2) La superficie del agregado se “tapiza” de iones del emulsificante, orientados con su parte iónica hacia el árido (por la unión química) y la cadena orgánica “hacia fuera”. Como resultado, la superficie del árido pasa a ser oleófila, es decir, que tiene una verdadera afinidad con el asfalto.

La conjunción de estos dos hechos, una emulsión desestabilizada y una superficie mineral transformada en oleófila, produce un depósito de cemento asfáltico sobre el granular, existiendo una ligazón real por la adhesión del emulsificante, tal como se muestra en la Figura 2.3.

Fig.2.3. Distribución de los iones del emulsificante sobre el árido.



Este proceso se inicia cuando la emulsión se pone en contacto con un agregado mineral (aunque éste se encuentre húmedo) y se completa en mayor o menor tiempo, según la velocidad de rotura de la emulsión y de acuerdo con la naturaleza química y granulometría del árido.

Dado que el primer efecto es el desplazamiento del agua de la superficie del pétreo, el mecanismo fisicoquímico depende del clima en muchísimo menor medida que la evaporación.

Si bien el mecanismo fisicoquímico todavía no se conoce en detalle, se puede decir con certeza que es el predominante para las emulsiones catiónicas en contacto con la mayor parte de los áridos, aún con los de neto predominio calcáreo.

En efecto, los emulsificantes catiónicos comunes tienen la propiedad de adherirse en los sitios activos de la mayoría de los agregados pétreos, variando en todo caso la velocidad de ese proceso de un agregado a otro: será más rápido para un árido silíceo (electronegativo) que para uno con predominio calcáreo (electropositivo).

Por tanto, la unión química formada tendrá el efecto de un mejorador de adherencia y es como consecuencia de esto, que las emulsiones catiónicas tienen un amplio rango de trabajo desde el punto de vista del agregado y su composición.

La menor dependencia respecto al clima y la mejora de adherencia producida por las emulsiones catiónicas, son otras dos ventajas importantes de las mismas.

En las mezclas de agregados con emulsiones aniónicas (excepto que aquellos sean calcáreos prácticamente puros, lo que no es frecuente) el mecanismo que genera la rotura de la emulsión es la evaporación del agua.

En este caso el panorama es totalmente distinto del que ofrecen las emulsiones catiónicas. Salvo en agregados calcáreos casi puros, como calcitas, dolomitas, etc., con el resto de los áridos (que son la gran mayoría) las emulsiones aniónicas exhiben comportamientos de rotura de notable lentitud, con fuerte dependencia de las condiciones climáticas y baja adherencia. Sólo en compuestos como los mencionados a modo de excepciones se pueden producir reacciones químicas entre el emulsificante y el agregado que justifiquen la adherencia.

Dado que esto sucede en casos muy especiales, al contrario de las emulsiones catiónicas, es un hecho aceptado y reconocido que en la mayoría de los casos constructivos posibles existirá una emulsión asfáltica catiónica que proporcione una solución más rápida y durable.

2.2.6 Caracterización de emulsiones asfálticas

Caracterizar emulsiones significa evaluar una serie de propiedades que:

- a) Las tipifiquen y definan en su calidad; para ello se cuenta con ensayos normalizados y especificaciones, los cuales se muestran en la Tabla 2.4.
- b) Manifiesten (o no) su afinidad con el agregado pétreo de obra. Los ensayos de este tipo no están normalizados en nuestro país.

Se considera imprescindible observar ambos grupos de propiedades a fin de estar en las mejores condiciones para la elección de una emulsión.

2.2.7 Especificaciones y ensayos para emulsiones asfálticas

Debido a la variedad de usos de las emulsiones asfálticas, se les fabrica con distintas viscosidades de cemento asfáltico base y diferentes roturas. AASHTO y ASTM adoptaron especificaciones para emulsiones asfálticas catiónicas y aniónicas (ver Tabla 2.4). Hay tres tipos normalizados de emulsiones aniónicas: rotura rápida (RS), rotura media (MS), y rotura lenta (SS). Para las catiónicas se dispone de los mismos tipos, designados como CRS, CMS y CSS que pueden tener una letra “h”, a continuación, que especifica que la emulsión se ha hecho con un cemento asfáltico base más viscoso.

2.2.8 Evaluación de afinidad con el agregado de obra.

En el diseño de toda mezcla asfáltica existen dos componentes: Los agregados minerales y el ligante asfáltico. Los agregados son el componente mayoritario de toda mezcla asfáltica (90-95%), de modo que resulta ventajoso transportar la emulsión en lugar de hacerlo con los áridos. Por tal motivo, deben aprovecharse al máximo los agregados locales. Este criterio no significa desconocer que hay zonas del país que no cuentan con

agregados que reúnan las condiciones mínimas para uso vial, en cuyo caso será inevitable efectuar el transporte de la totalidad o de una parte de los componentes minerales.

Tabla 2.4. Especificaciones y ensayos para emulsiones asfálticas.

Ensayo descrito en: AASHTO T59 ASTM D224	Tipo y No. de especificación					
	Aniónicas			Catiónicas		
	AASHTO M140 ASTM D977			AASHTO M208 ASTM D2397		
	RS	MS	SS	CRS	CMS	CSS
Viscosidad Saybolt Furol	X	X	X	X	X	X
Sedimentación	X	X	X	X	X	X
Estabilidad para almacenamiento	X	X	X	X	X	X
Clasificación	----	----	----	X	----	----
Desemulsión	X	----	----	X	----	----
Recubrimiento y resistencia al agua	----	X	----	----	X	----
Carga de partículas	----	----	----	X	X	X
Mezcla con cemento	----	----	X	----		X
Ensayo de tamiz	X	X	X	X	X	X
Destilación	X	X	X	X	X	X
Penetración	X	X	X	X	X	X
Ductilidad	X	X	X	X	X	X
Solubilidad en tricloroetileno	X	X	X	X	X	X

Sin embargo, características que hasta hace poco tiempo eran consideradas indeseables, desde el punto de vista de la afinidad asfalto-agregado (bajos equivalentes de arena, agregados poco friccionales) no constituyen un problema gracias al avance de la tecnología de las emulsiones, muy particularmente de las catiónicas.

Todos estos hechos conducen a que en la actualidad se considere más racional adaptar la emulsión asfáltica al agregado, y no a la inversa.

Es tarea del proyectista seleccionar, de entre las emulsiones que ofrece el mercado, la que mejor se adapte a las características del agregado elegido, lo que significa que con dicha emulsión se deben cumplir los siguientes requisitos:

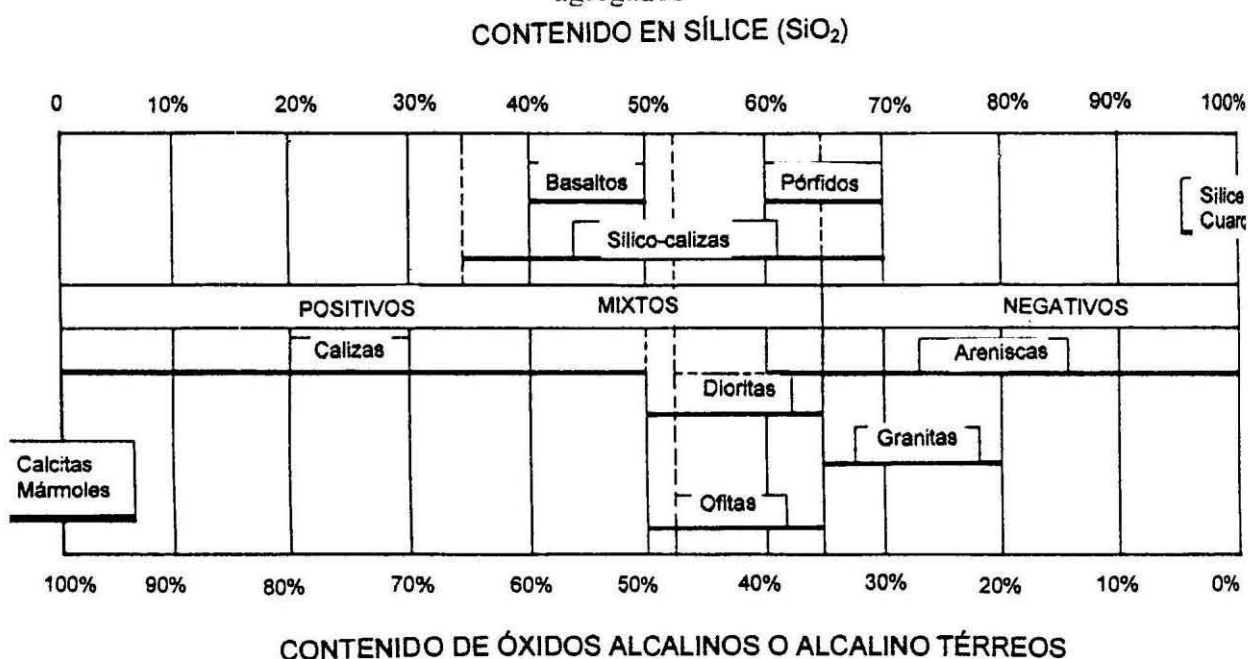
- Obtener un recubrimiento inicial no menor del 80%, tanto en mezclas como en riegos.
- Efectuar mezclados en un tiempo razonable sin rompimiento prematuro, conservando la buena trabajabilidad de la mezcla, todo esto adaptado a la maquinaria disponible.
- Lograr que la rotura de la emulsión, una vez recubierto el material, se produzca en un lapso relativamente breve, dando lugar a un rápido desarrollo de cohesión, acto importante para iniciar la compactación.
- Producir una película que, una vez curada, presente resistencia a la acción perjudicial del agua (adherencia pasiva).

Durante mucho tiempo, el paso fundamental de decidir entre una emulsión aniónica y una catiónica estuvo fuertemente influenciado por la clasificación de los agregados

basada en los contenidos porcentuales de sílice y de óxidos alcalino-térreos, tal como se muestra en la Figura 2.5.

La experiencia ha demostrado que mientras las emulsiones aniónicas deben limitarse en su uso a agregados definitivamente calcáreos (parte izquierda de la Figura 2.5), las catiónicas exhiben un comportamiento satisfactorio con la mayoría de los agregados. Esto está indudablemente relacionado con la propiedad de los emulsificantes catiónicos de adherirse sobre las superficies minerales.

Fig.2.5. Contenido porcentuales de sílice y de óxidos alcalinos y alcalino-térreos en los agregados



Es así como, de acuerdo a antecedentes nacionales y extranjeros, resulta aconsejable dar prioridad a una emulsión catiónica frente a una aniónica, aún tratándose de agregados netamente calcáreos. Este punto de vista está apoyado por algunos autores especialistas en el tema, coincidentes en destacar la mejor afinidad de las emulsiones catiónicas respecto de las aniónicas con la mayoría de los agregados pétreos.

El requerimiento del punto c) es más fácil de satisfacer por las emulsiones catiónicas, donde la rotura se inicia apenas las partículas de asfalto emulsionado entran en contacto con el agregado. La liberación de agua, y el desarrollo de cohesión se producen con mayor velocidad y son afectados en mucho menor medida por las condiciones climáticas. La liberación de agua es un hecho que hace claramente perceptible a la rotura de la emulsión.

El desarrollo de cohesión es una etapa caracterizada por un aumento de viscosidad del film que recubre las partículas debido a la progresiva transformación de la emulsión en cemento asfáltico. Dicho aumento de viscosidad se produce a diferente velocidad según el tipo de emulsión catiónica que se trate.

En el mercado existen emulsificantes de muy variadas composiciones, pudiéndose así conseguir para un agregado dado una gama de velocidades de adherencia y consecuentemente de tiempos de rotura. Entre las emulsiones lentas por ejemplo, se tienen las denominadas emulsiones superestables y más recientemente, se cuenta con las emulsiones lentas de curado rápido.

En la elección de la emulsión catiónica apta para mezclar con el agregado en cuestión, el primer criterio que suele seguirse es que la misma sea definida como lenta, es decir, que cumpla el ensayo de mezcla con cemento (residuo menor que 2%).

Sin embargo, el satisfacer dicho requerimiento normalizado, no asegura por sí solo que la emulsión sea capaz de reunir los cuatro requisitos antes enunciados, frente al árido de obra. En otras palabras, no toda emulsión catiónica será automáticamente apta para esa mezcla por el solo hecho de ser lenta. Al no existir ensayos normalizados que diferencien a las emulsiones lentas entre sí, se hace imprescindible evaluar la compatibilidad de cada emulsión con el agregado seleccionado, en especial si el mismo posee un bajo equivalente de arena.

A la inversa, existen emulsiones que no siendo lentas, permiten el mezclado con buen recubrimiento sobre agregados que contengan un cierto porcentaje de finos. Estas emulsiones se pueden denominar medias y tienen un campo de aplicación definido. La experiencia indica que su normalización se hace difícil por falta de un método suficientemente general.

En el caso de los tratamientos superficiales, donde la aplicación de la emulsión se hace por riego sobre el árido extendido sobre la calzada, parece inapropiado evaluar la afinidad del par árido-asfalto mediante un ensayo que involucre un mezclado debido a que, el mezclado aporta una energía que acelera el corte de la emulsión, lo que puede llevar a desestimar el uso de un producto. Si el agregado grueso se embebe por simple inmersión y luego se efectúa un curado en condiciones ambientales, la película de asfalto se habrá formado por un mecanismo mucho más aproximado al del riego.

Una vez confirmado que una emulsión dada es capaz de mezclar y/o recubrir el pétreo de obra, debe verificarse el comportamiento de la película asfáltica en el tiempo, es decir, su adherencia pasiva.

No existe un ensayo universalmente aceptado para medir o comparar adherencia asfalto-árido. Los métodos disponibles tienen fundamentos muy variados, desde someter la mezcla a la acción del agua a temperatura ambiente en forma estática, hasta aplicar un tiempo determinado de ebullición con agua o solución acuosa de alguna sal a una mezcla curada. Por otro lado, algunos diseñadores introducen factores externos que pretenden reproducir la acción del tránsito.

En la medida en que se desarrollen métodos que reproduzcan fielmente las condiciones más severas a las que se verá sometido el pavimento asfáltico, como es la acción abrasiva del tránsito en presencia del agua, los métodos ganarán en aceptación. Asimismo, es de desear que los procedimientos que se pongan en práctica tiendan a hacer desaparecer los factores de subjetividad como mezclado manual, evaluación visual de un recubrimiento; o de factores no representativos, como granulometrías distintas a las de obra, agregados estándar, etc.

La ASTM tiene el siguiente procedimiento normalizado para la evaluación del recubrimiento y pelado de mezclas asfalto-piedra (D-1664-80). Se trata de un ensayo “pasa-no pasa”, aplicable a mezclas de emulsiones con agregados de obra. Consiste en mezclar manualmente, curar durante dos horas a 135°C y luego sumergir en agua destilada a temperatura ambiente durante 16-18 horas. A juicio de los autores este ensayo es poco exigente y el curado de la mezcla no representa las condiciones de curado en obra.

Por otro lado, existe también el método ASTM D-3625-83 que evalúa el efecto del agua sobre los agregados recubiertos de asfalto, denominado ensayo rápido de campo. En principio, este ensayo es aplicable a mezclas en caliente no compactadas y el efecto del agua se aprecia luego de someter la mezcla durante un minuto a la acción del agua en ebullición. Consideramos que es factible aplicar este ensayo a las mezclas en frío hechas con emulsión siempre y cuando se las someta a un curado previo, que puede ser por temperatura alta o ambiente. Queda como elemento discutible el hecho de que el ensayo se realice en condiciones demasiado críticas y no representativas (agua en ebullición). Los resultados son seguros cuando el recubrimiento después del hervido es superior a 95%, pero si la mezcla “no pasa el ensayo”, no se puede afirmar que la adherencia entre la emulsión y el árido sea deficiente, dado que la mezcla en servicio nunca estará sometida a condiciones tan exigentes.

En conclusión, es importante resaltar que el proceso de adaptar la emulsión al agregado pétreo de obra, es decir, la optimización del par árido-ligante, es un proceso de singular importancia.

2.2.9 Acopio y manipulación de emulsiones.

Una emulsión asfáltica es un sistema naturalmente heterogéneo que debe su estabilidad al grado de división de las partículas dispersas de asfalto, logrado por la acción mecánica de un molino coloidal y por la incorporación de un agente tensoactivo.

Con el paso del tiempo algunos factores externos pueden llegar a producir alteraciones que en algunos casos son irreversibles.

Entre esos factores podría mencionarse el calentamiento. La evaporación de agua hace aumentar el residuo y puede aproximarlos al valor crítico de 74% (residuo al cual se produce la inversión de la emulsión). Consecuentemente deben evitarse calentamientos prolongados y/o localizados. Bajo ninguna circunstancia la temperatura de una masa de emulsión debe superar los 85°C.

En lo que se refiere a temperaturas muy bajas, sería ideal almacenar emulsiones por encima de 10°C. Cuando las circunstancias exigen un acopio a temperaturas muy inferiores a los 10°C, será necesario exigir que la emulsión sea recuperable después del congelamiento, lo cual puede probarse por medio del ensayo ASTM D-244-Item 49, “Freezing test”.

Otro factor importante es el movimiento de una masa de emulsión. El mismo puede hacerse necesario si una emulsión permanece estanca durante algunas semanas, con el fin

de homogeneizar su residuo asfáltico. En tal caso, debe evitarse que el movimiento esté acompañado del ingreso de aire o que sea demasiado prolongado.

Aún siendo obvio, no parece ocioso recalcar la necesidad de la limpieza del tanque a emplear, si el mismo ha contenido otro tipo de asfalto emulsionado o productos químicos que puedan resultar incompatibles con la emulsión. En caso de dudas, se puede recurrir a ensayos de laboratorio que confirmen o no la incompatibilidad.

2.2.10 Almacenaje y transporte

El almacenaje de emulsiones asfálticas puede efectuarse en tanques de hierro o cisternas con paredes de chapa. En el caso de las emulsiones catiónicas, a pesar de su pH netamente ácido y su relativamente alta concentración de iones cloruro, el cemento asfáltico que se va depositando sobre las paredes protege al material del tanque de la corrosión.

El sistema que ha demostrado ser el más eficiente para el acopio de estos productos es el de tanques cilíndricos verticales. Si los tanques estuvieran ubicados en posición horizontal, en primer lugar, la superficie libre o interfase emulsión-aire sería mucho mayor que en un tanque vertical de igual volumen. Esto conduciría a la formación de una nata de asfalto mucho más importante.

Con respecto a esta nata (también denominada capa o piel) su formación en sí no es perjudicial ni indica que una emulsión se halle en mal estado. Por el contrario, ella misma protege al resto de la masa de la posterior evaporación y de la entrada accidental de materiales extraños. Esta piel debe ser preservada, para lo cual el caño de alimentación del tanque debe atravesarla y efectuar su descarga a nivel del fondo del mismo. Si la alimentación se llevase a cabo por la parte superior, la emulsión al ingresar rompería la nata preexistente y la dispersaría por todo el tanque, causando innumerables problemas de bombeo, taponamiento de filtros, etc. (Ver Figura 2.5)

Una forma de evitar que en un tanque se forme una capa demasiado gruesa, consiste en agregar algún solvente sobre la superficie de la emulsión, a razón de 1 l/m² de la misma, siempre que el tanque esté lleno, por lo menos, en sus dos terceras partes. Dicha cantidad no afecta las propiedades de la emulsión ni de su asfalto base.

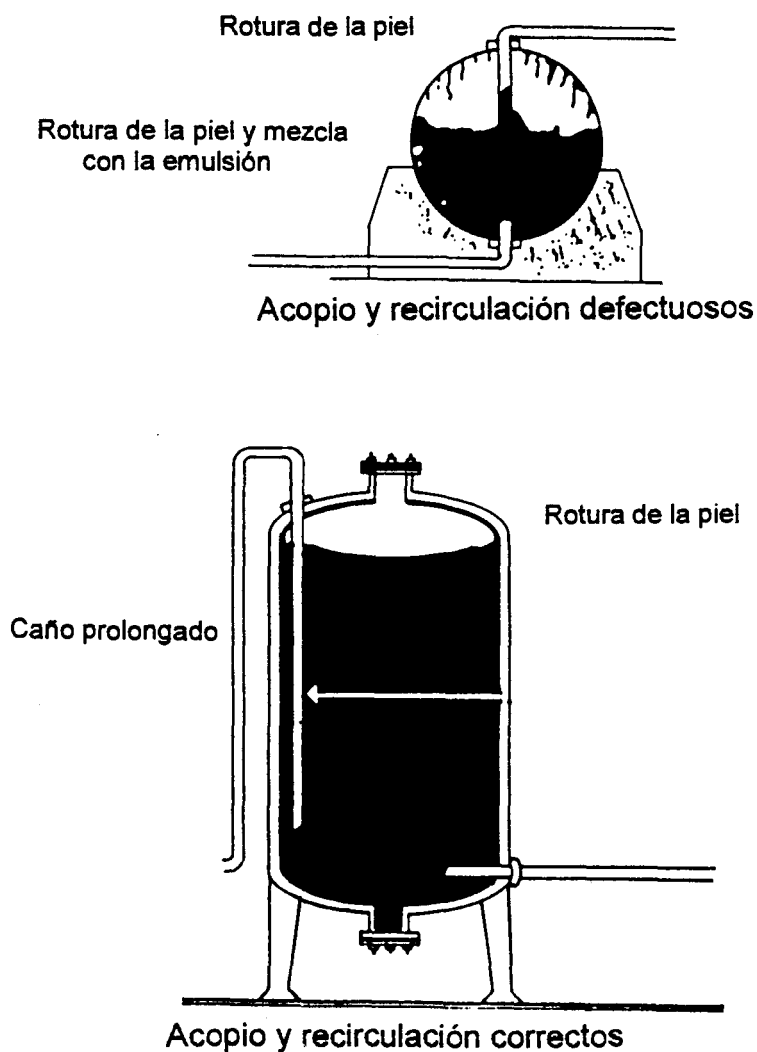
El caño de salida de emulsión del tanque, tanto para carga de camiones como para recirculación, estará ubicado cerca del fondo y en posición diametralmente opuesta a la del caño de alimentación.

Para usar una emulsión que lleva varios días en stock, hay que recircularla previamente mediante una bomba adecuada, durante un tiempo tal que pase un 50% del contenido total, lo cual se calcula conociendo el volumen de emulsión y el caudal de la bomba.

Con frecuencia a las bombas a emplear para este fin (como así también para trasvase), deberán ser de tipo hermético, para evitar que la aspiración de aire produzca espuma, cuyos efectos nocivos son, entre otros, incrementar innecesariamente la magnitud de la capa e inestabilizar la emulsión.

La bomba más adecuada para recirculación y trasvase es la centrífuga, siempre que no supere las 1400 rpm, aproximadamente. Bombas de mayor número de revoluciones pueden provocar la rotura de la emulsión y con ello, el consiguiente atascamiento de la bomba por separación de asfalto.

Figura 2.5. Acopio y recirculación de emulsiones.



2.2.11 Aplicaciones de las emulsiones. Clasificación

Si bien el uso de las emulsiones asfálticas en las obras viales es un tema ya bastante tratado en la literatura, se considera importante insistir en detalles como el estudio de los materiales, métodos de dosificación y procedimientos constructivos, que son decisivos para la obtención de los fines perseguidos.

En líneas generales, las aplicaciones de las distintas emulsiones catiónicas pueden resumirse en la Tabla 2.6.

Además, se pueden clasificar cada uno de los trabajos viales mencionados en este cuadro, como sigue:

1. Riegos bituminosos:

- Paliativo de polvo
- De imprimación
- De liga
- De curado
- En negro

2. Revestimientos bituminosos superficiales

A. Tratamientos:

- De sellado
- Simples
- Dobles
- Triples

B. Lechadas asfálticas (Slurry Seal)

3. Mezclas en frío tipo concreto

4. Estabilización bituminosa de suelos

Tabla 2.6 Aplicaciones de las distintas emulsiones catiónicas.

Emulsión catiónica	Tipo de obra vial donde es aplicable
Rápida (RCC)	<ul style="list-style-type: none"> - Riegos bituminosos sobre superficies limpias y no absorbentes. - Tratamientos superficiales con agregados pétreos libres de polvo.
Media (RMC)	<ul style="list-style-type: none"> - Tratamientos superficiales con agregados polvorientos. - Mezclas abiertas y semidensas para capa de rodamiento y bacheos. - Estabilización de arenas de alto equivalente de arena.
Lenta (Superestable) (RLC)	<ul style="list-style-type: none"> - Riegos sobre superficies absorbentes y/o polvorientos. - Tratamientos superficiales con áridos muy sucios y/o en clima muy cálido - Mezclas semidensas y densas (tipo concreto, sheet, lechadas, estabilizaciones de suelos) en climas templados o cálidos.
Lentas de Curado rápido	<ul style="list-style-type: none"> - Estabilización de arenas de médanos; suelos y mezclas suelo arena, con bajo tenor de agua de mezclado. - Mezclas semidensas y densas para capa de rodamiento y bacheos (tipo concreto, sheet, lechada) en climas fríos y/o húmedos, o con exigencia de rápida habilitación al tránsito.

CAPITULO III

MEZCLAS ASFALTICAS

3.1 Introducción

En una mezcla asfáltica de pavimentación, el asfalto y el agregado son combinados en proporciones exactas. Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y eventualmente, el desempeño de la misma como pavimento terminado. Existen dos métodos de diseño comúnmente utilizados para determinar las proporciones apropiadas de asfalto y agregado en una mezcla asfáltica en caliente. Ellos son el Método Marshall (AASHTO T245 o ASTM D15559) y el Método Hveem (AASHTO T246 y T247 o ASTM D1560 y D1561). Cada método contiene características y ventajas singulares y cualquiera de ellos puede ser usado con resultados satisfactorios. En nuestro medio el método comúnmente utilizado es el Método Marshall.

No existe un método de diseño universalmente aceptado para mezclas con asfaltos diluidos o emulsionados; pero casi todos aquellos en uso emplean partes o modificaciones de los métodos arriba mencionados.

Para mezclas con asfaltos diluidos, el Instituto del Asfalto presenta un procedimiento de diseño descrito en el numeral 3.4 de este capítulo¹.

Para mezclas emulsión asfáltica-agregado, el Instituto del Asfalto presenta dos métodos, el primero es el Método de la División de la Costa Pacífica de Estados Unidos, basado en el procedimiento Hveem más una prueba de módulo de Rebote (resilient). El segundo es el Método de Illinois, basado en un procedimiento de diseño de mezcla Marshall modificado y una prueba de durabilidad húmeda, algo similar al método descrito para mezclas con asfaltos diluidos².

Este último método de diseño es el empleado por los laboratorios de emulsiones asfálticas en la capital (únicos existentes en Perú) y es el que aquí se presenta. (Ver numeral 3.5).

3.2 Características y comportamiento de la mezcla

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

- Densidad de la mezcla
- Vacíos de aire, o simplemente vacíos

¹ Manual de Mezclas Asfálticas en Frío (Serie MC-14, año 1977) – Instituto del Asfalto.

² Manual de mezclas asfálticas con emulsión – Instituto del Asfalto

- Vacíos en el agregado mineral
- Contenido de asfalto

3.2.1 Densidad

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

En las pruebas y el análisis de mezclas, la densidad de la muestra compactada se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cúbico (kg/m³) o libras por pie cúbico (lb/ft³). La densidad es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000 kg/m³ ó 62.416 lb/ft³). La densidad obtenida en el laboratorio se convierte en la densidad patrón y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es o no la adecuada. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad del laboratorio. Esto se debe a que muy rara vez la compactación in-situ logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación de laboratorio.

3.2.2 Vacíos de aire (o simplemente vacíos)

Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios a donde pueda fluir el asfalto durante esta compactación adicional.

La durabilidad de un pavimento asfáltico está en función del contenido de vacíos. La razón de esto es que cuando menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie.

La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad, menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa.

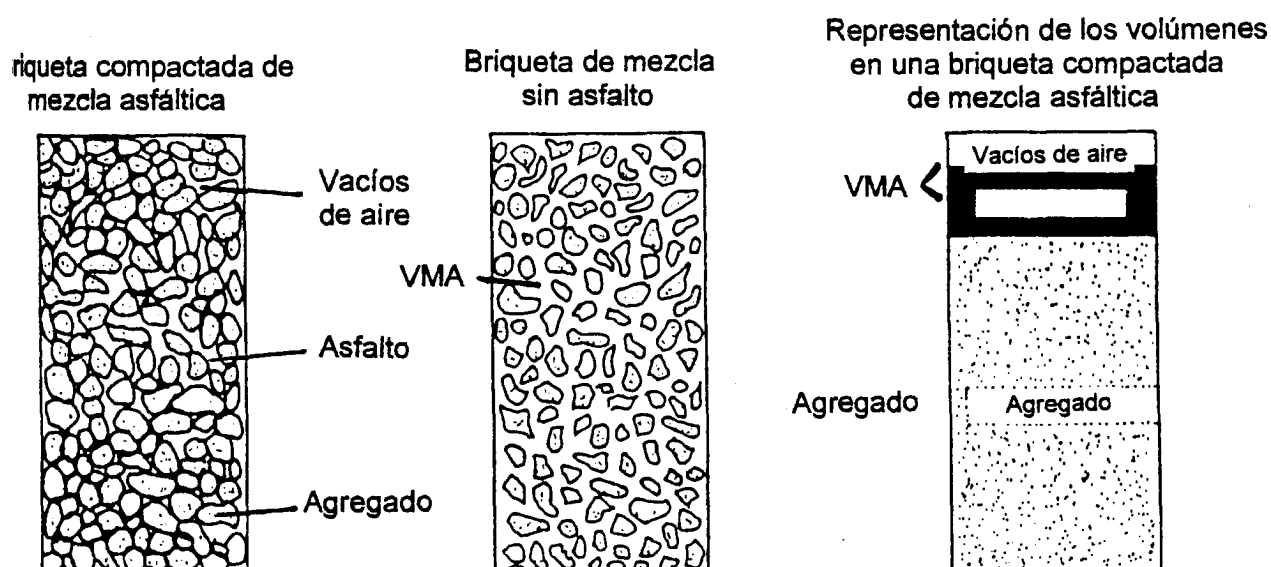
3.2.3 Vacíos en el agregado mineral

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

El VMA representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde, por absorción, en el agregado) y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. La Figura 3.1 ilustra el concepto de VMA. Los valores requeridos se muestran en la Tabla 4.13 del Capítulo IV.

Para que pueda lograrse un espesor durable de película de asfalto, se deben tener valores mínimos de VMA. Un aumento en la densidad de la graduación del agregado, hasta el punto donde se obtengan valores de VMA por debajo del mínimo especificado, puede resultar en películas delgadas de asfalto y en mezclas de baja durabilidad y apariencia seca. Por lo tanto, es contraproducente y perjudicial, para la calidad del pavimento, disminuir el VMA para economizar en el contenido de asfalto.

Fig.3.1. Ilustración del VMA en una probeta de mezcla compactada.



3.2.4 Contenido de asfalto

La proporción de asfalto en la mezcla es importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio, y luego controlada con precisión en la obra.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado, tales como granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total y mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir, uniformemente, todas las partículas. Por otro lado, las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total.

La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto es mayor cuando hay relleno mineral (fracciones muy finas de agregado que pasan a través del tamiz No. 200). Los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral, pueden absorber, literalmente, gran parte del contenido de asfalto, resultando en una mezcla inestable y seca. Las pequeñas disminuciones tienen el efecto contrario: poco relleno mineral resulta en una mezcla muy rica (húmeda). Cualquier variación en el contenido de relleno mineral causa cambios en las propiedades de la mezcla, haciéndola variar de seca a húmeda. Si una mezcla contiene poco, o demasiado, relleno mineral, cualquier ajuste arbitrario para corregir la situación, probablemente la empeorará. En vez de hacer ajustes arbitrarios, se deberá efectuar un muestreo y unas pruebas apropiadas para determinar las causas de las variaciones y, si es necesario, establecer otro diseño de mezcla.

La capacidad de absorción (habilidad para absorber asfalto) del agregado usado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Esto se debe a que se tiene que agregar suficiente asfalto a la mezcla para permitir la absorción y para que además se puedan cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto. En general, se habla de dos tipos de asfalto cuando se refieren al asfalto absorbido y al no absorbido: contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto.

El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre las superficies de los agregados. El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto.

La capacidad de absorción de un agregado es, obviamente, una característica importante en la definición del contenido de asfalto en una mezcla. Generalmente se conoce la capacidad de absorción de las fuentes comunes de agregado, pero es necesario efectuar ensayos cuidadosos cuando son usadas fuentes nuevas.

3.3 Propiedades consideradas en el diseño de mezclas

Las buenas mezclas asfálticas trabajan bien debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logra obtener las propiedades deseadas. Hay varias propiedades que contribuyen a la buena calidad de pavimentos de mezclas asfálticas. Estas incluyen la estabilidad, la durabilidad, la impermeabilidad, la trabajabilidad, la flexibilidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento.

El objetivo primordial del procedimiento de diseño de mezclas es el de garantizar que la mezcla de pavimentación posea cada una de estas propiedades.

3.3.1 Estabilidad

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

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

La estabilidad de una mezcla depende de la fricción y la cohesión interna. La fricción interna en las partículas de agregado (fricción entre partículas) está relacionada con características del agregado tales como la forma y textura superficial. La cohesión resulta de la capacidad ligante del asfalto. Un grado propio de fricción y cohesión interna en la mezcla, previene que las partículas de agregado se desplacen unas respecto a otras debido a las fuerzas ejercidas por el tráfico.

En términos generales, entre más angular sea la forma de las partículas de agregado y más áspera sea su textura superficial, más alta será la estabilidad de la mezcla.

Cuando no hay agregados disponibles con características de alta fricción interna, se pueden usar mezclas más económicas, en lugares donde se espere tráfico liviano, utilizando agregados con valores menores de fricción interna.

La fuerza ligante de la cohesión aumenta directamente con la frecuencia de carga (tráfico). La cohesión también aumenta a medida que la viscosidad del asfalto aumenta o a medida que la temperatura del pavimento disminuye. Adicionalmente y hasta cierto nivel, la cohesión aumenta con incrementos en el contenido de asfalto. Cuando se sobrepasa este nivel, los aumentos en el contenido de asfalto producen una película demasiado gruesa sobre las partículas de agregado, lo cual resulta en pérdidas de fricción entre partículas. Existen muchas causas y efectos asociados con una estabilidad insuficiente en el pavimento. La Tabla 3.2 enuncia varias de estas causas y efectos.

Tabla 3.2. Causas y efectos de inestabilidad en el pavimento

ESTABILIDAD BAJA	
Causas	Efectos
Exceso de asfalto en la mezcla	Ondulaciones, ahuellamiento y afloramiento o exudación
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente durante un cierto tiempo; dificultad para la compactación
Agregado redondeado con o sin pocas, superficies trituradas	Ahuellamiento y canalización

3.3.2 Durabilidad

La durabilidad de un pavimento asfáltico es su habilidad para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto (polimerización y oxidación) y separación de las películas de asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, el tránsito, o una combinación de ambos.

Generalmente, la durabilidad de una mezcla puede ser mejorada de tres formas. Primero: usando la mayor cantidad posible de asfalto; segundo, usando una graduación densa de agregado resistente a la separación y tercero, diseñando y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad.

La mayor cantidad posible de asfalto aumenta la durabilidad porque las películas gruesas de asfalto no se envejecen o endurecen tan rápido como lo hacen las películas delgadas. En consecuencia, el asfalto retiene, por más tiempo, sus características originales. Además, el máximo contenido posible de asfalto sella eficazmente un gran porcentaje de vacíos interconectados en el pavimento, haciendo difícil la penetración del aire y del agua. Por supuesto, se debe dejar un cierto porcentaje de vacíos en el pavimento para permitir la expansión del asfalto en los tiempos cálidos.

Una graduación densa de agregado firme, duro y resistente a la separación, contribuye de tres maneras a la durabilidad del pavimento. Una graduación densa proporciona un contacto más cercano entre las partículas de agregado, lo cual mejora la impermeabilidad de la mezcla. Un agregado firme y duro resiste la desintegración bajo las cargas del tránsito. Un agregado resistente a la separación resiste la acción del agua y el tránsito, las cuales tienden a separar la película de asfalto de las partículas de agregado, conduciendo a la desintegración del pavimento. La resistencia de una mezcla a la separación puede ser mejorada, bajo ciertas condiciones, mediante el uso de compuestos adhesivos o rellenos minerales como la cal hidratada.

La intrusión de aire y agua en el pavimento puede minimizarse si se diseña y compacta la mezcla para darle al pavimento la máxima impermeabilidad posible. Existen muchas causas y efectos asociados con una poca durabilidad del pavimento. La Tabla 3.3 presenta una lista de algunas de ellas.

Tabla 3.3. Causas y efectos de una poca durabilidad

POCA DURABILIDAD	
Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración
Agregados susceptibles al agua (hidrofilicos)	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando un pavimento desgastado o desintegrado

3.3.3 Impermeabilidad

La impermeabilidad de un pavimento asfáltico es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior, o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada y es así como gran parte de las discusiones sobre vacíos en las secciones de diseño de mezcla se relacionan con impermeabilidad. Aunque el contenido de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de un pavimento, la naturaleza de estos vacíos es más importante que su cantidad. El grado de

impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados, y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento.

Aunque la impermeabilidad es importante para la durabilidad de las mezclas compactadas, virtualmente todas las mezclas asfálticas usadas en la construcción de carreteras tienen cierto grado de permeabilidad. Esto es aceptable siempre y cuando la permeabilidad esté dentro de los límites especificados. La Tabla 3.4 cita ciertas causas y efectos relacionados con valores bajos de impermeabilidad para pavimentos asfálticos de graduación densa.

Tabla 3.4. Causas y efectos de la permeabilidad

MEZCLA DEMASIADO PERMEABLE	
Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto	Las películas delgadas de asfalto causarán, tempranamente, un envejecimiento y una desintegración de la mezcla
Alto contenido de vacíos en la mezcla	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en el pavimento, causando oxidación y desintegración de la mezcla
Compactación inadecuada	Resultará en vacíos altos en el pavimento, lo cual conducirá a infiltración de agua y baja estabilidad

3.3.4 Trabajabilidad

La trabajabilidad está descrita por la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquellas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. La trabajabilidad puede ser mejorada modificando los parámetros del diseño de mezcla, el tipo de agregado y/o la granulometría.

Las mezclas gruesas (mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una tendencia a segregarse durante su manejo y también pueden ser difíciles de compactar. A través de mezclas de prueba en el laboratorio puede ser posible adicionar agregado fino, y tal vez asfalto, a una mezcla gruesa, para volverla más trabajable. En tal caso se deberá tener cierto cuidado para garantizar que la mezcla modificada cumpla con los otros criterios de diseño, tales como contenido de vacíos y estabilidad.

Un contenido demasiado alto de relleno mineral también puede afectar la trabajabilidad. Puede ocasionar que la mezcla se vuelva muy viscosa, haciendo difícil su compactación.

La trabajabilidad es especialmente importante en sitios donde se requiere colocar y rastrillar a mano cantidades considerables de mezcla, como por ejemplo alrededor de tapas de alcantarillado, curvas pronunciadas y otros obstáculos similares.

Las mezclas que son fácilmente trabajables o deformables se conocen como mezclas tiernas. Las mezclas tiernas son demasiado inestables para ser colocadas y

compactadas apropiadamente. Usualmente son el producto de una falta de relleno mineral, demasiada arena de tamaño mediano, partículas lisas y redondeadas de agregado y/o demasiada humedad en la mezcla.

Aunque el asfalto no es la principal causa de los problemas de trabajabilidad, sí tiene algún efecto sobre esta propiedad. Debido a que la temperatura de mezcla afecta la viscosidad del asfalto, una temperatura demasiado baja hará que la mezcla sea poco trabajable, mientras que una temperatura demasiado alta podrá hacer que la mezcla se vuelva tierna. El grado y el porcentaje de asfalto también pueden afectar la trabajabilidad de la mezcla.

La Tabla 3.5 cita algunas causas y efectos relacionados con la trabajabilidad de mezclas de pavimentación.

Tabla 3.5. Causas y efectos de problemas en la trabajabilidad

MALA TRABAJABILIDAD	
Causas	Efectos
Tamaño máximo de partícula: grande	Superficie áspera, difícil de colocar
Demasiado agregado grueso	Puede ser difícil de compactar
Temperatura muy baja de mezcla	Agregado sin revestir, mezcla poco durable; superficie áspera, difícil de compactar
Demasiada arena de tamaño medio	La mezcla se desplaza bajo la compactadora y permanece tierna o blanda
Bajo contenido de relleno mineral	Mezcla tierna, altamente permeable
Alto contenido de relleno mineral	Mezcla muy viscosa, difícil de manejar y poco durable

3.3.5 Flexibilidad

Flexibilidad es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante, sin agrietarse. La flexibilidad es una característica deseable en todo pavimento asfáltico debido a que virtualmente todas las subrasantes se asientan (bajo cargas) o se expanden (por expansión del suelo).

Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada de bajo contenido de asfalto. Algunas veces los requerimientos de flexibilidad entran en conflicto con los requisitos de estabilidad, de tal manera que se debe buscar el equilibrio de los mismos.

3.3.6 Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga de un pavimento es la resistencia a la flexión repetida bajo cargas de tránsito. Investigaciones han demostrado que los vacíos (relacionados con el contenido de asfalto) y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga. A medida que el porcentaje de vacíos en un pavimento aumenta, ya

sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento disminuye. En este caso, el período de tiempo durante el cual un pavimento en servicio es adecuadamente resistente a la fatiga será menor. Así mismo, un pavimento que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga.

La capacidad de soporte de la subrasante y las características de resistencia y espesor de un pavimento, tienen mucho que ver con su vida útil y con la prevención del agrietamiento asociado con cargas de tránsito. Los pavimentos de gran espesor sobre subrasantes resistentes no se flexionan tanto por la acción de las cargas como los pavimentos delgados o aquellos que se encuentran sobre subrasantes débiles.

La Tabla 3.6 presenta una lista de las causas y efectos que conducen a una mala resistencia a la fatiga.

Tabla 3.6. Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga

MALA RESISTENCIA A LA FATIGA	
Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto	Agrietamiento por fatiga
Alto porcentaje de vacíos	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga
Falta de compactación	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga
Espesor inadecuado de pavimento	Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga

3.3.7 Resistencia al deslizamiento

Es la habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie está mojada. Para obtener buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento (hydroplaning). La resistencia al deslizamiento se mide en el terreno con una rueda normalizada bajo condiciones controladas de humedad en la superficie del pavimento y a una velocidad de 65 km/hr.

Una superficie áspera y rugosa de pavimento tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa. La mejor resistencia al deslizamiento se obtiene con un agregado de textura áspera, en una mezcla de gradación abierta y con tamaño máximo de 9.5mm (3/8 pulgada) a 12.5mm (1/2 pulgada). Además de tener una superficie áspera, los agregados deben resistir el pulimiento (alisamiento) bajo el tránsito. Los agregados calcáreos son más susceptibles al pulimiento que los agregados silíceos. Las mezclas inestables que tienden a deformarse o a exudar (flujo de asfalto a la superficie) presentan problemas graves de resistencia al deslizamiento.

La Tabla 3.8 presenta una lista de las causas y efectos relacionados con una mala resistencia al deslizamiento.

Tabla 3.8. Causas y efectos de poca resistencia al deslizamiento

POCA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO	
Causas	Efectos
Exceso de asfalto	Exudación, poca resistencia al deslizamiento
Agregado mal graduado o con mala textura	Pavimento liso, posibilidad de hidroplaneo
Agregado pulido en la mezcla	Poca resistencia al deslizamiento

3.4 Método de diseño para mezclas con asfaltos diluidos usando el procedimiento del ensayo Marshall

3.4.1 Aplicabilidad

Este método es aplicable para mezclas de pavimentación y/o de mantenimiento conteniendo cualquier tipo de asfalto diluido (RC, MC o SC) y un agregado mineral bien graduado con un tamaño máximo de 25mm (1 pulg.) o menor. Debe ser usado sólo para el diseño en laboratorio mas no para un control de campo.

El método y los criterios de ensayo recomendados son aplicables a mezclas para carpetas asfálticas con bajo (EAL de diseño $< 10^4$) o mediano (EAL de diseño entre 10^4 y 10^6) volúmenes de tráfico. Para el caso de bases y sub bases estabilizadas con asfalto diluido es aplicable para cualquier volumen de tráfico: bajo, mediano o pesado (EAL de diseño $> 10^6$)¹

3.4.2 Bosquejo del método

El procedimiento de diseño consiste en los siguientes pasos:

(1) Seleccionar un agregado que cumpla con los requerimientos y especificaciones del proyecto.

(2) Seleccionar el tipo de asfalto diluido a utilizar según el tipo de agregado, mezcla, equipo en el lugar y condiciones climáticas.

(3) Se preparan especímenes con varios contenidos de asfalto, como en el método Marshall, excepto que la temperatura de compactación está basada en la viscosidad del asfalto después que la mezcla ha sido curada para perder el solvente.

(4) Los especímenes son analizados para verificar el contenido de vacíos en la mezcla y en el agregado mineral (VMA). La estabilidad y flujo Marshall son determinados a una temperatura de 25°C.

¹ Principios de Construcción de Mezcla Asfáltica en Caliente – Instituto del Asfalto (MS-22)

(5) El óptimo contenido de asfalto es elegido del porcentaje de asfalto diluido al cual la mezcla de pavimentación, después de haber sido curada para perder el solvente, satisfaga de la mejor manera todos los criterios de diseño.

(6) Los criterios de diseño forman la base para determinar si la mezcla de pavimentación será satisfactoria para el óptimo contenido de asfalto.

3.5 Método propuesto de Illinois para el diseño de mezclas en frío emulsión-agregado

3.5.1 Aplicabilidad

Este método de diseño para mezclas en frío emulsión asfáltica-agregado está basado en una investigación adelantada en la Universidad de Illinois usando el método de diseño de mezclas Marshall modificado y el ensayo de durabilidad húmeda. El método y los criterios de ensayo recomendados son aplicables a mezclas para capas de base de pavimentos con bajos volúmenes de tráfico y que contengan cualquier grado de emulsión asfáltica y agregado mineral con gradación densa y tamaños máximos de una pulgada (25 mm) o menos. Se recomienda este diseño para mezclas in situ o mezclas en planta preparadas a la temperatura ambiente. El procedimiento intenta simular lo más aproximadamente posible las condiciones reales del campo.

3.5.2 Bosquejo del método

El procedimiento del método comprende las siguientes partes principales:

(1) Ensayos de calidad del agregado. Se realizan ensayos para determinar las propiedades del agregado y su conveniencia para el uso en mezclas con emulsiones asfálticas.

(2) Ensayos de calidad de las emulsiones asfálticas. Se realizan ensayos para determinar las propiedades y calidad de la emulsión.

(3) Tipo y cantidad aproximada de emulsión. Se usa un procedimiento simplificado para estimar el contenido tentativo de asfalto residual para un agregado dado. Usando el contenido de asfalto tentativo se realizan ensayos de recubrimiento para determinar la conveniencia y tipo de emulsión, cantidad de emulsión y agua requerida de premezcla.

(4) Humedad de compactación. Usando un contenido de asfalto residual tentativo y el agua requerida en la mezcla, se prepararán mezclas y se airean a varios contenidos de humedad, la mezcla se compacta entonces dentro de moldes Marshall para luego ser curadas en seco durante un día y ensayadas en estabilidad Marshall modificado.

(5) Variación del contenido de asfalto residual. Usando el contenido de agua requerido en la mezcla y la humedad de compactación óptima se preparan mezclas

variando el contenido de asfalto residual. Si el contenido de agua óptimo de compactación es menor que el mínimo contenido de agua de mezcla requerido antes de la compactación, se requiere aireación. Las mezclas se compactan entonces dentro de moldes Marshall y se curan al aire durante tres días. Las muestras se ensayan para determinar su densidad bulk, estabilidad Marshall modificado y flujo. Se evalúa la susceptibilidad de la mezcla a los cambios de humedad sometiendo una serie de muestras a un ensayo especial de inmersión durante cuatro días.

(6) Selección del contenido óptimo de asfalto. Se elige el contenido óptimo de asfalto como el porcentaje de emulsión a la cual la mezcla de pavimento satisface de la mejor manera todos los criterios de diseño.

3.5.3 Objetivo

Proveer una cantidad adecuada de asfalto residual que económicamente estabilice el material granular con el fin de dar la resistencia o estabilidad requerida para soportar las aplicaciones de carga repetidas (compresión y flexión) sin una deformación permanente excesiva o rotura por fatiga; además de volver la mezcla suficientemente inerte a los efectos de cambio de humedad.

CAPITULO IV

ENSAYOS REALIZADOS EN LABORATORIO

Lo que se presenta a continuación son todos los ensayos realizados para una correcta comparación entre mezclas asfálticas con diluido RC-250 y emulsión asfáltica. Los ensayos para mezclas asfálticas comprenden los ensayos hechos con los agregados a ser empleados en la mezcla asfáltica y los ensayos con la mezcla asfáltica propiamente dicha (diseño de mezclas) .

4.1 Ensayos realizados en el agregado grueso:

Agregado grueso: Piedra chancada de la cantera de Sojo (TM=1")

4.1.1 Análisis granulométrico por tamizado considerando todo el agregado grueso (ASTM C-136)

Tabla 4.1. Análisis granulométrico del agregado grueso

Tamiz	Abertura mm	Gramos	%Retenido	%Acumulado	%Pasa
3/4"	25.4	791.91	12.57	12.57	87.43
1/2"	19.1	2329.11	36.97	49.54	50.46
3/8"	12.7	1690.29	26.83	76.37	23.63
1/4"	6.35	786.24	12.48	88.85	11.15
#4	4.76	337.05	5.35	94.20	5.80
#8	2.38	365.40	5.80	100.00	0.00
	Total	6300.00	100.00	----	----

4.1.2 Peso específico y absorción (ASTM C-127)

Peso específico Bulk (base seca)	= 2.72 gr/cm ³
Peso específico Bulk (base saturada)	= 2.75 gr/cm ³
Peso específico aparente (base seca)	= 2.80 gr/cm ³
Absorción	= 1.03%

4.1.3 Peso unitario (ASTM C-29)

Peso unitario suelto	= 1.41gr/cm ³
Peso unitario compactado	= 1.56 gr/cm ³

4.1.4 Ensayo de abrasión por la máquina de Los Angeles (ASTM C-131)

Se obtuvo un desgaste de 16%.

4.1.5 Afinidad con el asfalto (ASTM D-1664)

Este método describe los procedimientos de revestimiento e inmersión estática para determinar la retención de una película bituminosa sobre una superficie de agregado grueso en presencia del agua.

El método consiste en dejar una mezcla de agregado (que pase la malla de 3/8" y quede retenido en la malla de 1/4") y bitumen (RC-250 o emulsión), en agua destilada entre 16 y 18 horas y estimar si más o menos del 95% del agregado queda revestido con el bitumen. La inspección es visual.

- Con RC-250

Se logra un recubrimiento mayor al 95% con 0.5% de aditivo mejorador de adherencia (Bitucote) en el bitumen. En las muestras sin aditivo se observó un recubrimiento de aproximadamente 85-90%, no cumpliendo así con lo especificado.

- Con emulsión CSS-1 (Ver numeral 4.3.3.1 - Elección de la emulsión adecuada)

Se logra un recubrimiento mayor al 95%, sin aditivo.

4.2 Ensayos realizados en el agregado fino

Agregado fino de las canteras de Sojo y Cerromocho.

4.2.1 Análisis granulométrico por tamizado, vía húmeda (ASTM C-117)

- Cantera Sojo

Tabla 4.2. Análisis granulométrico agregado fino (cantera Sojo)

Tamiz	Abertura mm	Gramos	%Retenido	%Acumulado	%Pasa
#4	4,760	25,10	5,02	5,02	94,98
#8	2,380	49,40	9,88	14,90	85,10
#10	2,000	10,01	2,00	16,90	83,10
#16	1,190	31,30	6,26	23,16	76,84
#30	0,590	54,50	10,90	34,06	65,94
#50	0,297	107,70	21,54	55,60	44,40
#60	0,250	32,40	6,48	62,08	37,92
#100	0,149	98,30	19,66	81,74	18,26
#200	0,074	57,00	11,40	93,14	6,86
Fondo		34,29	6,86	100,00	0,00
	Total	500,00	100,00		

- Cantera: Cerromocho

Tabla 4.3. Análisis granulométrico agregado fino (cantera Cerromocho)

Tamiz	Abertura mm	Gramos	%Retenido	%Acumulado	%Pasa
#4	4.760	6.70	1.34	1.34	98.66
#8	2.380	74.50	14.90	16.24	83.76
#10	2.000	38.90	7.78	24.02	75.98
#16	1.190	131.40	26.28	50.30	49.70
#30	0.590	141.80	28.36	78.66	21.34
#50	0.297	64.80	12.96	91.62	8.38
#60	0.250	9.50	1.90	93.52	6.48
#100	0.149	3.30	0.66	94.18	5.82
#200	0.074	4.10	0.82	95.00	5.00
Fondo		25.00	5.00	100.00	0.00
	Total	500.00	100.00		

4.2.2 Peso específico y absorción (ASTM C-128)

- Cantera Sojo

Peso específico Bulk (base seca)	= 2.60 gr/cm ³
Peso específico Bulk (base saturada)	= 2.65 gr/cm ³
Peso específico aparente (base seca)	= 2.73 gr/cm ³
Absorción	= 1.78 %

- Cantera Cerromocho

Peso específico Bulk (base seca)	= 2.52 gr/cm ³
Peso específico Bulk (base saturada)	= 2.56 gr/cm ³
Peso específico aparente (base seca)	= 2.64 gr/cm ³

Absorción = 1.73 %

4.2.3 Peso unitario (ASTM C-29)

- Cantera: Sojo

Peso unitario suelto = 1.67 gr/cm³

Peso unitario compactado = 1.73 gr/cm³

- Cantera: Cerromocho

Peso unitario suelto = 1.57 gr/cm³

Peso unitario compactado = 1.73 gr/cm³

4.2.4 Afinidad con el asfalto

Para el agregado fino, esta propiedad se mide mediante el ensayo conocido como Riedel Weber. Este método describe el procedimiento para determinar el "grado" de adhesividad del agregado con los ligantes bituminosos.

El método consiste en preparar una muestra, la cual consiste de una mezcla de agregado fino (que pase la malla #30 y quede retenido en la #80) y ligante bituminoso (RC-250 o emulsión). Se preparan esferas de 0.5 gr y se hacen hervir en tubos de ensayo que contienen agua destilada y una solución de Carbonato de Sodio con distintas concentraciones. La de menor concentración se le denomina de "grado 0" y la de mayor concentración, de "grado 9".

Las esferas de 0.5 gr, hervidas por espacio de un minuto, deben tener un desprendimiento no mayor de 5%, verificado visulamente. Para que un agregado pase la prueba debe ser como mínimo de "grado 4".

- Con RC-250

Cantera Sojo: se obtiene el grado 4 con 0.75% de aditivo mejorador de adherencia (BITUCOTE) en el bitumen. Con las muestras sin aditivo tan sólo se obtiene el grado 1 ó 2.

Cantera Cerromocho: se obtiene el grado 4 con 1% del mismo aditivo en el bitumen. Con las muestras sin aditivo se alcanza el grado 0 ó 1.

- Con emulsión CSS-1

Se obtiene el grado 7 para la cantera de Sojo y el grado 6 para la de Cerromocho, sin aditivo mejorador de adherencia.

4.3 Diseño de Mezclas

4.3.1 Proporción de agregados

Se determinó a partir de los requisitos de graduación dados por el MTC (ver Tabla 4.5). La graduación elegida es la IVb: graduación densa para una capa superficial de 2" de espesor y un tamaño máximo del agregado de 1".

La combinación en proporciones exactas de los agregados debe dar como resultado una granulometría que se encuentre dentro de los rangos especificados por el MTC. Estos cálculos se realizaron con la elaboración de un pequeño programa desarrollado en Microsoft Excel y los resultados obtenidos son los siguientes (ver Tablas 4.4 y 4.5):

Tabla 4.4. Cálculos para determinar la proporción de los agregados
GRANULOMETRIA DE LA MEZCLA

% de mezcla de cada agregado

Agregado	1	2	3
% de mezcla	0,35	0,2	0,45

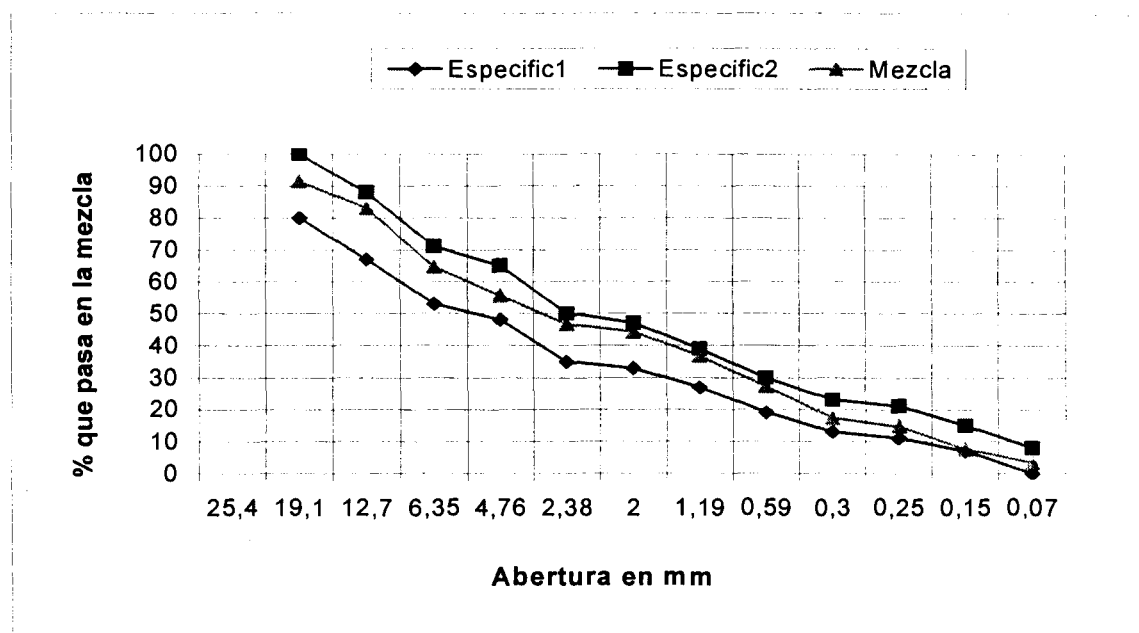
1 Arena de Sojo 3 Grava Sojo
2 Arena Cerromochó

Tamiz	Abert mm	% que pasa					
		1	2	3	Mezcla	Especificacion	
1	25,4	100,00	100,00	100,00			
3/4	19,1	100,00	100,00	94,43	91,43	80,00	100,00
1/2	12,7	100,00	100,00	62,46	83,11	67,00	88,00
1/4	6,35	100,00	100,00	21,14	64,51	53,00	71,00
4	4,76	94,98	98,66	5,79	55,58	48,00	65,00
8	2,38	85,10	83,76	0,00	46,54	35,00	50,00
10	2	83,10	75,98	0,00	44,28	33,00	47,00
16	1,19	76,84	49,70	0,00	36,83	27,00	39,00
30	0,59	65,94	21,34	0,00	27,35	19,00	30,00
50	0,297	44,40	8,38	0,00	17,22	13,00	23,00
60	0,25	37,92	7,20	0,00	14,71	11,00	21,00
100	0,149	18,26	5,82	0,00	7,56	7,00	15,00
200	0,074	6,86	5,00	0,00	3,40	0,00	8,00

Tabla 4.5. Requisitos de graduación según el MTC

REQUISITOS DE GRADUACIÓN												
No.	IIa	IIb	IIc	IIIa	IIIb	IIIc	IIId	IIIc	IVa	IVb	IVc	IVd
USOS	SUPERF.	BASE	BASE	SUPERF.	SUPERF. O NIVELAC.	BASE	BASE	BASE	SUPERF.	SUPERF.	SUPERF. O BASE	BASE
ESPESOR COMPACTADO	1" - 2"	1 1/2" - 3"	3" - 4"	3/4" - 1 1/2"	1" - 2"	1" - 2"	1 1/2" - 3"	3" - 4"	3/4" - 1 1/2"	1" - 2"	1 1/2" - 3"	2 1/2" - 4"
MALLAS	GRADUACION ABIERTA			GRADUACION GRUESA					GRADUACION DENSA			
	PORCENTAJE			QUÉ		PASA		EN	PESO			
1 1/2			100				100					100
1		100	70-100				100	75-100			100	80-100
3/4	100	70-100	50-80		100	100	75-100	60-85			100	70-90
1/2	70-100	-	-	100	75-100	75-100	-	-	100	80-100	-	-
3/8	45-75	35-60	25-50	75-100	60-85	60-85	45-70	40-65	80-100	70-90	60-80	55-75
#4	20-40	15-35	10-30	35-55	35-55	30-50	30-50	30-50	55-75	50-70	48-65	45-62
#8	5-20	5-20	5-20	20-35	20-35	20-35	20-35	20-35	35-50	35-50	35-50	35-50
#30	-	-	-	10-22	10-22	5-20	5-20	5-20	18-29	18-29	19-30	19-30
#50	-	-	-	6-16	6-16	3-12	3-12	3-12	13-23	13-23	13-23	13-23
#100	-	-	-	4-12	4-12	2-8	2-8	2-8	8-16	3-16	7-15	7-15
#200	0-4	0-4	0-4	2-8	2-8	0-4	0-4	0-4	4-10	4-10	0-8	0-8

Figura 4.6. Curvas granulométricas: especificación y mezcla.



En resumen, las proporciones para cada agregado son:

- Agregado grueso (cantera Sojo) = 45%
- Agregado fino (cantera Sojo) = 35%
- Agregado fino (cantera Cerromocho) = 20%

4.3.2 Diseño de mezclas con asfaltos diluidos usando el procedimiento del ensayo Marshall

Una vez determinada la proporción exacta de los agregados el paso siguiente es encontrar el contenido óptimo de asfalto en la mezcla asfáltica. El procedimiento es el siguiente:

- Se secan los agregados a temperatura ambiente.
- De acuerdo a la granulometría de los agregados se prepara una serie de tres especímenes, por lo menos, para cada contenido de asfalto. Se considerará una variación de asfalto de 0.5% cada vez y se necesitarán tantas mezclas para que se tengan dos por encima y dos por debajo del óptimo.

Se tomará un peso de agregados de 1100 gr, distribuido proporcionalmente según su granulometría. La cantidad de asfalto a añadir se calcula a partir del porcentaje de asfalto en la mezcla. Así por ejemplo, para un contenido de asfalto de 5%, el peso de asfalto añadido será de 55 gr. Sin embargo, como se mencionó en el primer capítulo, al hablar de asfalto nos referimos al asfalto residual y por esta razón se tendría que realizar un nuevo cálculo para determinar la cantidad de asfalto diluido o emulsionado en la mezcla. El

asfalto diluido utilizado en esta investigación, RC-250, tiene un porcentaje de cemento asfáltico de 79% (el 21% restante es solvente)¹.

- Se calientan el asfalto y los agregados en el horno a una temperatura constante de 35°C y por un tiempo no mayor a una hora.
- Se pesa para cada espécimen de ensayo la cantidad de agregado en el recipiente donde se va a efectuar la mezcla, se agita la mezcla de áridos y se forma una cavidad. Se añade la cantidad de RC-250 para el porcentaje de cemento asfáltico deseado y se mezcla bien hasta conseguir una muestra homogénea. Al terminar el mezclado, la temperatura de la mezcla dispuesta para la compactación debe estar en aproximadamente 35°C. Es conveniente mantener lo más exacto posible la temperatura para distintas amasadas en el momento de la compactación, de esta manera se aseguran resultados uniformes.
- Una vez conformada la mezcla, ésta se cura en el horno por espacio de 3 horas a una temperatura de 60°C. Sin embargo en esta investigación, para el tiempo de curado especificado de tres horas se observó que la mezcla aún estaba “pegajosa”, lo cual es un indicativo de que el solvente no ha sido evaporado totalmente. Por lo tanto, la mezcla se curó por espacio de 24 horas, asegurando así la pérdida total del solvente.
- Colocando el molde de compactación sobre la mesa de trabajo se coloca un disco de papel filtro o estraza de 10 cm de diámetro sobre la superficie de la base del molde. Esta labor también se puede desarrollar sobre la base de compactación.
- Se coloca la mezcla dentro del molde por medio de una espátula, evitando segregaciones del material. Se chucea la mezcla 15 veces alrededor del perímetro y 10 veces sobre el interior, dando al final una forma redondeada a la superficie, colocándose sobre ella un disco de papel filtro.
- Se traslada el molde con la mezcla a la base de compactación y se le aplica el número de golpes especificado con el martillo de compactación., debiéndose mantener el eje del martillo de compactación perpendicular a la base del molde durante la compactación, como se muestra en la Figura 4.7.

Después de apisonar la primera cara, se desmonta el collar y se aplica el mismo número de golpes de compactación al reverso de la cara del espécimen. Normalmente se aplican 50 golpes por cara en la compactación de la mezcla proyectada para tráfico medio y 75 golpes para tráfico pesado. En esta tesis la mezcla asfáltica se diseñó para un tráfico pesado. Si bien es cierto que las mezclas con asfaltos diluidos o emulsionados son aplicables, según bibliografía², únicamente para un tráfico bajo y/o mediano (para el caso de carpetas asfálticas), se ha visto conveniente diseñar para un tráfico pesado por ser ésta la condición más exigente que permita verificar si los resultados cumplen o no con las especificaciones para este caso. No obstante, actualmente el uso de emulsiones asfálticas en tratamientos superficiales, ya está siendo aplicado en mezclas diseñadas para tráfico pesado.

- Después de la compactación, se dejan que enfríen las briquetas en los moldes a temperatura ambiente durante toda la noche, para lo cual se deben haber identificado de acuerdo al porcentaje de asfalto de la mezcla.

¹ Dato proporcionado por Petroperú (Talara).

² Manual de Mezclas Asfálticas en Frío (Serie MC-14). Instituto del Asfalto.

- Se remueve la base y se coloca el molde y el collar sobre el extractor de muestras: Se coloca el molde con el collar de extensión hacia arriba en la máquina de ensayo, se aplica presión y se fuerza el espécimen dentro del collar de extensión y se levanta el collar del espécimen. Se transfiere cuidadosamente la briqueta a una superficie plana y se verifica su identificación. Lo mismo se hace con todas las briquetas.

Figura 4.7. Equipo de compactación: base, martillo y molde.



4.1.1.1 Determinación del peso específico Bulk de las briquetas (Gmb)

El peso específico es el peso de un determinado volumen de mezcla asfáltica. Este valor se determina de la siguiente manera:

- Se anota el peso de la briqueta al aire (W_a).

- Se sumerge la briqueta en un recipiente con parafina caliente. Si es necesario, con un pincel se recubren las zonas mal cubiertas.
- Se deja que enfríe la parafina durante media hora, se anota el peso de la briqueta más parafina en el aire a temperatura ambiente (W_b) e inmediatamente se sumerge en agua y se anota su peso (W_c).

$$G_{mb} = W_a / [W_b - W_c - (W_b - W_a) / P_f]$$

P_f : Peso de la parafina por unidad de volumen a 25°C.

Este método es obligatorio para mezclas de gradación abierta. La parafina tiene como función impermeabilizar los especímenes hechos con este tipo de mezcla al ser sumergidos en agua. De esta manera, el peso sumergido de las briquetas no se verá afectado por la absorción que éstas puedan tener debido a su porosidad. Sin embargo, en esta tesis no se utilizó parafina porque en el caso de briquetas hechas de una mezcla de granulometría densa el porcentaje de vacíos es bajo y por lo tanto, la absorción que puedan tener es mínimo, no influyendo así en la determinación del peso sumergido. En estos casos:

$$G_{mb} = W_a / [W_a - W_w]$$

W_w : Peso de la briqueta en agua.

4.1.1.2 Determinación de estabilidad y flujo

- Se comprueba el cero del medidor de deformación.
- Se limpian perfectamente las superficies interiores de las mordazas de rotura y se engrasan las varillas de guía con una película de aceite de manera que la mordaza superior se deslice libremente
- Se coloca la briqueta centrada sobre la mordaza inferior, se monta entonces la mordaza superior y el conjunto se sitúa centrado en la prensa.
- Se monta el medidor de flujo sobre la varilla guía marcada y se comprueba la lectura inicial.
- Se aplica entonces la carga a la probeta a velocidad de deformación constante de 2" por minuto hasta que se produzca la rotura. El punto de rotura viene definido por la carga máxima obtenida. La carga necesaria para producir la rotura de la briqueta es el valor de Estabilidad Marshall. Ver Figura 4.8.
- Mientras se está determinando la estabilidad, se mantiene firmemente el medidor de deformación en su posición sobre la varilla de guía y cuando se llega a la carga máxima se lee y anota la medida. Esta lectura es el valor de la deformación, expresada en centésimas de pulgada.

Figura 4.8. Equipo para determinar la estabilidad y flujo Marshall



4.1.1.1 Determinación de estabilidad y flujo de muestras sometidas a inmersión

Para realizar este ensayo, las muestras son sometidas a inmersión por un período de 4 días en un baño de agua a temperatura ambiente ($22.2^{\circ}\text{C} \pm 1.7^{\circ}\text{C}$). El objetivo es verificar que las muestras son lo suficientemente inertes a los efectos del cambio de humedad. Ver Figura 4.9.

Figura 4.9. Muestras sometidas a inmersión en un baño de agua



4.1.1.1 Contenido óptimo de asfalto

Con los valores medios de estabilidad, flujo, porcentaje de vacíos de la mezcla, porcentaje de vacíos llenos de asfalto, VMA y peso específico Bulk, para cada contenido de cemento asfáltico, se dibujan los siguientes gráficos:

- Porcentaje de asfalto vs Estabilidad
- Porcentaje de asfalto vs Flujo
- Porcentaje de asfalto vs Porcentaje de vacíos
- Porcentaje de asfalto vs Peso específico Bulk
- Porcentaje de asfalto vs VMA
- Porcentaje de asfalto vs Porcentaje de vacíos llenos de asfalto

En cada gráfico, tomando como referencia los puntos hallados, se dibuja una línea curva de trazo continuo y suave y se obtienen los valores corregidos, leídos sobre la curva, para cada tanto por ciento de asfalto.

Al final, se elige como óptimo contenido de cemento asfáltico el promedio de los valores correspondientes a los máximos de estabilidad, peso específico y el porcentaje de asfalto correspondiente a un porcentaje de vacíos de 3%¹ (algunos diseñadores utilizan un porcentaje de vacíos de 4%, que es el promedio de lo especificado). Para suministrar una

¹ Estudio de Canteras para Distintos Proyectos de Ingeniería. Tesis de la Universidad Nacional de Ingeniería.

buena resistencia a las cargas de tráfico durante las estaciones húmedas, las mezclas deben tener una estabilidad adecuada cuando son ensayadas en la condición de estabilidad sumergida. Por lo tanto, los valores de estabilidad tomados en cuenta son los correspondientes a esta condición. Además, para el contenido de asfalto calculado se deben evaluar todas las demás propiedades (flujo, VMA y VFA) y compararlas con los criterios de diseño recomendados por el Instituto del Asfalto (Tabla 4.10). Si se cumplen todos los criterios, este es el contenido de diseño de asfalto. Si no se cumplen todos los criterios, será necesario hacer algunos ajustes o volver a diseñar la mezcla¹.

Para obtener los valores de peso específico Bulk, porcentaje de vacíos, VMA y porcentaje de vacíos llenos de asfalto, se necesitan realizar los siguientes cálculos:

01. Porcentaje de cemento asfáltico en peso de la mezcla
02. Porcentaje de grava (mayor de malla No.4) en peso de la mezcla
03. Porcentaje de arena (menor de malla No.4) en peso de la mezcla
04. Peso específico del cemento asfáltico (aparente)
05. Peso específico Bulk de la grava (menor de 1")
06. Peso específico Bulk de la arena
07. Peso de la briqueta al aire (gr)
08. Peso de la briqueta en el agua (gr)
09. Volumen de la briqueta (cm³) = (07-08)
10. Peso específico Bulk de la briqueta (gr/cm³) = (07/09)
11. Peso específico máximo teórico = $100 / \{ (02/05) + (03/06) + (01/04) \}$
12. Porcentaje de vacíos = $(11-10)/11$
13. Peso específico Bulk del agregado total = $(02+03) / \{ (02/05) + (03/06) \}$
14. Vacíos en el agregado mineral (VMA) = $100 - (02+03)10/13$
15. Porcentaje de vacíos llenos con cemento asfáltico = $100(14-12)/14$
16. Peso específico efectivo del agregado total = $(02+03) / \{ (100/11) - (01/04) \}$
17. Asfalto absorbido por el agregado total = $100(04)(16-13) / (16 \times 13)$
18. Porcentaje de asfalto efectivo = $01 - (17)(02+03) / 100$

¹ Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente – Instituto del Asfalto, serie de manuales No.22 (MS-22).

El valor del peso específico aparente para el cemento asfáltico de la muestra de RC-250 utilizada en esta tesis, es de 0.96 gr/cm³.

4.1.1.2 Criterios de diseño

Como se mencionó en el Capítulo III, no existen métodos universalmente aceptados para mezclas con asfaltos diluidos o emulsionados, pero casi todos aquellos en uso emplean parte o modificaciones de los métodos para mezclas asfálticas en caliente (métodos Marshall o Hveen).

De la misma manera, los criterios de diseño especificados son los referidos a las mezclas en caliente (ver Tabla 4.10) y son éstos los que sirven como referencia a las mezclas con asfaltos diluidos. Se debe tener en cuenta que los resultados esperados para mezclas en frío con asfaltos diluidos serán de “menor calidad” que en mezclas en caliente ya que estas, debido a su mayor temperatura de mezcla (140°C-160°C), tendrán un mejor contacto entre el ligante y los agregados obteniéndose como resultado una mezcla más íntima, con un porcentaje de vacíos menor y una mejor estabilidad que las mezclas con asfaltos diluidos o emulsionados.

4.1.1.3 Resultados de laboratorio: mezcla asfáltica con RC-250

Para el diseño de mezclas, siguiendo el procedimiento del ensayo Marshall, se prepararon un total de 3 especímenes para cada contenido de cemento asfáltico. Los porcentajes de cemento asfáltico evaluados fueron de 4%, 4.5%, 5%, 5.5% y 6%; haciendo un total de 15 especímenes.

El peso total de agregados considerado para cada briqueta fue de 1100 gr. Las proporciones de agregados fino y grueso son las determinadas en el apartado 4.3.1. La proporción de agregado grueso se pesó por fracciones, según su granulometría.

La Tabla 4.12 muestra los pesos de los materiales RC-250, aditivo mejorador de adherencia Bitucote, agregados fino y grueso que serán utilizados en la elaboración de los especímenes.

Una vez preparados los especímenes se pesaron al aire y en agua, estos valores se muestran en la Tabla 4.13.

Para los cálculos de peso específico, porcentaje de vacíos, VMA y VFA; se tomaron como datos el promedio del peso al aire, peso sumergido y volumen de las briquetas para cada contenido de cemento asfáltico. Los resultados se muestran en las Tabla 4.14.

Finalmente, las briquetas fueron ensayadas en el aparato Marshall, encontrándose su estabilidad y flujo. Los resultados se muestran en la Tabla 4.15.

Tabla 4.10. Criterios del Instituto del Asfalto para el diseño Marshall*.

Criterios para Mezcla del Método Marshall	Tránsito liviano carpeta y base		Tránsito mediano carpeta y base		Tránsito pesado carpeta y base	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Compactación, No. de golpes en cada cara de la probeta	35		50		75	
Estabilidad, N (lb)	3376 (750)	---	5328 (1200)	---	8006 (1800)	---
Flujo 0,25mm (0,01 pulg)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de vacíos en el agregado mineral VMA	Ver Tabla 4.11					
Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA)	70	80	65	78	65	75

* Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente – Instituto del Asfalto, serie de manuales MS-22.

Tabla 4.11. Porcentaje mínimo de VMA (vacíos en el agregado mineral).

Tamaño Máximo en mm		VMA mínimo, por ciento		
Porcentaje		Vacíos de diseño, por ciento		
mm	pulg	3.0	4.0	5.0
1.18	No.16	21.5	22.5	23.5
2.36	No.8	19.0	20.0	21.0
4.75	No.4	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8	14.0	15.0	16.0
12.5	1/2	13.0	14.0	15.0
19.0	3/4	12.0	13.0	14.0
25.0	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0
50.0	2.0	9.5	10.5	11.5
63.0	2.5	9.0	10.0	11.0

Tabla 4.12. Peso de materiales para la elaboración de especímenes

Porcentaje de cemento asfáltico	4%	4.5%	5%	5.5%	6%
Peso de cemento asfáltico	44 gr	49.5 gr	55 gr	60.5 gr	66 gr
Peso de RC-250	55.7 gr	62.7 gr	69.6 gr	76.6 gr	83.5 gr
Peso de aditivo mejorador de adherencia (Bitucote)	0.557 gr	0.627 gr	0.696 gr	0.766 gr	0.835 gr
Peso agregado fino Cerromochó (20%)	220 gr	220 gr	220 gr	220 gr	220 gr
Peso agregado fino Sojo (35%)	385 gr	385 gr	385 gr	385 gr	385 gr
Peso agregado grueso Sojo (45%)	495 gr	495 gr	495 gr	495 gr	495 gr

Tabla 4.13. Peso al aire, peso sumergido y volumen de las briquetas.

Porcentaje Cemento Asfáltico	No. briketa	Peso al aire (gr)	Peso sumergido (gr)	Volumen (cm ³)
4%	1	1125.8	635.9	489.9
	2	1120.2	633.2	487.0
	3	1116.1	629.3	486.8
4.5%	4	1134.2	645.9	488.3
	5	1126.8	639.1	487.7
	6	1142.6	652.1	490.5
5%	7	1133.7	646.3	487.4
	8	1141.7	653.6	488.1
	9	1136.3	651.9	484.4
5.5%	10	1140.8	660.6	480.2
	11	1139.6	656.9	482.7
	12	1150.0	664.3	485.7
6%	13	1156.0	670.5	485.5
	14	1164.4	672.7	491.7
	15	1155.5	667.9	487.6

Tabla 4.14. Resultados para todos los contenidos de asfalto

Resultados para todos los contenidos de cemento asfáltico	% cemento asfáltico				
	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
Porcentaje de grava (%)	43.20	42.98	42.75	42.53	42.30
Porcentaje de arena (%)	52.80	52.53	52.25	51.98	51.70
Peso específico del Cemento asfáltico (gr/cm ³)	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
Peso específico bulk de la grava (gr/cm ³)	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72
Peso específico aparente de la grava (gr/cm ³)	2.80	2.80	2.80	2.80	2.80
Peso específico bulk de la arena (gr/cm ³)	2.57	2.57	2.57	2.57	2.57
Peso específico aparente de la arena (gr/cm ³)	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
Peso de la briqueta al aire (gr)	1120.70	1134.53	1137.23	1143.47	1158.63
Peso de la briqueta en agua (gr)	632.80	645.70	650.60	660.60	670.37
Volumen de la briqueta (cm ³)	487.90	488.83	486.63	482.87	488.26
Peso específico bulk de la briqueta (gr/cm ³)	2.30	2.32	2.34	2.37	2.37
Peso específico teórico máximo (gr/cm ³)	2.50	2.48	2.46	2.44	2.42
Porcentaje de vacíos (%)	8.01	6.28	4.85	2.79	1.80
Peso específico bulk del agregado total (gr/cm ³)	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64
Peso específico aparente del agregado total (gr/cm ³)	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72
Vacíos en el agregado mineral (VMA) (%)	16.33	15.90	15.76	15.09	15.36
Vacíos llenos de asfalto (VFA) (%)	50.95	60.52	69.24	81.51	88.31
Peso específico efectivo del agregado total	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68
Asfalto absorbido por el agregado total (%)	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
Porcentaje de asfalto efectivo (%)	3.48	3.98	4.48	4.98	5.49

Tabla 4.15. Estabilidad y flujo de las briquetas ensayadas

% Asfalto	No. de especímen	Estabilidad N	Flujo 0.25 mm
4.0%	1*	4598	14.0
	2	6154	16.0
	3	6429	14.5
4.5%	4*	12260	15.5
	5	6971	14.8
	6	7119	17.0
5.0%	7	8582	15.0
	8	7433	16.0
	9	7621	13.5
5.5%	10	7621	14.5
	11	8714	15.0
	12*	10522	18.0
6.0%	13	7600	18.0
	14	8582	16.5
	15	8058	18.5

* Estos resultados fueron descartados por estar muy alejados del promedio.

4.3.2.6.1 Contenido óptimo de asfalto

Como se mencionó en el numeral 4.3.2.4, para calcular el contenido óptimo de asfalto es necesario graficar las curvas de estabilidad, flujo, porcentaje de vacíos, peso específico, VMA y VFA (ver Figuras 4.16 a 4.21). De estas gráficas se elige como contenido óptimo de cemento asfáltico el promedio de los valores correspondientes a los máximos de estabilidad sumergida, peso específico y el porcentaje de asfalto correspondiente a un porcentaje de vacíos de 3%. Además, para el contenido de cemento asfáltico calculado, se deben evaluar los valores de VMA, VFA y flujo y compararlos con los criterios recomendados en la Tabla 4.10.

De esta manera, de las Figuras 4.16, 4.17 y 4.18, se elige como contenido óptimo de asfalto el correspondiente a 5.5%. Para este contenido de asfalto, los valores correspondientes de VMA, VFA y fluencia, son 15.09%, 81.51% y 14.75 (0.25mm), respectivamente.

El porcentaje de VMA satisface los criterios de diseño exigidos por el Instituto del Asfalto (Tabla 4.11), es decir, que este valor se encuentra dentro de los límites recomendados; caso contrario sucede con los valores de VFA y fluencia.

4.1.1 Diseño de mezclas asfálticas con emulsión usando el método propuesto de Illinois

Los agregados aquí empleados son los mismos que se utilizaron en el diseño de mezclas asfálticas con RC-250. La proporción de los agregados se determinó a partir de los

Figura 4.20. VMA vs Contenido de asfalto

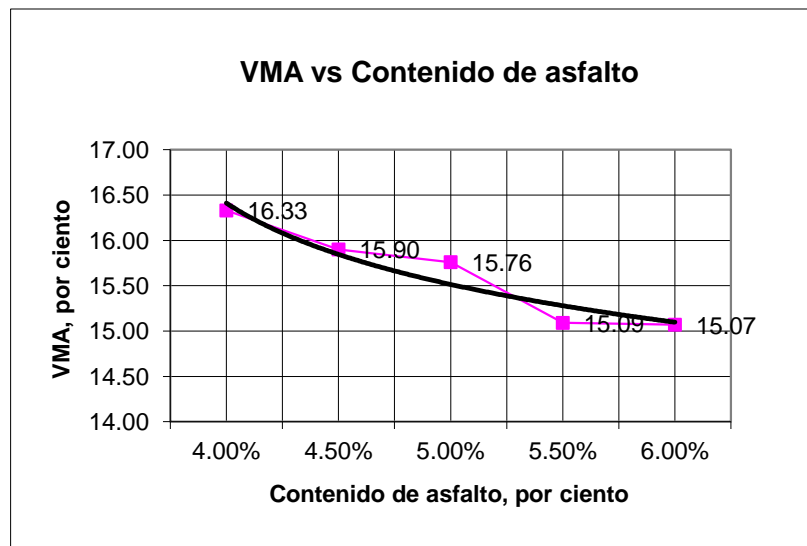


Figura 4.21. VFA vs Contenido de asfalto

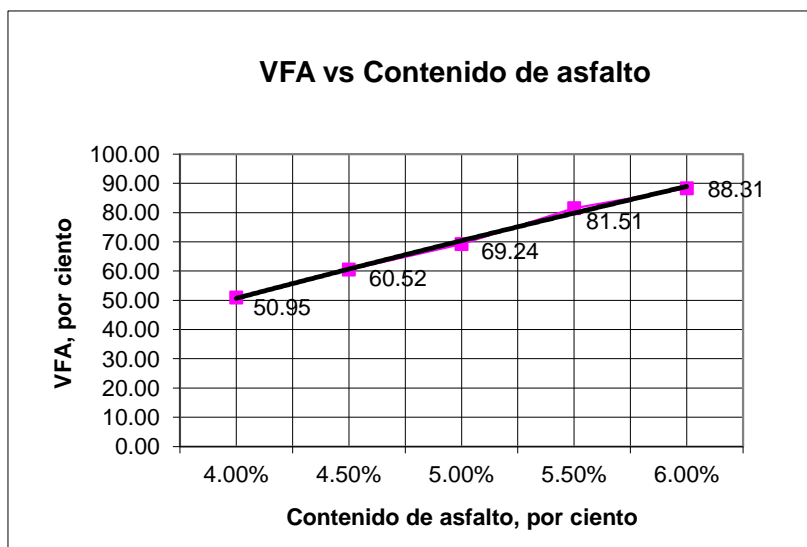


Figura 4.18. Peso específico vs Contenido de asfalto

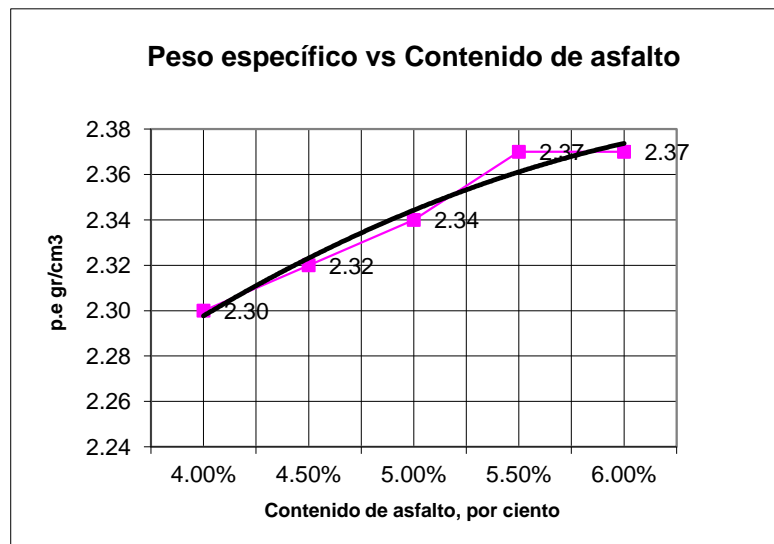


Figura 4.19. Fluencia vs Contenido de asfalto

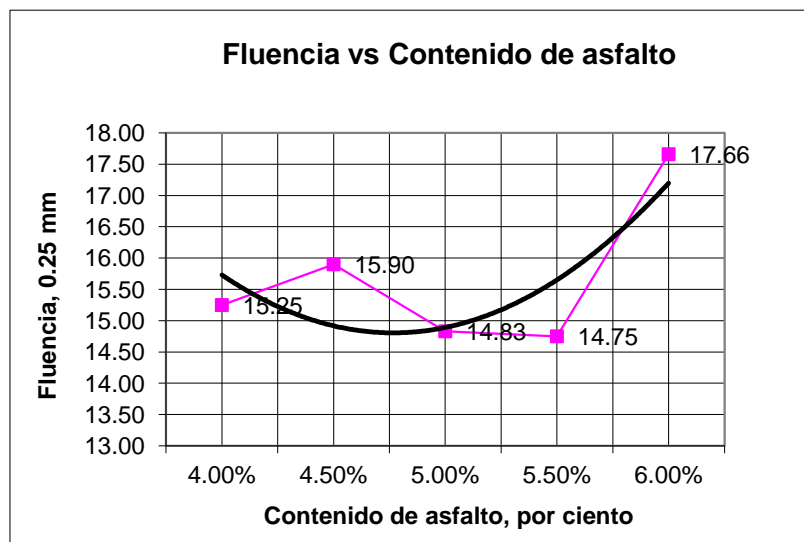


Figura 4.16. Porcentaje de vacíos vs Contenido de asfalto

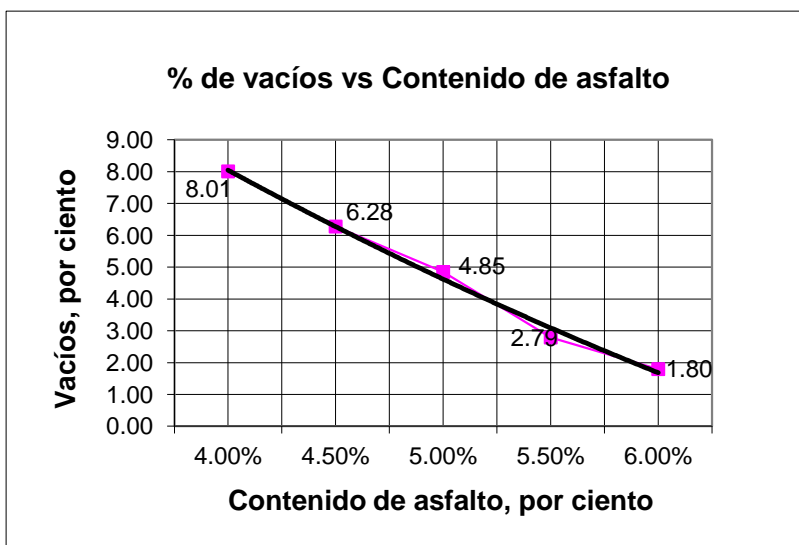
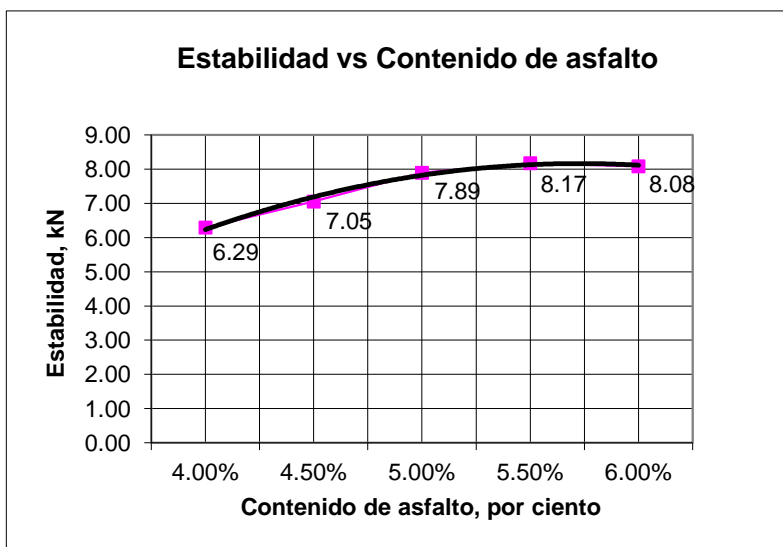


Figura 4.17. Estabilidad Marshall vs Contenido de asfalto



mismos requisitos de granulometría del MTC vistos en 4.3.1. Estas consideraciones son necesarias para poder realizar una correcta comparación entre ambos tipos de mezcla.

4.1.1.1 Ensayo de recubrimiento

La selección del tipo y grado de emulsión asfáltica para ser usada en un proyecto particular se basa en gran parte en la capacidad de la emulsión para recubrir adecuadamente el agregado de trabajo. Algunos factores que afectan la selección son:

- Tipo de agregado
- Gradación del agregado y características de los finos
- Contenido de agua del agregado
- Disponibilidad de agua en el sitio de la construcción

Más de un tipo de emulsión es a menudo aceptable para un agregado dado, la selección debe basarse en las propiedades de la mezcla determinadas por comparación con otros tipos de mezcla. Factores adicionales que no pueden ser evaluados en el momento del diseño de la mezcla pero que deben ser tenidos en cuenta en el momento de la construcción son:

- Condiciones probables del clima durante el tiempo de construcción.
- Tipo y proceso de mezcla.
- Selección del equipo de construcción y procedimiento de campo usado.

La evaluación preliminar de cada emulsión seleccionada para el diseño de la mezcla se lleva a cabo en el ensayo de recubrimiento. El contenido de asfalto residual tentativo se combina con el agregado de trabajo y se estima visualmente el recubrimiento como un porcentaje del área total. Para el cálculo del asfalto residual tentativo se ha empleado la siguiente fórmula¹:

$$\%C.A = 0.035A + 0.045B + \alpha C + 0.5, \text{ donde:}$$

A, porcentaje de agregado retenido acumulado en la malla No.10.

B, porcentaje de agregado que pasa la malla No.10.

C, porcentaje de agregado que pasa la malla No.200.

α , factor de corrección que varía según el porcentaje de agregado que pasa la malla #200. Así tenemos:

$$\alpha = 0.15, \text{ si } 0\text{-}5\% \text{ de agregado fino pasa la malla } \#200.$$

$$\alpha = 0.18, \text{ si } 5\text{-}10\% \text{ de agregado fino pasa la malla } \#200.$$

$$\alpha = 0.20, \text{ si más del } 10\% \text{ de agregado fino pasa la malla No. } 200.$$

En esta tesis, según la granulometría de la mezcla vista en la tabla 4.4, el contenido de asfalto residual tentativo sería:

$$\%C.A = 0.035 \times 55.7 + 0.045 \times 44.3 + 0.15 \times 3.4 + 0.5 = 4.8\%$$

Sin embargo, se prefirió trabajar con 5% por ser esta cantidad más comúnmente utilizada en el diseño de mezclas asfálticas.

¹ Dato proporcionado por la empresa BITUPER, Lima.

4.3.3.1.1 Elección de la emulsión adecuada

La habilidad de la emulsión para recubrir un agregado es usualmente afectada por el contenido de agua de premezcla en el agregado. Esto es especialmente cierto para agregados que contienen un alto porcentaje de material que pasa el tamiz 75um (No.200), donde, insuficiente agua de premezcla resulta en un aglutinamiento del asfalto con los finos y, por lo tanto, un recubrimiento insuficiente. Por esta razón es necesario realizar el ensayo de recubrimiento para diferentes contenidos de agua del agregado. Las emulsiones que no cumplan con el ensayo de recubrimiento no serán utilizadas. En resumen, el procedimiento es el siguiente:

- Se obtienen muestras representativas de cada emulsión considerada para el proyecto.
- Se obtienen muestras representativas del agregado de trabajo o agregado de mezcla.
- Se seca el agregado al aire. El agregado grueso se separa en tamaños según su granulometría.
- Se determina el contenido de humedad de la muestra secada al aire de acuerdo con el método de ensayo ASTM D2216. Para los agregados utilizados en esta tesis la humedad es de 0.5%. Este valor corresponde a la combinación en proporciones de los agregados fino y grueso.
- Se pesa una cantidad de agregado fino y grueso (aproximadamente 2000 gr); el agregado grueso se pesa por fracciones.
- Se añade un porcentaje de agua como porcentaje en peso del agregado. El agua debe ser añadida en una corriente delgada y el agregado se mezcla hasta que el agua se disperse totalmente.
- Se añade la cantidad de emulsión (como porcentaje en peso del agregado). La emulsión debe ser también añadida en una corriente delgada para minimizar la tendencia del asfalto a formar grumos con el agregado fino. El mezclado debe ser lo suficientemente energético para lograr dispersar el asfalto por toda la mezcla.
- Se calcula la cantidad total de agua en porcentaje en peso del agregado; combinando el contenido de humedad del agregado, el porcentaje de agua añadido y el porcentaje de agua en la emulsión. (Ver “Resultados obtenidos en el laboratorio”, en la siguiente página)
- Se seca la mezcla al aire o en el horno a una temperatura de $110 \pm 5.5^{\circ}\text{C}$, hasta que se note la pérdida de humedad. Se prepara una nueva mezcla añadiendo un incremento adicional de 1% de agua como porcentaje en peso del agregado. Las mezclas que comiencen a ser fluidas o a segregarse se consideran inaceptables.
- Se califica la apariencia de la superficie de la mezcla seca, por inspección visual, del área superficial del agregado cubierta con asfalto. Para cada contenido de agua de premezcla se anota el recubrimiento estimado como un porcentaje del área total. Recubrimientos del agregado que excedan el 50% deben considerarse aceptables. Si la

mezcla no obtiene el 50% de recubrimiento con ningún contenido de agua la emulsión debe ser rechazada para posterior consideración.

En el numeral 2.2.8, se mencionó un recubrimiento inicial no menor del 80%. Sin embargo, este recubrimiento inicial no es el mismo que el recubrimiento de la mezcla una vez que ésta ha curado.

4.3.3.1.2 Resultados obtenidos en el laboratorio

Los mejores resultados de recubrimiento se obtuvieron con una emulsión catiónica de rotura lenta (CSS-1), con un residuo asfáltico de 61% (el 39% restante es agua) y un Ph =1.9.

Esta alternativa se eligió luego de realizar el ensayo con tres emulsiones de igual proporción e igual tipo de cemento asfáltico; el mismo emulsificante y su concentración, pero variando el pH. La primera, con un pH=2.1; la segunda, con un pH=2.3 y la tercera, con un pH=1.9. Al comparar estas tres emulsiones se llegó a la conclusión que la emulsión más ácida (pH=1.9) tenía una mejor afinidad con el agregado utilizado en esta investigación.

El porcentaje de recubrimiento observado en la superficie del agregado, para distintos contenidos de agua y con la emulsión elegida (CSS-1, pH=1.9), se muestran en la Tabla 4.22.

Tabla 4.22. Porcentaje de recubrimiento vs Porcentaje agua añadida

Agua añadida	Recubrimiento	Observaciones
1%	60-70 %	-----
2%	70-80 %	-----
3%	80-90 %	Mezcla poco trabajable
4%	90-95 %	Mezcla no trabajable
5%	90-95 %	Mezcla no trabajable

De los resultados, se eligió como porcentaje de agua de recubrimiento el correspondiente a 2%. Sin embargo, mezclas con 1% también podrían ser aceptables. (Ver Figura 4.23).

Cálculo de la cantidad total de agua, como porcentaje en peso del agregado:

- (1) Peso del agregado seco al aire = 2000 gr
- (2) Contenido de agua del agregado seco al aire = 0.5%
- (3) Porcentaje de agua añadida antes de la adición de la emulsión = 2%
- (4) Asfalto residual tentativo en la mezcla, en porcentaje = 5%

(2) Asfalto residual en la emulsión = 61%

(3) Agua en la emulsión en porcentaje = 39%

(4) Contenido total de agua en la mezcla =

$$2000 \times 0.005 + 2000 \times 0.02 + (2000 \times 0.05 / 0.61) \times 0.39 = 113.93 \text{ gr}$$

(5) Contenido total de agua en la mezcla, como porcentaje en peso del agregado =

$$(113.93 / 2000) \times 100 = 5.70\%$$

Figura 4.23. Recubrimiento del agregado para distintos contenidos de agua



- Preparación del agregado.- Se combina cada fracción por tamaño del agregado para producir un peso total de 3.6 kg. Se coloca el agregado en un área ventilada y se determina su temperatura. Antes de la mezcla la temperatura debe ser ajustada a $22.2 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$.
- Se adiciona el agua de premezcla.- Se coloca el agregado seco al aire en un recipiente o mezclador mecánico. Se calcula la cantidad de agua libre a añadir como se mencionó en el ensayo de recubrimiento. El agua debe ser añadida en una corriente delgada y por espacio de 2 ± 0.5 minutos o hasta que se encuentre totalmente dispersa en el agregado.
- Se adiciona la cantidad de emulsión (como porcentaje en peso del agregado). Ésta también debe ser añadida en una corriente delgada, tal como se explicó en el ensayo de recubrimiento.
- Aireación para reducir el contenido de agua en las mezclas.- Si el contenido de agua deseado en la compactación difiere del contenido de agua óptimo en la mezcla, se requiere aireación. Se distribuye la mezcla en un recipiente de tal forma que la profundidad no exceda 1 pulg. Se anota el peso del recipiente más mezcla. Se calcula la pérdida de peso requerida para alcanzar el contenido de agua de compactación deseada y ésta se sustrae del peso anteriormente anotado.
- Se airea la mezcla o se puede colocar al horno a una temperatura de $93.3 \pm 2.8^{\circ}\text{C}$, hasta que alcance el peso deseado. Antes de la compactación la temperatura de la mezcla debe ser de $22.2 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$.
- Compactación de la mezcla.- Se usarán moldes Marshall estándar para las muestras que se ensayan a estabilidad Marshall modificado. Se acopla la base, el molde Marshall y el collar de extensión. Se cubre la base con un disco de papel filtro y se coloca la mezcla (aproximadamente 1200 gr). Se punza o chucea la mezcla con una espátula 15 veces alrededor del perímetro y 10 veces sobre su interior. Se coloca un segundo papel filtro sobre la superficie de la mezcla. Se coloca el molde acoplado sobre el pedestal de compactación y se aplican 75 golpes con el martillo de compactación, en ambas caras. Finalmente, se remueven el collar, la base y el papel filtro de las muestras; las cuales se encuentran ahora listas para el curado.
- Curado de muestras. Las muestras son curadas a temperatura ambiente ($22.2 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$) por un período de 24 ó 72 horas. Las muestras deben ser colocadas de lado para tener igual ventilación por ambas caras. Las muestras se retirarán del molde aproximadamente 2 horas antes de ser ensayadas.

4.1.1.1 Contenido óptimo de agua de compactación

Las propiedades de la mezcla están íntimamente relacionadas con la densidad de las muestras compactadas. Por tal motivo, es necesario optimizar el contenido de agua en la compactación para maximizar las propiedades de la mezcla deseada. Esto debe realizarse para cada combinación de tipo de emulsión, grado de emulsión y tipo de agregado considerado en cada proyecto.

El procedimiento de preparación de las muestras es como el que se indica en 4.3.3.2. Algunas observaciones adicionales son las siguientes:

- Número de muestras.- Se preparan tres muestras para cada contenido de agua de compactación a ser evaluada. Generalmente son suficientes cuatro incrementos de 1% en el contenido de agua para definir la curva de Estabilidad vs Contenido de agua en la compactación (ver Figura 4.25).
- Todas las muestras se trabajarán con el mismo contenido de cemento asfáltico, que es el contenido de cemento asfáltico tentativo.
- Aireación para reducir el contenido de agua de la mezcla.- Esto en el caso de que el porcentaje del agua de recubrimiento sea mayor que el contenido de agua en la compactación.
- Curado de las muestras.- Se curan las muestras por 24 horas en el molde de compactación a temperatura ambiente, tal como se indicó en 4.3.3.2.
- Se ensayan las muestras para estabilidad Marshall. Se prepara un gráfico de Estabilidad Marshall Modificado vs Contenido de agua en la compactación. Se selecciona el pico de la curva como el contenido de agua óptimo en la compactación. Este debe ser usado como el óptimo en todas las siguientes compactaciones independientemente del contenido de asfalto residual.
- Se calcula el contenido óptimo total de agua en la compactación, como porcentaje en peso del agregado. Los resultados obtenidos en el laboratorio se muestran a continuación.

4.3.3.3.1 Resultados obtenidos en el laboratorio

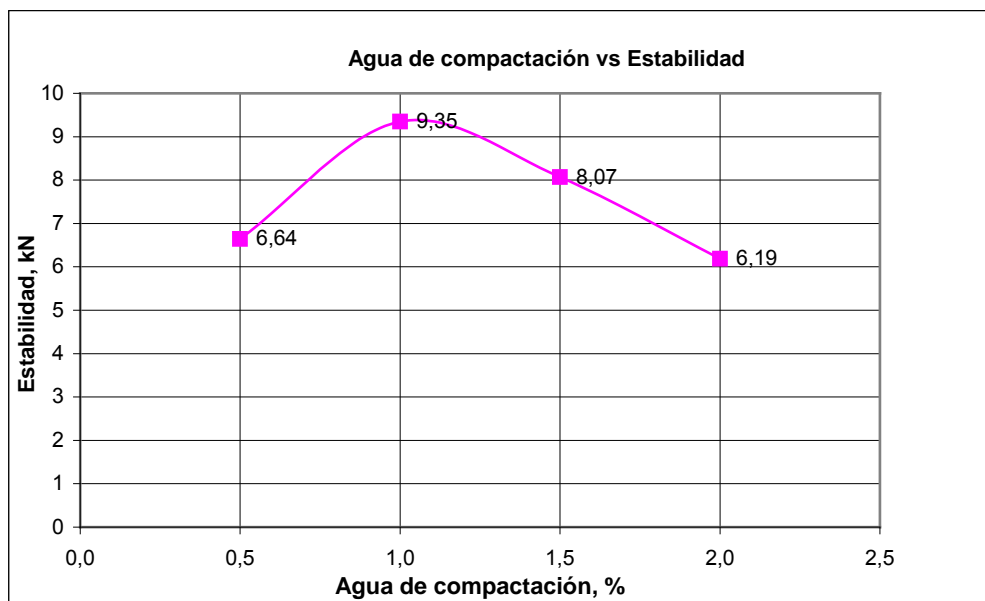
Se prepararon muestras con variaciones de 0.5% en el agua de compactación. Al igual que en el ensayo de recubrimiento, las mezclas con porcentajes de agua a partir del 3% se descartaron por ser fluidas y segregables. Las muestras con 5% de asfalto residual fueron mezcladas con 0.5, 1, 1.5 y 2% de agua y compactadas inmediatamente. Después de 24 horas de curado fueron ensayadas en estabilidad Marshall. La Figura 4.28 muestra que el porcentaje óptimo de agua de compactación es 1%.

En la tabla 4.24 se muestra como resultado de estabilidad el promedio de tres especímenes ensayados.

Tabla 4.24. Porcentaje de agua de compactación vs Estabilidad Marshall

Agua de compactación, %	Estabilidad, kN
0,5	6,64
1,0	9,35
1,5	8,07
2,0	6,19

Figura 4.25. Porcentaje de agua de compactación vs Estabilidad Marshall



Cálculo del contenido óptimo total de agua en la compactación, como porcentaje en peso del agregado

- (1) Peso del agregado seco al aire = 1100 gr
- (2) Contenido de agua del agregado seco al aire = 0.5%
- (3) Asfalto residual tentativo en la mezcla, en porcentaje = 5%
- (4) Asfalto residual en la emulsión, en porcentaje = 61%
- (5) Agua en la emulsión en porcentaje = 39%
- (6) Contenido óptimo de agua de compactación, añadido = 1%
- (7) Contenido total de agua en la compactación=

$$1100 \times 0.005 + (1100 \times 0.05 / 0.61) \times 0.39 + 1100 \times 0.01 = 51.66 \text{ gr}$$

(8) Contenido óptimo total de agua en la compactación, como porcentaje en peso del agregado =

$$(51.66/1100) \times 100 = 4.70\%$$

4.1.1.2 Variación del contenido de asfalto residual

La variación en el contenido de asfalto residual se hace de la misma manera como se explicó en el numeral 4.3.2. Sin embargo, se debe tener en cuenta la siguiente consideración:

- Adición del agua de mezcla.- Existe un porcentaje de agua en el cual la mezcla se hace fluida o segregable (no trabajable). A medida que el contenido de asfalto residual se incrementa, la cantidad de agua que contribuye la emulsión también se incrementa. Por lo tanto, la cantidad de agua de premezcla añadida (antes de mezclarse con la emulsión) debe reducirse a medida que el contenido de asfalto residual aumenta.

4.3.3.5 Determinación del peso específico bulk, estabilidad y flujo de las briquetas

El procedimiento de ensayo para determinar el peso específico bulk, la estabilidad y flujo de las probetas, para cada contenido de cemento asfáltico, es tal como el que se indicó en los numerales 4.3.2.1 y 4.3.2.2 (en el diseño de mezclas asfálticas con RC-250).

4.3.3.6 Contenido óptimo de asfalto

Para el contenido óptimo de asfalto se procede de manera similar a lo descrito en el numeral 4.3.2.4.

4.3.3.7 Criterios de diseño

El método de Illinois considera los criterios de diseño mostrados en la Tabla 4.26. Como se puede ver, no existen recomendaciones para el VMA y VFA, por lo tanto, serán tomados en cuenta los valores vistos en el criterio de diseño para mezclas Marshall (Tabla 4.10).

El porcentaje de vacíos está comprendido entre 2 y 8%, y el mínimo de estabilidad exigido es de 2224 N. Estos valores son menos exigentes que los de la Tabla 4.10.

Sin embargo, para lograr una correcta comparación entre ambas mezclas, se tomarán como referencia los criterios de diseño para mezclas Marshall según el Instituto del Asfalto (Tabla 4.10), que son los mismos criterios tenidos en cuenta para mezclas asfálticas con RC-250.

Tabla 4.26. Criterios de diseño de mezclas emulsión-agregado*

Propiedad de ensayo	Mínimo	Máximo
Estabilidad, N Mezclas pavimentación	2224	
Vacíos totales %	2	8
Pérdida de estabilidad, % Después de 4 días inmersión		50
Humedad absorbida %		4
Cubrimiento agregado %	50	

* Mezclas Asfáltica en Frío con Asfaltos Emulsionados. Instituto del Asfalto

4.3.3.8 Resultados de laboratorio: mezclas asfálticas con emulsión

Para el diseño de mezclas se prepararon un total de 3 especímenes para cada contenido de cemento asfáltico. Los porcentajes de cemento asfáltico evaluados fueron de 4%, 4.5%, 5%, 5.5% y 6%; haciendo un total de 15 especímenes.

El peso total de agregados considerado para cada briqueta fue de 1100 gr. Las proporciones de agregados fino y grueso son las determinadas en el apartado 4.3.1. La proporción de agregado grueso se pesó por fracciones, según su granulometría.

El peso de los materiales (emulsión CSS-1, agua y agregados fino y grueso) para la elaboración de especímenes, se muestra en la Tabla 4.27. En la Tabla 4.28 se presentan los valores correspondientes al peso al aire, peso sumergido en agua y volumen de las briquetas.

Tabla 4.27. Peso de materiales para la elaboración de especímenes

Porcentaje de cemento asfáltico	4%	4.5%	5%	5.5%	6%
Peso de cemento asfáltico	44,00 gr	49,50 gr	55,00 gr	60,50 gr	66,00 gr
Peso de emulsión CSS	72,13 gr	81,15 gr	90,16 gr	99,18 gr	108,2 gr
Peso de agua de premezcla	29,07 gr	25,55 gr	22,00 gr	18,52 gr	15,00 gr
Peso agregado fino Cerromucho (20%)	220 gr	220 gr	220 gr	220 gr	220 gr
Peso agregado fino Sojo (35%)	385 gr	385 gr	385 gr	385 gr	385 gr
Peso agregado grueso Sojo (45%)	495 gr	495 gr	495 gr	495 gr	495 gr

Tabla 4.28. Peso al aire, peso sumergido y volumen de las briquetas.

Porcentaje Cemento Asfáltico	No. briketa	Peso al aire (gr)	Peso sumergido (gr)	Volumen (cm ³)
4,0%	1	1130,3	644,2	486,1
	2	1139,1	645,5	493,6
	3	1131,0	645,8	485,2
4,5%	4	1140,0	647,4	492,6
	5	1147,6	649,5	498,1
	6	1135,6	644,1	491,5
5,0%	7	1142,0	646,0	496,0
	8	1145,9	648,5	497,4
	9	1145,4	648,5	496,9
5,5%	10	1143,7	642,7	501,0
	11	1154,6	646,2	508,4
	12	1152,3	645,7	506,6
6,0%	13	1154,5	645,8	508,7
	14	1162,5	649,5	513,0
	15	1155,3	646,1	509,2

Para los cálculos de peso específico, porcentaje de vacíos, VMA y VFA; se tomaron como datos el promedio del peso al aire, peso sumergido y volumen de las briquetas para cada contenido de cemento asfáltico. Los resultados se muestran en la Tabla 4.29.

Finalmente, las briquetas fueron ensayadas a estabilidad y flujo Marshall. Los resultados se muestran en la Tabla 4.30.

4.3.3.8.1 Contenido óptimo de asfalto

Al igual que las mezclas asfálticas con RC-250 y tal como se mencionó en el numeral 4.3.2.4, para calcular el contenido óptimo de asfalto es necesario graficar las curvas de estabilidad, flujo, porcentaje de vacíos, peso específico, VMA y VFA (ver Figuras 4.31 a 4.36). De estas gráficas se elige como contenido óptimo de cemento asfáltico el promedio de los valores correspondientes a los máximos de estabilidad sumergida, peso específico y el porcentaje de asfalto correspondiente al menor porcentaje de vacíos entre 2 y 8% (ver Tabla 4.26). Además, para el contenido de cemento asfáltico calculado, se deben evaluar los valores de VMA, VFA y flujo y compararlos con los criterios recomendados en la Tabla 4.13. Por lo tanto, de las Figuras 4.31, 4.32 y 4.33, se elige como contenido óptimo de asfalto el correspondiente a 5.00%.

Para este contenido óptimo de asfalto, los valores de VMA, VFA y fluencia son 16.57%, 63.44% y 13.23 (0.25 mm). Según la Tabla 4.10, los valores de VMA y fluencia se encuentran dentro de lo especificado, mientras que el VFA es 2.5% menor que el valor mínimo requerido.

Tabla 429. Resultados para todos los contenidos de asfalto

Resultados para todos los contenidos de cemento asfáltico	% cemento asfáltico				
	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
Porcentaje de grava (%)	43.20	42.98	42.75	42.53	42.30
Porcentaje de arena (%)	52.80	52.53	52.25	51.98	51.70
Peso específico del Cemento asfáltico (gr/cm ³)	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
Peso específico bulk de la grava (gr/cm ³)	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72
Peso específico aparente de la grava (gr/cm ³)	2.80	2.80	2.80	2.80	2.80
Peso específico bulk de la arena (gr/cm ³)	2.57	2.57	2.57	2.57	2.57
Peso específico aparente de la arena (gr/cm ³)	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
Peso de la briqueta al aire (gr)	1133.47	1141.07	1144.43	1150.20	1157.43
Peso de la briqueta en agua (gr)	645.17	647.00	647.67	644.87	647.13
Volumen de la briqueta (cm ³)	488.30	494.07	496.76	505.33	510.30
Peso específico bulk de la briqueta (gr/cm ³)	2.32	2.31	2.30	2.28	2.27
Peso específico teórico máximo (gr/cm ³)	2.50	2.48	2.46	2.44	2.42
Porcentaje de vacíos (%)	7.04	6.73	6.20	6.56	6.13
Peso específico bulk del agregado total (gr/cm ³)	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64
Peso específico aparente del agregado total (gr/cm ³)	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72
Vacíos en el agregado mineral (VMA) (%)	15.44	16.31	16.95	18.38	19.10
Vacíos llenos de asfalto (VFA) (%)	54.44	58.70	63.44	64.30	67.88
Peso específico efectivo del agregado total	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68
Asfalto absorbido por el agregado total (%)	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
Porcentaje de asfalto efectivo (%)	3.48	3.98	4.48	4.98	5.49

Tabla 4.30. Estabilidad y flujo de las briquetas ensayadas

% C.A	No. especímen	Estabilidad N	Flujo 0.25 mm
4.0%	1	7623	11
	2	8170	12
	3	8514	12
4.5%	4*	11129	17
	5	9131	12
	6	9139	13
5.0%	7	12063	13
	8	13319	16
	9	13812	14
5.5%	10	10748	23
	11	9470	20
	12	11599	20
6.0%	13	9235	26
	14	9429	25
	15*	7937	21

* Estos resultados fueron descartados por estar muy alejados del promedio.

Figura 4.31. Porcentaje de vacíos vs Contenido de asfalto

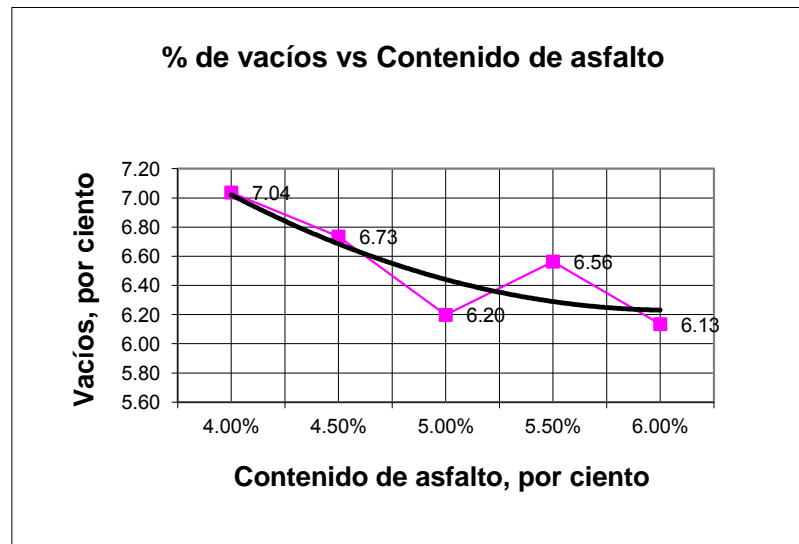


Figura 4.32. Estabilidad Marshall vs Contenido de asfalto

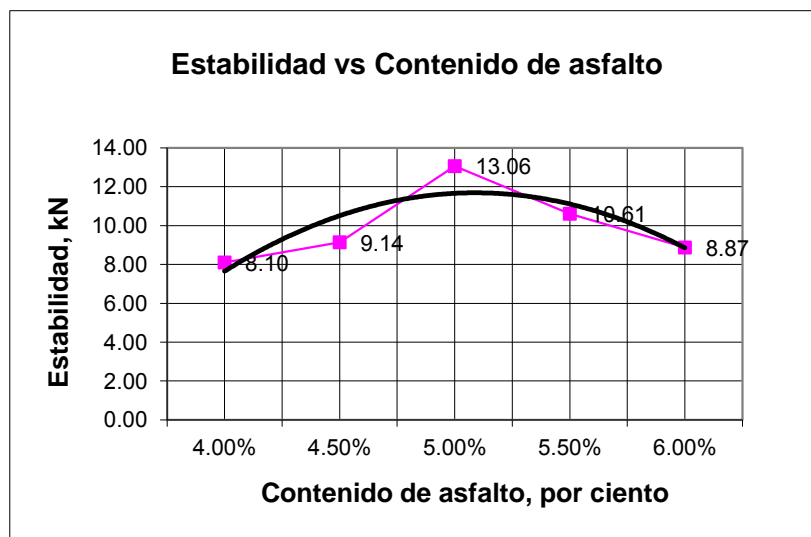


Figura 4.33. Peso específico bulk vs Contenido de asfalto

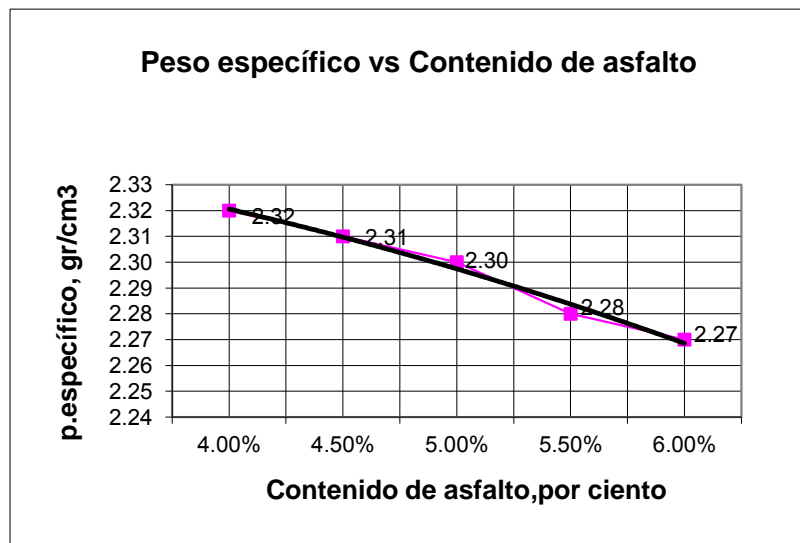


Figura 4.34. Fluencia vs Contenido de asfalto

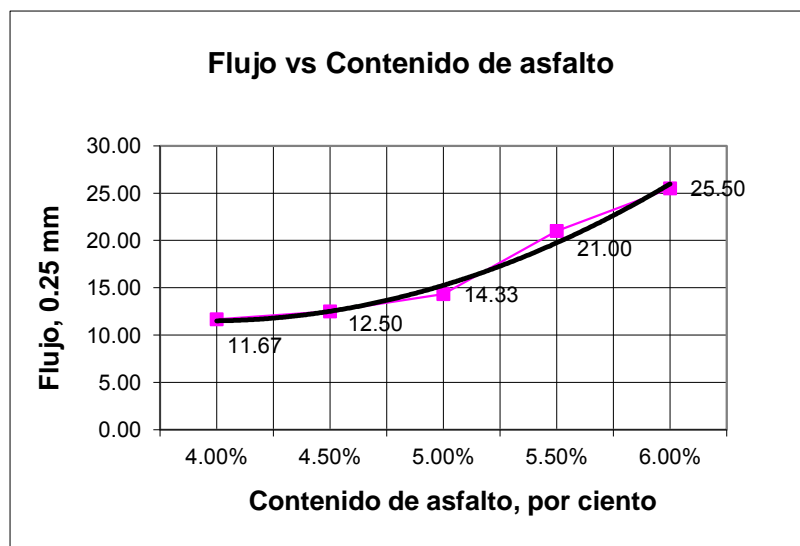


Figura 4.35. VMA vs Contenido de asfalto

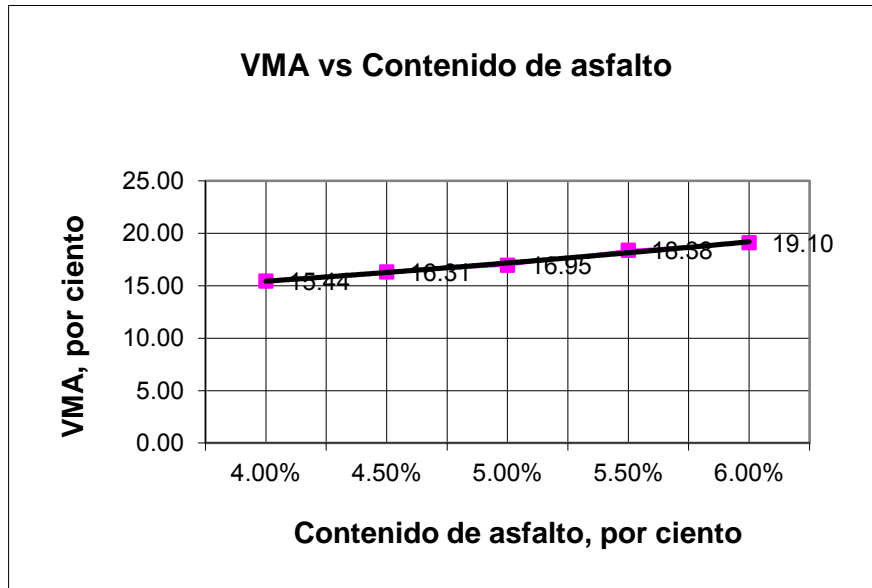
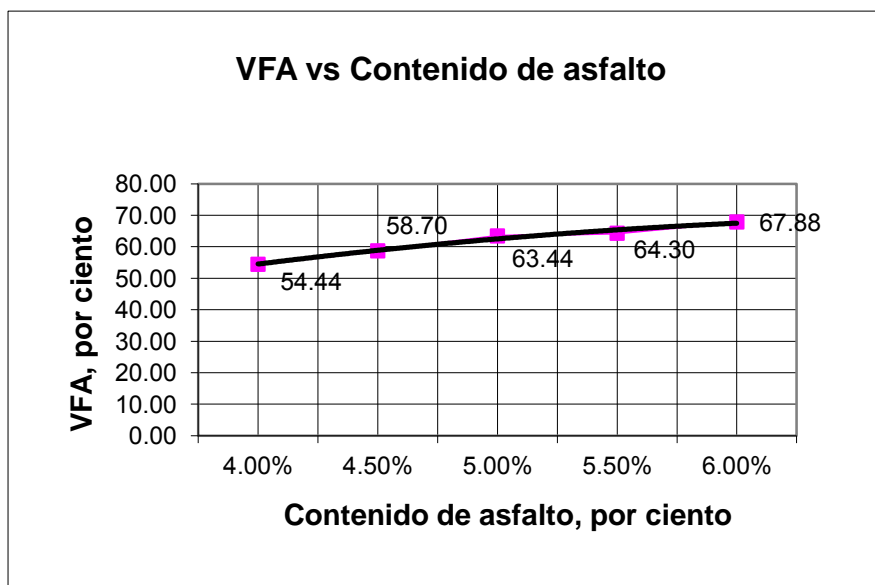


Figura 4.36. VFA vs Contenido de asfalto



CAPITULO V

ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

5.1 Generalidades

La discusión y análisis de resultados se desarrollará a partir de dos puntos considerados en esta tesis como los más importantes. El primero, la afinidad del agregado con el asfalto; el segundo, los resultados obtenidos en el diseño de mezclas asfálticas. Además, también se presentarán las ventajas que ofrecen las mezclas asfálticas con emulsión frente a las mezclas asfálticas con diluidos. Finalmente, como un dato adicional, se hará un pequeño análisis económico y otro ambiental para ambas mezclas.

Para el diseño de mezclas, las curvas gráficas vistas en el Capítulo IV varían considerablemente entre diferentes tipos de agregado y gradaciones. Sin embargo, existen curvas típicas cuyas tendencias generales son las siguientes:

- Los gráficos de estabilidad y peso específico tienen forma de parábola invertida, donde tienen un valor máximo al cual le corresponde un determinado porcentaje de asfalto.
- El porcentaje de vacíos disminuye con el aumento del contenido de asfalto.
- El gráfico de VMA tiene forma de parábola, con un valor mínimo al cual le corresponde un determinado porcentaje de asfalto.
- El porcentaje de vacíos llenos con cemento asfáltico (VFA), aumenta con el incremento de cemento asfáltico.
- El flujo aumenta con el incremento de cemento asfáltico.

Además, también se tendrá en cuenta que las mezclas asfálticas fueron diseñadas para soportar un tráfico pesado. Los criterios de diseño son los mostrados en la Tabla 4.10 y 4.26.

5.2 Mezclas asfálticas con RC-250.

5.2.1 Afinidad con el asfalto.

Según los ensayos realizados vistos en el Capítulo IV, tanto el agregado fino como el agregado grueso de las canteras de Sojo y Cerromucho no presentan una buena adherencia en mezclas preparadas con el asfalto diluido RC-250. Para mejorar esa propiedad, fue necesario adicionar un mejorador de adherencia (Bitucote) para cumplir así con las especificaciones. El aditivo fue añadido en proporción al peso del cemento asfáltico:

- Agregado grueso (cantera Sojo) = 0.5%
- Agregado fino (cantera Sojo) = 0.75%
- Agregado fino (cantera Cerromocho) = 1%

De los resultados obtenidos, vemos que el agregado fino de la cantera de Sojo presenta una mejor afinidad con el asfalto que el agregado fino de la cantera de Cerromocho. Esto se debe a que el agregado fino de la cantera de Cerromocho está compuesto en su mayoría, por cuarcitas. Las cuarcitas son agregados 100% silíceos. Por lo tanto, dado que el agregado fino de Cerromocho tendrá una mayor afinidad por el agua (hidrofílico) que el agregado fino de Sojo, necesitará un mayor contenido de aditivo mejorador de adherencia en la mezcla asfáltica.

Debido a que la mezcla asfáltica preparada en esta investigación está conformada por agregados de ambas canteras, el porcentaje de aditivo añadido será aquel que satisfaga la condición más crítica. Por esta razón fue necesario adicionar 1% de Bitucote, porcentaje de aditivo necesario para que el agregado fino de Cerromocho cumpla con las especificaciones.

Una conclusión importante a la que se puede llegar es que las carpetas asfálticas diseñadas con estos agregados presentarán problemas de adherencia en presencia de humedad, debido a las características de estos agregados mencionadas arriba. Sin embargo, la adición de mejoradores de adherencia, como el Bitucote, serían una solución a ello siempre y cuando se les añada en la cantidad adecuada.

Ésta es una de las razones principales del porqué en Piura las carpetas asfálticas tienen poca durabilidad. Como se sabe, estos agregados son casi siempre usados para conformar mezclas asfálticas en nuestra ciudad y sus alrededores, sumándose a ello la presencia de humedad durante los meses de verano. Por lo tanto, el uso de estos agregados susceptibles al agua (hidrofílicos), harán que las películas de asfalto se desprendan del agregado dejando un pavimento desgastado o desintegrado.

Esta observación no es válida sólo para carpetas asfálticas fabricadas de mezclas con asfaltos diluidos (mezclas en frío), sino también para aquellas hechas con mezclas en caliente. Si bien es cierto con estas últimas se logra una mezcla más íntima y de mejores propiedades, el problema de adherencia también está presente. En Piura se han encontrado carpetas fabricadas con este tipo de mezcla igualmente desgastadas o desintegradas.

5.2.2 Resultados en el diseño de mezclas.

De las curvas de diseño graficadas para determinar el contenido óptimo de asfalto (Figuras 5.1 a 5.6), se puede observar lo siguiente:

- El porcentaje de vacíos y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA) disminuyen con el aumento en el contenido de asfalto. Por otro lado, el porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA) aumenta con el incremento de cemento asfáltico.

Figura 5.1. Porcentaje de vacíos vs Contenido de asfalto

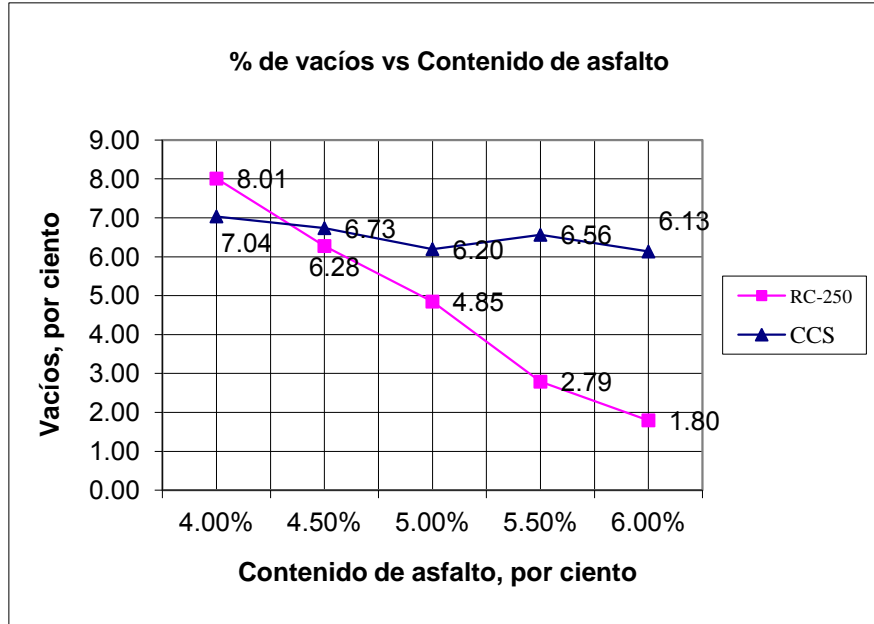


Figura 5.2. Peso específico bulk vs Contenido de asfalto

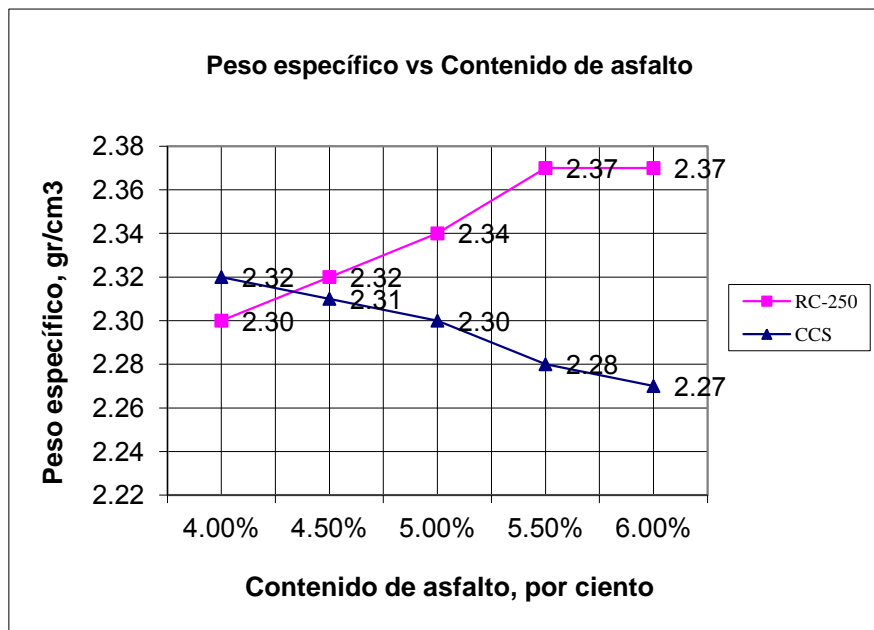


Figura 5.3. Estabilidad Marshall vs Contenido de asfalto

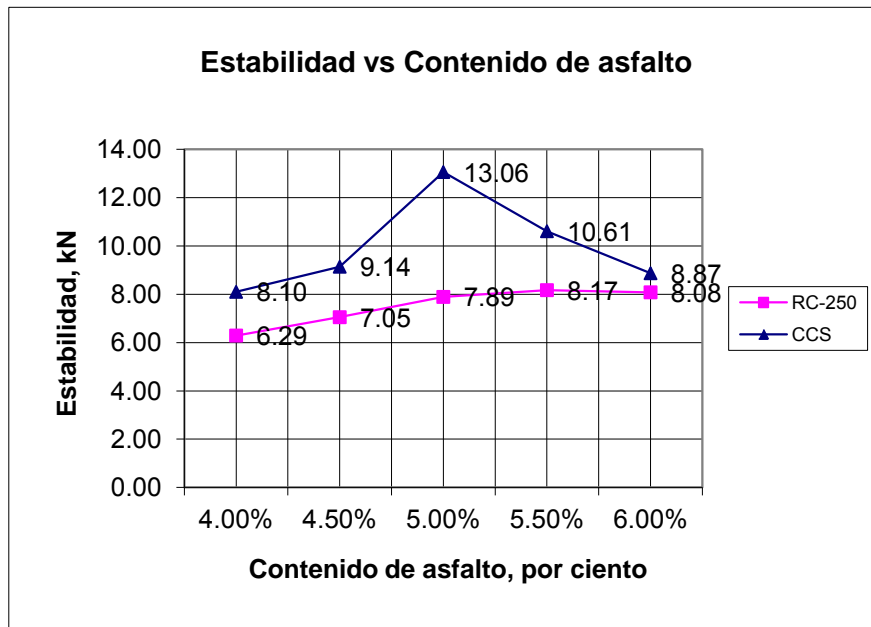


Figura 5.4. Fluencia vs Contenido de asfalto

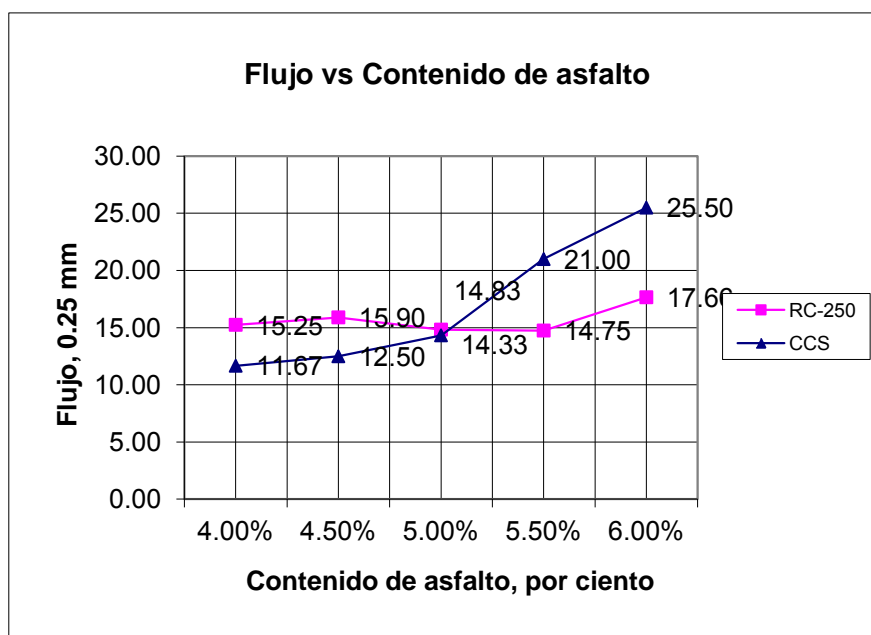


Figura 5.5. VMA vs Contenido de asfalto

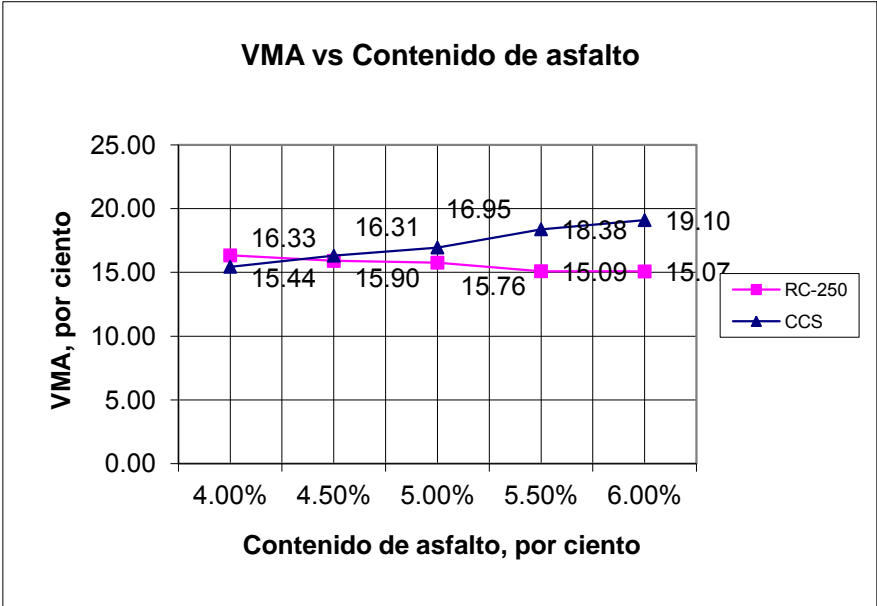
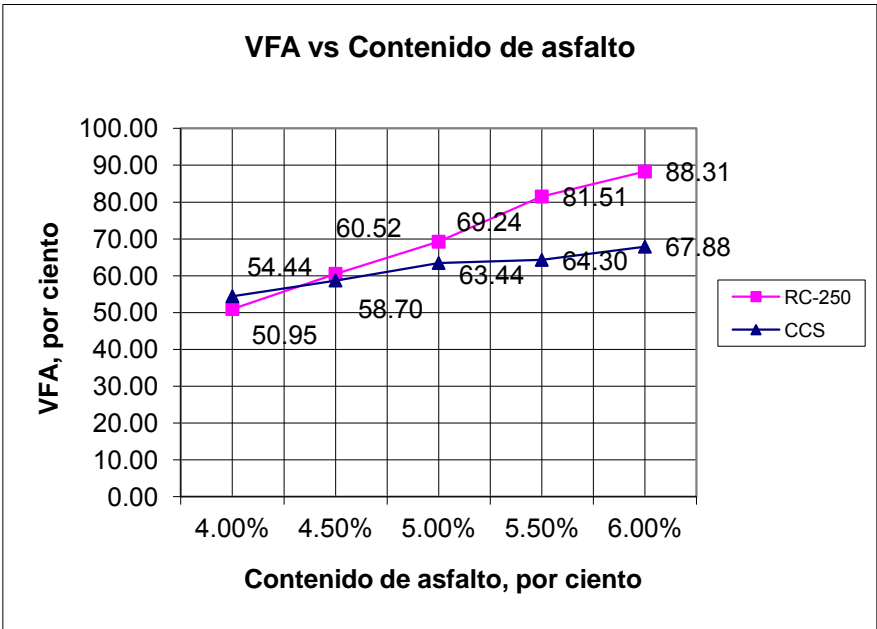


Figura 5.6. VFA vs Contenido de asfalto



- El peso específico aumenta con el contenido de asfalto y la curva de estabilidad tiene la forma de parábola invertida, alcanzando un valor máximo para un determinado contenido de asfalto.

- La curva Flujo vs Contenido de asfalto no presenta una clara tendencia a aumentar o disminuir, conforme se incrementa el contenido de asfalto.

En general, se puede decir que las gráficas muestran un comportamiento típico, excepto la gráfica de fluencia.

Teniendo en cuenta que el diseño de mezclas fue hecho para un tránsito pesado, es importante resaltar lo siguiente:

- El valor de estabilidad para el contenido óptimo de asfalto de 5.5% es de 8170 N. Este valor se encuentra tan sólo 2% por encima de lo recomendado por el Instituto del Asfalto, que es 8006 N (ver Tabla 4.10). Por lo tanto, no se puede afirmar que el diseño sea satisfactorio.

- Las muestras compactadas lograron alcanzar un porcentaje de vacíos de 3%, cumpliendo así con lo especificado.

- Para el mismo contenido óptimo de cemento asfáltico se tiene un valor de VMA de 15.9%, siendo el mínimo exigido 11%.

- El rango en el cual se debería encontrar el porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA) está comprendido entre 65-75%. Sin embargo, para el contenido óptimo de asfalto el valor obtenido fue de 81.51%.

- Para el contenido óptimo de asfalto el valor de fluencia es de 14.75 (0.25mm), siendo el rango especificado de 8-14 (0.25mm).

En resumen, del diseño de mezclas con RC-250 se puede resaltar lo siguiente:

- Se nota claramente que el parámetro crítico en el diseño es el porcentaje de vacíos llenos de cemento asfáltico (VFA), ya que su valor se encuentra por encima de lo especificado (aproximadamente es 10% mayor que el valor máximo permisible).

Un exceso de asfalto en la mezcla hace que éstas tengan una baja estabilidad, presentando además ondulaciones, ahuellamientos y afloramiento o exudación, tal como se explicó en el apartado 3.3 del Capítulo III.

Es importante mencionar que en nuestra ciudad y sus alrededores se han encontrado carpetas asfálticas con este tipo de fallas. No solamente en aquellas hechas con asfaltos diluidos, sino también en aquellas hechas con mezcla asfáltica en caliente.

La razón se podría explicar debido a un posible exceso de asfalto en la mezcla acompañado, además, de temperaturas elevadas.

5.3 Mezclas asfálticas con emulsión CSS-1.

5.3.1 Afinidad con el asfalto.

Para los agregados de Sojo y Cerromochó los ensayos realizados fueron satisfactorios, es decir, presentaron una buena afinidad con la emulsión catiónica de rotura lenta (ver numerales 4.1.5 y 4.2.4, Capítulo IV). La razón se podría encontrar en el siguiente concepto:

Tal como se describe en el Capítulo II, numeral 2.2.5, en el curado o corte de una mezcla asfáltica con emulsión catiónica prevalece el mecanismo de rotura fisicoquímico. Este mecanismo hace que la superficie del agregado pase de ser oleofóbica (hidrofílica) a oleofílica (hidrofóbica).

Por lo tanto, el uso de emulsiones en mezclas asfálticas mejoraría la propiedad de adherencia entre los agregados y el ligante, evitando así que ante la presencia de humedad las carpetas asfálticas se desgasten o desintegren, dándoles una mejor durabilidad.

5.3.2 Resultados en el diseño de mezclas.

De las gráficas de diseño obtenidas para determinar el contenido óptimo de asfalto (Figuras 5.1 a 5.6), se puede mencionar lo siguiente:

- El porcentaje de vacíos tiende a disminuir con el aumento en el contenido de asfalto; mientras que el VMA y el VFA, aumentan.
- El peso específico bulk y la estabilidad Marshall alcanzan un máximo para un determinado contenido de asfalto. La curva de estabilidad tiene la forma de parábola invertida.
- El flujo aumenta con el contenido de asfalto.

Es importante resaltar que para el rango entre 4 y 6% de cemento asfáltico el peso específico disminuye con el aumento en el contenido de asfalto. Esto es coherente si se observa que los porcentajes de VMA (Figura 5.5) y VFA (Figura 5.6), aumentan. Además, el máximo valor de peso específico se obtiene para un porcentaje de cemento asfáltico menor (4%) que el correspondiente al máximo valor de estabilidad (5%).

Teniendo en cuenta que la mezcla asfáltica se diseñó para un tránsito pesado, se puede destacar lo siguiente:

- Para el contenido óptimo de asfalto, 5.0%, la estabilidad de las briquetas ensayadas alcanzan un promedio de 10708 N. Este valor se encuentra aproximadamente 34% por encima de lo especificado (ver Tabla 4.10), que es 8006 N. Por lo tanto, se puede deducir que el diseño es satisfactorio, verificando así el uso de mezclas asfálticas con emulsión en el diseño de mezclas asfálticas para un tránsito pesado.
- Para el contenido óptimo de asfalto el porcentaje de vacíos es aproximadamente 6.2%. Si bien este valor se encuentra fuera de lo especificado por el Instituto del Asfalto para

mezclas en caliente (Tabla 4.10), sí cumple con la especificación para mezclas emulsión-agregado (Tabla 4.26). El rango especificado por esta última tabla está comprendido entre 2 y 8%.

- El porcentaje de VMA obtenido para el contenido óptimo de asfalto es de 16.57%, siendo el mínimo exigido 13%.
- El porcentaje de VFA para el contenido óptimo de asfalto es 63.44%, siendo el rango especificado de 65-75%. Este valor es sólo 2.5% menor que el valor mínimo especificado.
- El flujo, para el contenido óptimo de asfalto, tiene un valor de 13.23 (0.25mm), siendo el rango especificado de 8-14 (0.25mm).

Como se puede apreciar, la mezcla asfáltica con emulsión satisface todos los criterios de diseño exigidos por el Instituto del Asfalto tanto para mezclas en caliente, como para las mezclas emulsión-agregado. En consecuencia, se puede concluir diciendo que la carpeta asfáltica fabricada con emulsión tendrá mejores características que la mezcla asfáltica con RC-250.

5.4. Comparación de resultados para mezclas asfálticas con RC-250 y emulsión CSS-1.

La comparación se hará a partir de las gráficas de porcentaje de vacíos, peso específico, estabilidad, flujo, VMA y VFA, tal como se muestra en las Figuras 5.1 a 5.6. En ellas se observa lo siguiente:

- En general, el porcentaje de vacíos tiende a disminuir con el aumento en el contenido de asfalto tanto para el RC-250, como para la emulsión CSS-1. Esta tendencia es más clara en el diluido.
- Para el rango evaluado de contenido de cemento asfáltico (4-6%), el peso específico bulk para el RC-250 aumenta con el incremento en el contenido de asfalto, alcanzando su valor máximo para un porcentaje de asfalto de 5.5%. Por otro lado, el peso específico bulk para la emulsión disminuye con el aumento en el contenido de asfalto, siendo el valor máximo el correspondiente a un contenido de asfalto de 4%.

En el numeral 5.1 se mencionó que la tendencia típica de esta curva es la de tener forma de parábola invertida. Si éste fuese el caso, ya que no se podría afirmar aquí con exactitud por falta de puntos fuera de los límites de la gráfica (ver Figura 5.2), se diría que la emulsión CSS-1 alcanza el máximo peso específico a un contenido de cemento asfáltico menor que para el RC-250.

- La curva de estabilidad tiene la forma de parábola invertida, alcanzando un máximo para un determinado contenido de asfalto. Esto es válido tanto para el RC-250, como para la emulsión CSS-1. Sin embargo, se nota claramente que los valores de estabilidad obtenidos con la emulsión CSS-1 son mayores que los alcanzados con el RC-250. Para el contenido óptimo de asfalto de ambos, 5.5% para el RC-250 y 5.0% para la emulsión

CSS-1, esta última alcanza un 32% más de estabilidad que el diluido. Por lo tanto, las mezclas asfálticas con emulsión tendrán una mayor resistencia que las mezclas asfálticas con diluido

- Para el RC-250 la variación del flujo no es muy notoria, la curva es casi horizontal. Sin embargo, para la emulsión CSS-1 se nota claramente el aumento del flujo con el incremento en el contenido de asfalto. Si comparamos los valores de fluencia obtenidos para el contenido óptimo de asfalto, la emulsión satisface los criterios de diseño de la Tabla 4.10 mientras que para el diluido este valor se encuentra fuera del rango recomendado (ver numerales 5.2.2 y 5.3.2).
- Para el RC-250 el VMA disminuye con el incremento en el contenido de asfalto. Por el contrario, para la emulsión CSS-1 el VMA aumenta. Estas tendencias son coherentes si se comparan con las de la curva del peso específico.
- Tanto para el RC-250 como para la emulsión CSS-1, el VFA aumenta con el incremento en el contenido de asfalto. La pendiente de la curva para el diluido es mayor que para la emulsión.

5.5 Ventajas de las mezcla asfálticas con emulsión frente a las mezclas asfálticas con diluidos.

Con todo lo analizado y discutido anteriormente en ambas mezclas, se podrán reafirmar las ventajas de la emulsión frente a los diluidos expuestas en el Capítulo II. Estas ventajas podemos agruparlas de la siguiente manera:

- Técnicas: Las emulsiones reemplazan a los diluidos en la mayoría de aplicaciones y en muchos casos con ventajas (como, por ejemplo, mejor adherencia, posibilidad de mezclar con agregados húmedos, mayor durabilidad, etc.)
- Económicas: El uso de asfaltos diluidos involucra un gasto energético irrecuperable por la evaporación de los solventes del petróleo. En contraposición, el curado de una mezcla con emulsión sólo produce la evaporación de agua.
- De seguridad: El manejo de asfaltos emulsionados elimina los riesgos de inflamación que son inherentes a los diluidos.
- De protección ambiental: La evaporación de agua hace que las emulsiones asfálticas sean no contaminantes, en tanto que los diluidos liberan solventes orgánicos a la atmósfera.

Si nos referimos a las ventajas técnicas, podremos afirmar que éstas ya se han verificado con los resultados obtenidos en el Capítulo IV y discutidos en este capítulo. Sin embargo, se ha visto conveniente hacer un análisis más detallado a dos de las ventajas de las cuales no se han tratado aún. Estas ventajas son las económicas y las ambientales, las cuales se verán a continuación.

55.1 Ventajas económicas.

Para demostrar estas ventajas, se ha elaborado un análisis de costos unitarios de las partidas necesarias para la producción y colocación de mezclas asfálticas. Además, se muestra también un análisis de costos unitarios para la imprimación de bases antes de la colocación de la carpeta. En las Tablas y Figuras 5.7 a 5.15 se muestran estos análisis tanto para mezclas asfálticas con diluido como para mezclas asfálticas con emulsión.

Como se podrá apreciar la única diferencia, o la más notoria, está en el costo de producción de la mezcla. Según las Tablas 5.7 y 5.8, el costo de producción por metro cúbico de mezcla asfáltica con emulsión es aproximadamente 53% mayor que el costo unitario de producción de mezcla con diluido, más del doble.

De esta comparación inicial se podría concluir que las carpetas asfálticas con diluido resultan más económicas. Sin embargo, esto es válido si se les compara tan sólo como inversión inicial, lo cual no debería ser el elemento de juicio de mayor contundencia al elegir entre una u otra, como sucede en la actualidad, ya que al mediano y largo plazo las carpetas asfálticas con emulsión resultan mucho más convenientes debido a su mayor durabilidad.

La experiencia ha demostrado que las carpetas fabricadas de una mezcla asfáltica con emulsión tienen un período de vida de 10 a 20 años. Por otro lado, en nuestra región las carpetas asfálticas con diluido, en el mejor de los casos, tienen una vida útil de 2 años. Este pues debería ser el verdadero elemento de juicio al elegir entre el uso de la emulsión o del diluido.

Tabla 5.7. Análisis de costos unitarios para producción de mezcla asfáltica con diluido

Partida: Producción de mezcla asfáltica con diluido						
Rendimiento: 60,00 m3/día			Costo unitario Soles por M3			142.26
Descripción del insumo	Und	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	Subtotal
<u>Materiales</u>						
Arena gruesa	M3		0.8000	28.00	22.40	
Piedra chancada	M3		0.6500	35.00	22.75	
Asfalto líquido RC-250	GAL		28.0000	2.40	67.20	
Aditivo mejorador adherencia	GAL		0.3000	13.96	4.19	
Calentador de Aceite	HM		0.0169	29.72	0.50	117.04
<u>Mano de Obra</u>						
Capataz	HH	0.10	0.0133	10.08	0.13	
Operario	HH	1.00	0.1333	8.40	1.12	
Peón	HH	3.00	0.4000	6.70	2.68	3.93
<u>Equipo</u>						
Herramientas manuales	%MO		5.0000	3.93	0.20	
Cargador frontal	HM	1.00	0.1333	158.17	21.09	21.29

Tabla 5.8. Análisis de costos unitarios para producción de mezcla asfáltica con emulsión

Partida: Producción de mezcla asfáltica con emulsión						
Rendimiento: 100 m3/día			Costo unitario Soles por M3			218.03
Descripción del insumo	Und	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	Subtotal
<u>Materiales</u>						
Arena gruesa	M3		0.8000	28.00	22.40	
Piedra chancada	M3		0.6500	35.00	22.75	
Emulsión asfáltica CCS	GAL		32.0000	4.91	157.12	
Agua	GAL		25.0000	0.03	0.63	202.90
<u>Mano de Obra</u>						
Capataz	HH	0.10	0.0080	10.08	0.08	
Operario	HH	1.00	0.0800	8.40	0.67	
Peón	HH	3.00	0.2400	6.70	1.61	2.36
<u>Equipo</u>						
Herramientas manuales	%MO		5.0000	2.36	0.12	
Cargador frontal	HM	1.00	0.0800	158.17	12.65	12.77

Figura 5.9. Producción de mezcla asfáltica con diluido y emulsión



Tabla 5.10. Análisis de costos unitarios para colocación de mezcla asfáltica con diluido

Partida: Colocación de mezcla asfáltica con diluido						
Rendimiento: 1200 m2/día			Costo unitario Soles por M2			5.05
Descripción del insumo	Und	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	Subtotal
<u>Materiales</u>						
<u>Mano de Obra</u>						
Capataz	HH	0.10	0.0007	10.08	0.01	
Operario	HH	1.00	0.0067	8.40	0.06	
Peón	HH	3.00	0.0200	6.70	0.13	0.20
<u>Equipo</u>						
Herramientas manuales	%MO		5.0000	0.20	0.01	
Cargador frontal	HM	1.00	0.0067	158.17	1.05	
Camión volquete 10m3	HM	3.00	0.0200	107.65	2.15	
Esparcidora de asfalto	HM	1.00	0.0067	150.00	1.00	
Rodillo liso vibratorio	HM	1.00	0.0067	32.58	0.22	
Rodillo neumático	HM	1.00	0.0067	62.51	0.42	4.85

Tabla 5.11. Análisis de costos unitarios para colocación de mezcla asfáltica con emulsión

Partida: Colocación de mezcla asfáltica con emulsión						
Rendimiento: 1200 m2/día			Costo unitario Soles por M2			5.05
Descripción del insumo	Und	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	Subtotal
<u>Materiales</u>						
<u>Mano de Obra</u>						
Capataz	HH	0.10	0.0007	10.08	0.01	
Operario	HH	1.00	0.0067	8.40	0.06	
Peón	HH	3.00	0.0200	6.70	0.13	0.20
<u>Equipo</u>						
Herramientas manuales	%MO		5.0000	0.20	0.01	
Cargador frontal	HM	1.00	0.0067	158.17	1.05	
Camión volquete 10m3	HM	3.00	0.0200	107.65	2.15	
Esparcidora de asfalto	HM	1.00	0.0067	150.00	1.00	
Rodillo liso vibratorio	HM	1.00	0.0067	32.58	0.22	
Rodillo neumático	HM	1.00	0.0067	62.51	0.42	4.85

Figura 5.12. Colocación de mezcla asfáltica con diluido y emulsión

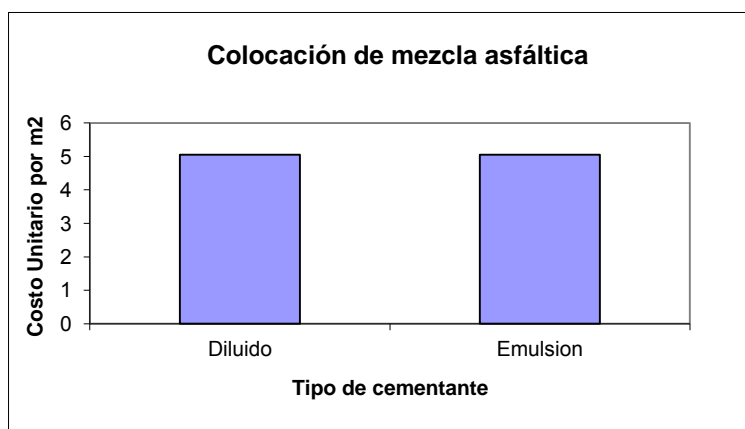


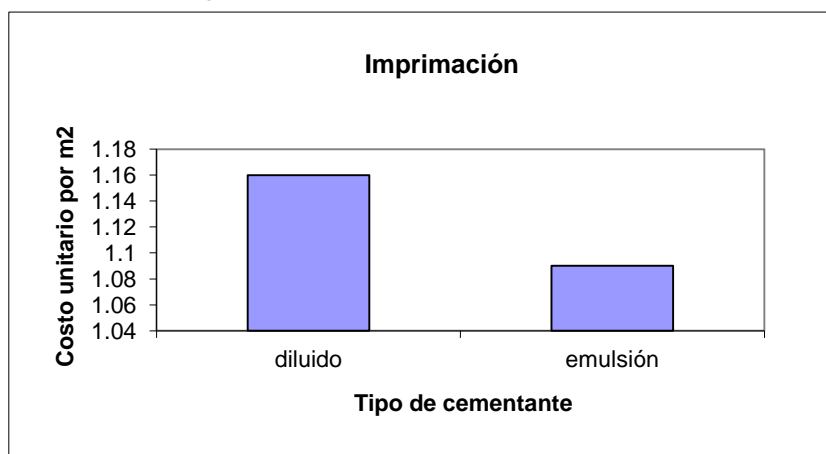
Tabla 5.13. Análisis de costos unitarios para imprimación con diluido

Partida: Imprimación con diluido							1.16
Rendimiento: 2800 m2/día							Costo unitario Soles por M3
Descripción del insumo	Und	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	Subtotal	
<u>Materiales</u>							
Asfalto líquido RC-250	GAL		0.3200	2.40	0.77		
Kerosene industrial	GAL		0.0800	2.15	0.17	0.94	
<u>Mano de Obra</u>							
Capataz	HH	0.10	0.0003	10.08	0.00		
Operario	HH	1.00	0.0029	8.40	0.02		
Peón	HH	2.00	0.0057	6.70	0.04	0.07	
<u>Equipo</u>							
Herramientas manuales	%MO		5.0000	0.07	0.00		
Camión imprimador 1800 glns	HM	1.00	0.0029	51.35	0.15	0.15	

Tabla 5.14. Análisis de costos unitarios para imprimación con emulsión

Partida: Imprimación con emulsión							1.09
Rendimiento: 2800 m2/día							Costo unitario Soles por M3
Descripción del insumo	Und	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	Subtotal	
<u>Materiales</u>							
Emulsión asfáltica	GAL		0.1800	4.91	0.88		
Agua	GAL		0.1800	0.03	0.01	0.89	
<u>Mano de Obra</u>							
Capataz	HH	0.10	0.0003	10.08	0.00		
Operario	HH	1.00	0.0029	8.40	0.02		
Peón	HH	2.00	0.0057	6.70	0.04	0.07	
<u>Equipo</u>							
Herramientas manuales	%MO		5.0000	0.07	0.00		
Camión imprimador 1800 glns	HM	1.00	0.0029	46.30	0.13	0.14	

Figura 5.15. Imprimación con diluido y emulsión



5.5.2 Ventajas ambientales.

Como se dijo anteriormente en el numeral 5.5, la evaporación de agua en las emulsiones hace que estas sean no contaminantes, mientras que los diluidos liberan solventes orgánicos a la atmósfera. Para ilustrar esta ventaja de la emulsión frente al diluido se presentará el siguiente ejemplo:

Supongamos que se va a pavimentar una vía de 6m de ancho y 100m de longitud (una cuadra) con una carpeta asfáltica de 2" hecha de una mezcla asfáltica con diluido (RC-250). Se puede hacer el siguiente análisis:

- Cantidad de mezcla asfáltica requerida = $6 \times 100 \times 0.07 = 42 \text{ m}^3$.
- Cantidad de asfalto líquido RC-250 = $28 \times 42 = 1176 \text{ gal}$.
- Cantidad de solvente a evaporarse = $0.20 \times 1176 = 235.2 \text{ gal}$

Además, a esto se le suma la cantidad de solvente evaporado en la imprimación:

- Cantidad de asfalto líquido RC-250 = $0.32 \times 6 \times 100 = 192 \text{ gal}$.
- Kerosene industrial a utilizar = $0.08 \times 6 \times 100 = 48 \text{ gal}$.
- Cantidad de solvente a evaporarse = $0.20 \times 192 + 48 = 86.4 \text{ gal}$.

En total, al pavimentar esta vía se evaporarán 321.6 galones de solvente.

Si este valor lo dividimos entre el área total asfaltada y el tiempo en que se libera el solvente, que es aproximadamente 24 horas, se podrá determinar la cantidad de solvente liberado a la atmósfera por unidad de área y por unidad de tiempo. Este valor sería de 0.0223 gal/m²/hora.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES¹

- Los agregados de Sojo, Cerromochó y todos aquellos con problemas de adherencia, no son recomendables para su uso en mezclas asfálticas, a menos que se utilice un buen aditivo mejorador de adherencia. De ser así, la cantidad de aditivo debería ser estrictamente controlada.

- El mecanismo fisicoquímico de rotura que prevalece en una emulsión catiónica hace que la superficie del agregado pase de ser hidrofílica a hidrofóbica.

- El uso de emulsiones asfálticas en nuestra región serían una buena alternativa de solución a los problemas de adherencia ligante-agregado presentados en las carpetas asfálticas en Piura. Como consecuencia, se tendrían pavimentos terminados de mejor calidad y más durables que las carpetas fabricadas con diluido.

- El uso de emulsiones asfálticas presenta ventajas técnicas, económicas, de seguridad y protección ambiental frente a los diluidos, las cuales están siendo desaprovechadas en nuestra región.

- Las emulsiones asfálticas también podrían ser utilizadas para fabricar mezclas asfálticas diseñadas para soportar un tráfico pesado.

¹ Es necesario indicar que los valores obtenidos en este estudio no se pueden tomar como genéricos. Esto debido a que corresponden a mezclas elaboradas únicamente con agregados de dos canteras en particular. Cuyas propiedades como forma y textura afectan considerablemente las propiedades medidas.

BIBLIOGRAFIA

- Manual de mezclas asfálticas en frío (Serie MC-14). Instituto del Asfalto.
- Principios de construcción de mezcla asfáltica en caliente (Serie MS-22). Instituto del Asfalto.
- Manual básico de emulsiones asfálticas (Serie MS-19). Instituto del Asfalto.
- Estudio de canteras para distintos proyectos de ingeniería. Tesis de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Las emulsiones asfálticas en las construcciones viales. Ing. Eleodoro A. Musurana.
- Apuntes del Ing. Gerardo Botasso. Universidad de La Plata – Argentina.