

CAPITULO IV

DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

4.1.- DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE (*)

4.1.1.-INTRODUCCION

En una mezcla asfáltica en caliente de pavimentación, el asfalto y el agregado son combinados en proporciones exactas: Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el desempeño de la misma como pavimento terminado. Existen dos métodos de diseño comúnmente utilizados para determinar las proporciones apropiadas de asfalto y agregado en una mezcla. Ellos son el método Marshall y el Método Hveem. En el presente estudio sólo trataremos el método Marshall.

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

4.1.2.- CARACTERISTICAS Y COMPORTAMIENTO DE LA MEZCLA

Una muestra de mezcla de pavimentación preparada en el laboratorio puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento. El análisis está enfocado hacia 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.
- Vacíos en el agregado mineral.
- Contenido de asfalto.

* Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Cap.3, pág. 57 del Asphalt Institute MS-22

4.1.2.1.- DENSIDAD

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

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

4.1.2.2.- VACIOS DE AIRE (o simplemente vacíos)

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

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

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. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el menor número posible (en la realidad) de vacíos: preferiblemente menos del 8 por ciento.

4.1.2.3.- VACIOS 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 en el agregado) y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. Cuando mayor sea el VMA más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para VMA los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho

de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durables será la mezcla. La fig. 4.1 ilustra el concepto de VMA y la fig. 4.2 presenta los valores requeridos.

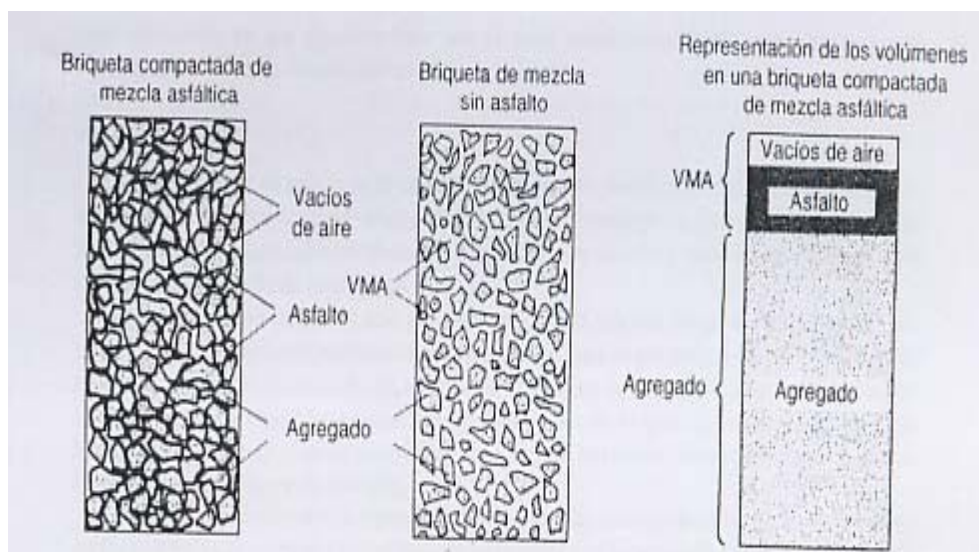


FIGURA N° 4.1.- Ilustración del VMA en una Probeta de Mezcla Compactada (Nota: para simplificar el volumen de asfalto absorbido no es mostrado)

Tamaño Máximo en mm Porcentaje		VMA mínimo, por ciento		
		Vacíos de Diseño, por ciento ²		
mm	in.	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	2.0	9.5	10.5	11.5
63	2.5	9.0	10.0	11.0

¹ Especificación Normal para Tamaños de Tamices usados en Pruebas, ASTM E 11 (AASHTO M 92)

² El tamaño máximo nominal de partícula es un tamaño mas grande que el primer tamiz que retiene mas de 10 por ciento del material.

³ Interpola el VMA mínimo para los valores de vacíos de diseño que se encuentren entre los que están citados.

FIGURA N° 4.2.- Vacíos en el Agregado Mineral (Requisitos de VMA)

Para que pueda lograrse un espesor durable de película de asfalto, se debe 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 el contenido de asfalto.

4.1.2.4.- 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 de asfalto de una mezcla particular se establece usando los criterios (discutidos mas adelante) dictados por el método de diseño seleccionado.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo del asfalto. Entre mas 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 mas 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 más pronunciada cuando hay relleno mineral (fracciones muy finas de agregado que pasan a través del tamiz de 0.075 mm (Nº 200). Los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral, pueden absorber, literalmente, gran parte el 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 o 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 ajuste 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 absorción, y para que además se puedan cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto. Los técnicos hablan 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 la superficie 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 de una mezcla. Generalmente se conoce la capacidad

de absorción de las fuentes comunes de agregados, pero es necesario efectuar ensayos cuidadosos cuando son usadas fuentes nuevas.

4.1.3.- PROPIEDADES CONSIDERADAS EN EL DISEÑO DE MEZCLAS

Las buenas mezclas asfálticas en caliente 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 en caliente. 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 mezclar es el de garantizar que la mezcla de pavimentación posea cada una de estas propiedades. Por lo tanto, hay que saber que significa cada una de estas propiedades, cómo es evaluada, y que representa en términos de rendimiento del pavimento.

4.1.3.1.- ESTABILIDAD

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

Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen del tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficiente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no mas 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) esta relacionada con características del agregado tales como forma y textura superficial. la cohesión resulta de la capacidad ligante del asfalto. Un grado propio de fricción y cohesión interna, en la mezcla, previene que las partículas de agregado se desplacen unas respecto a otras debido a las fuerzas ejercidas por el tráfico.

En términos generales, entre más angular sea la forma de las partículas de agregado y mas 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 mezclar mas económicas, en lugares donde se espere tráfico liviano, utilizando agregados con valores menores de fricción interna.

La fuerza ligante de la cohesión aumenta con aumentos en 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 aumentos 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 pérdida de fricción entre partículas- Existen muchas causas y efectos asociados con una estabilidad insuficiente en el pavimentos.

TABLA N° 4.1.- CAUSAS Y EFECTOS DE INESTABILIDAD EN EL PAVIMENTO

CAUSAS	EFECTOS
Exceso de asfalto en la mezcla	Ondulaciones, ahuellamientos 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 sin, o con pocas, superficies trituradas	Ahuellamiento y canalización.

4.1.3.2.- DURABILIDAD

La durabilidad de un pavimento es su habilidad para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades de 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 en tres formas. Estas son: usando la mayor cantidad posible de asfalto, usando una graduación densa de agregado resistente a la separación, y 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 mas 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, a la separación, contribuye, de tres maneras, a la durabilidad del pavimento. Una graduación densa proporciona un contacto más cercano entre las partículas del 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 como la cal hidratada.

La intrusión del aire y agua en el pavimento puede minimizarse si se diseña y compacta la mezcla para darla al pavimento la máximo impermeabilidad posible. Existen muchas causas y efectos con una poca durabilidad del pavimento.

TABLA N° 4.2.- CAUSAS Y EFECTOS DE UNA POCA DURABILIDAD

CAUSAS	EFECTOS
Bajo contenido de asfaltos	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 (Hidrofilitos)	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando un pavimento desgastado, o desintegrado

4.1.3.3.- IMPERMEABILIDAD

La impermeabilidad de un pavimento es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior, o a través de él. ***Esta característica esta 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 relaciona 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 muy 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.

TABLA N° 4.3.- CAUSAS Y EFECTOS DE LA PERMEABILIDAD

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 de diseño	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 la infiltración de agua y baja estabilidad.

4.1.3.4.- TRABAJABILIDAD

La trabajabilidad esta 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 de la 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 mas 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 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 alcantarillados, curvas pronunciadas y otros obstáculos similares. Es muy importante usar mezclas trabajables en dichos sitios.

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, si tienen algún efecto sobre esta propiedad. Debido a que la temperatura de la mezcla afecta la viscosidad el 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.

TABLA N° 4.4.- CAUSAS Y EFECTOS DE PROBLEMAS EN LA 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, poco durable.

4.1.3.4.- FLEXIBILIDAD

Flexibilidad es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse, sin que se agriete, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante. 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 e 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.

4.1.3.5.- RESISTENCIA A LA FATIGA

La resistencia a la fatiga de un pavimento es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Se ha demostrado, por medio de la investigación, 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. (El periodo de tiempo durante el cual un pavimento en servicio es adecuadamente resistente a la fatiga) disminuye.*** Así mismo, un pavimento que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga.

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

TABLA N° 4.5.- CAUSAS Y EFECTOS DE UNA MALA RESISTENCIA A LA FATIGA

CAUSAS	EFECTOS
Bajo contenido de asfalto	Agrietamiento por fatiga
Vacíos altos de diseño	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.

4.1.3.6.- RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO

Resistencia al deslizamiento es la habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie este 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 (hidroplaneo). La resistencia al deslizamiento se mide en terreno con una rueda normalizada bajo condiciones controladas de humedad en la superficie del pavimento, y a una velocidad de 65 km/hr (40 mi/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 9.5 mm (3/8 pulgadas) a 12.5 mm (1/2 pulgada). Además de tener una superficie áspera, los agregados debe 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.

TABLA N° 4.6.- CAUSAS Y EFECTOS DE 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 hidropneumático
Agregado pulido en la mezcla	Poca resistencia al deslizamiento

4.1.4.- METODO MARSHALL DE DISEÑO DE MEZCLAS- DESCRIPCION

A continuación se presenta una descripción general de los procedimientos seguidos en el Diseño Marshall de Mezclas. El procedimiento completo y detallado que se debe ser seguido se encuentra en la norma AASHTO T 245 (o ASTM D1559)

4.1.4.1.- PREPARACION PARA EFECTUAR LOS PROCEDIMIENTOS MARSHALL

Como ya se discutió en el capítulo de materiales, diferentes agregados y asfaltos presentan diferentes características. Estas características tienen un impacto directo sobre la naturaleza misma del pavimento. El primer paso en el método de diseño, entonces, es determinar las cualidades (estabilidad, durabilidad, trabajabilidad, resistencia al deslizamiento, etc.) que debe tener la mezcla de pavimentación y seleccionar un tipo de agregado y un tipo compatible de asfalto que puedan combinarse para producir esas cualidades. Una vez hecho esto, se puede empezar con la preparación de los ensayos.

□ SELECCION DE LAS MUESTRAS DE MATERIAL

La primera preparación para los ensayos consta de reunir muestras del asfalto y del agregado que va a ser usados en la mezcla de pavimentación. Es importante que las muestras de asfalto tengan características idénticas a las del asfalto que va a ser usado en la mezcla final. Lo mismo debe ocurrir con las muestras de agregado. La razón es simple: los datos extraídos de los procedimientos de diseño de mezclas determinan la fórmula o “receta” para la mezcla de pavimentación. La receta será exacta solamente si los ingredientes ensayados en el laboratorio tienen características idénticas a los ingredientes usados en el producto final.

Una amplia variedad de problemas graves, que van desde una mala trabajabilidad de la mezcla hasta una falla prematura del pavimento, son el resultado histórico de variaciones ocurridas entre los materiales ensayados en el laboratorio y los materiales usados en la realidad.

□ **PREPARACION DEL AGREGADO**

La relación viscosidad-temperatura del cemento asfáltico que va a ser usado debe ser ya conocida para establecer las temperaturas de mezclado y compactación en el laboratorio. En consecuencia, los procedimientos preliminares se enfocan hacia el agregado, con el propósito de identificar exactamente sus características. Estos procedimientos incluyen secar el agregado, determinar su peso específico, y efectuar un análisis granulométrico por lavado.

• ***Secando el Agregado***

El Método Marshall requiere que los agregados ensayados estén libres de humedad, tan práctico como sea posible. Esto evita que la humedad afecte los resultados de los ensayos.

Una muestra de cada agregado a ser ensayado se coloca en una bandeja, por separado, y se calienta en un horno a una temperatura de 110° C (230°F).

Después de cierto tiempo, la muestra caliente se pesa y, se registra su valor.

La muestra se calienta completamente una segunda vez, y se vuelve a pesar y a registrar su valor. Este procedimiento se repite hasta que el peso de la muestra permanezca constante después de dos calentamientos consecutivos, lo cual indica que la mayor cantidad posible de humedad se ha evaporado de la muestra.

• ***Análisis granulométrico por vía húmeda***

El análisis granulométrico por vía húmeda es un procedimiento para identificar las proporciones de partículas de tamaño diferente en las muestras del agregado. Esta información es importante porque las especificaciones de la mezcla deben estipular las proporciones necesarias de partículas de agregado de tamaño diferente, para producir una mezcla en caliente final con las características deseadas.

El análisis granulométrico por vía húmeda consta de los siguientes pasos:

1. Cada muestra de agregado es secada y pesada.
2. Luego de cada muestra es lavada a través de un tamiz de 0.075 mm (N° 200), para remover cualquier polvo mineral que este cubriendo el agregado.
3. Las muestras lavadas son secadas siguiente el procedimiento de calentado y pesado descrito anteriormente.
4. El peso seco de cada muestra es registrado. La cantidad de polvo mineral puede ser determinada si se comparan los pesos registrados de las muestras antes y después del lavado.
5. Para obtener pasos detallados del procedimiento referirse a la norma AASHTO T 11.

• ***Determinación del Peso Específico***

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

temperatura. El peso específico del agregado se expresa en múltiplos del peso específico del agua (la cual siempre tiene un valor de 1). Por ejemplo, una muestra de agregado que pese dos y media veces mas que un volumen igual de agua tiene un peso específico de 2.5.

El cálculo del peso específico de la muestra seca del agregado establece un punto de referencia para medir los pesos específicos necesarios en la determinación de las proporciones de agregado, asfalto, y vacíos que van a usarse en los métodos de diseño.

□ **PREPARACION DE LAS MUESTRAS (PROBETAS) DE ENSAYO**

Las probetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentación son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto. El margen de contenidos de asfalto usado en las briquetas de ensayo esta determinado con base en experiencia previa con los agregados de la mezcla. Este margen le da al laboratorio un punto de partida para determinar el contenido exacto de asfalto en la mezcla final. La proporción de agregado en las mezclas esta formulada por los resultados del análisis granulométrico.

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

1. El asfalto y el agregado se calientan completamente hasta que todas las partículas del agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
2. Las mezclas asfálticas calientes se colocan en los moldes pre-calentados Marshall como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de la mezcla al golpearla.
3. Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes del martillo (35, 50 o 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual esta siendo diseñada. Ambas caras de cada biqueta reciben el mismo número de golpes. Así, una probeta Marshall de 35 golpes recibe, realmente un total de 70 golpes. Una probeta de 50 golpes recibe 100 impactos. Después de completar la compactación las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

4.1.4.2.- PROCEDIMIENTO DE ENSAYO MARSHALL

Existen tres procedimientos de ensayo en el método del ensayo Marshall. Estos son: determinación del peso específico total, medición de la estabilidad Marshall, y análisis de la densidad y el contenido de vacíos de las probetas.

□ **DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECIFICO-TOTAL**

El peso específico total de cada probeta se determina tan pronto como las probetas recién compactadas se hayan enfriado a la temperatura ambiente. Esta medición de peso específico es esencial para un análisis preciso de densidad-vacíos. El peso específico total se determina usando el procedimiento descrito en la norma AASHTO T 166.

□ ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUENCIA

El ensayo de estabilidad esta dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. La fluencia mide la deformación, bajo carga que ocurre en la mezcla.

El procedimiento de los ensayos es el siguiente:

1. Las probetas son calentadas en el baño de agua a 60° C (140° F). Esta temperatura representa, normalmente, la temperatura más caliente que un pavimento en servicio va a experimentar.
2. La probeta es removida del baño, secada, y colocada rápidamente en el aparato Marshall. El aparato consiste de un dispositivo que aplica a una carga sobre la probeta y de unos medidores de carga y deformación (fluencia).
3. La carga del ensayo es aplicada a la probeta a una velocidad constante de 51 mm (2 pulgadas) por minuto hasta que la muestra falle. La falla esta definida como la carga máxima que la briqueta puede resistir.
4. La carga de falla se registra como el valor de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de fluencia se registra como la fluencia.

□ VALOR DE ESTABILIDAD MARSHALL

El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente. Durante un ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, los cabezales superior e inferior del aparato se acercan, y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador del cuadrante. Luego se suspende la carga una vez se obtiene la carga máxima. La carga máxima indicada por el medidor es el valor de Estabilidad Marshall.

Debido a que la estabilidad Marshall indica la resistencia de una mezcla a la deformación existe una tendencia a pensar que si un valor de estabilidad es bueno, entonces un valor más alto será mucho mejor.

Para muchos materiales de ingeniería, la resistencia del material es, frecuentemente, una medida de su calidad; sin embargo, este no es necesariamente el caso de las mezclas asfálticas en caliente. Las estabilidades extremadamente altas se obtienen a costa de durabilidad.

□ VALOR DE FLUENCIA MARSHALL

La fluencia Marshall, medida en centésimas de pulgada representa la deformación de la briqueta. La deformación esta indicada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta.

Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tiene tendencia a deformarse bajo las cargas del tránsito.

□ **ANÁLISIS DE DENSIDAD Y VACIOS**

Una vez que se completan los ensayos de estabilidad y fluencia, se procede a efectuar un análisis de densidad y vacíos para cada serie de Probetas de prueba. El propósito del análisis es el de determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada.

□ **ANÁLISIS DE VACIOS**

Los vacíos son las pequeñas bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestidas de asfalto. El porcentaje de vacíos se calcula a partir del peso específico total de cada probeta compactada y del peso específico teórico de la mezcla de pavimentación (sin vacíos). Este último puede ser calculado a partir de los pesos específicos del asfalto y el agregado de la mezcla, con un margen apropiado para tener en cuenta la cantidad de asfalto absorbido por el agregado, o directamente mediante un ensayo normalizado (AASHTO T 209¹) efectuado sobre la muestra de mezcla sin compactar. El peso específico total de las probetas compactadas se determina pesando las probetas en aire y en agua.

• ***Análisis de Peso Unitario***

El peso unitario promedio para cada muestra se determina multiplicando el peso específico total de la mezcla por 1000 Kg/m³ (62.4 lb/ft³).

• ***Análisis de VMA***

Los vacíos en el agregado mineral, VMA, están definidos por el espacio intergranular de vacíos que se encuentra entre las partículas de agregado de la mezcla de pavimentación compactada, incluyendo los vacíos de aire y el contenido efectivo de asfalto, y se expresan como un porcentaje del volumen total de la mezcla. El VMA es calculado con base en el peso específico total del agregado y se expresa como un porcentaje del volumen total de la mezcla compactada. Por lo tanto, el VMA puede ser calculado al restar el volumen de agregado (determinado mediante el peso específico total del agregado) del volumen total de la mezcla compactada.

• ***Análisis de VFA***

Los vacíos llenos de asfalto, VFA, son el porcentaje de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado (VMA) que se encuentran llenos de asfalto. El VMA abarca asfalto y aire, y por lo tanto, el VFA se calcula al restar los vacíos de aire de VMA, y luego dividiendo por el VMA, y expresando el valor final como un porcentaje.

¹ AASHTO T209: ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA MAXIMA

4.2.- METODO PROPUESTO DE ILLINOIS PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS EN FRIO EMULSION-AGREGADO (*)

Este es un método de diseño para mezclas en frío basado en una investigación desarrollada por la Universidad de Illinois usando el método de diseño de mezclas Marshall modificado y el ensayo de durabilidad húmeda. Por ser este método recomendado para mezclas en vía o mezclas en planta preparadas a temperatura ambiente se ha visto la necesidad de modificarlo, adecuarlo al diseño de mezclas con emulsiones tibias, siendo este un aporte de esta tesis.

El objetivo de este método es proveer la cantidad adecuada de asfalto residual que económicamente establezca el material granular con el fin de dar la resistencia o estabilidad requerida para soportar las aplicaciones de carga sin una deformación permanente excesiva o rotura por fatiga, por otro lado volver a la mezcla suficientemente inerte a los efectos de cambio de humedad.

4.2.1.- RESUMEN DEL METODO

El procedimiento de diseño 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 en la premezcla.
- 4) **Humedad de compactación:** Usando un contenido de asfalto residual tentativo y el agua requerida en la mezcla, se preparan 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 modificada y flujo.
- 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.

* Un Manual Básico de Emulsiones Asfálticas. Parte Tres, pág. 157 del Asphalt Institute MS-19, 1993.

4.2.2.- ENSAYOS SOBRE LOS AGREGADOS

Las propiedades del agregado son un factor determinante en muchas de las elecciones relacionadas con la mezcla óptima. Por lo tanto son necesarios los ensayos sobre los agregados. Se puede utilizar con las emulsiones una amplia variedad de materiales que incluye piedra triturada, roca, grava, arena, arena limosa, grava arenosa, escoria, material de recuperación de terrenos, desechos de explotación mineral u otros materiales inertes.

Se requieren aproximadamente 36.3 kg de agregado para realizar los ensayos sobre el material.

ENSAYOS SOBRE EL AGREGADO

Los siguientes ensayos deben ser ejecutados sobre las fuentes de agregado obtenidas de una cantera:

1) *Análisis por tamizado de agregado fino y grueso:*

- | | | |
|----------------------|------------|-------------|
| ➤ Tamizado en seco | ASTM C 136 | AASHTO T 27 |
| ➤ Tamizado en húmedo | ASTM C 117 | AASHTO T 37 |

2) *Densidad y absorción del agregado grueso:*

- | | | |
|--------------|-------------|-----------|
| ➤ ASTM C 127 | AASHTO T 85 | MTC E-206 |
|--------------|-------------|-----------|

3) *Densidad y absorción del agregado fino:*

- | | | |
|--------------|-------------|-----------|
| ➤ ASTM C 128 | AASHTO T 84 | MTC E-205 |
|--------------|-------------|-----------|

4) *Equivalente de arena del agregado fino*

- | | | |
|---------------|--------------|-----------|
| ➤ ASTM D 2419 | AASHTO T 176 | MTC E-209 |
|---------------|--------------|-----------|

Ensayos adicionales propuestos para los agregados

5) *Solidez de los agregados al uso de sulfato de sodio o de magnesio:*

- | | | |
|-------------|--------------|-----------|
| ➤ ASTM C 88 | AASHTO T 104 | MTC E-209 |
|-------------|--------------|-----------|

6) *Desgaste del agregado grueso en la máquina de los ángeles*

- | | | |
|--------------|-------------|-----------|
| ➤ ASTM C 131 | AASHTO T 96 | MTC E-207 |
|--------------|-------------|-----------|

Ensayos adicionales de calidad pueden ser exigidos por entidades particulares.

4.2.3.- ENSAYOS SOBRE LA EMULSION ASFALTICA

Las especificaciones de entidades para emulsiones, usualmente corresponden a los ensayos estándar y especificaciones de la ASTM o de la AASHTO y se listan a continuación:

➤ *Catiónicas* *ASTM D 2397 AASHTO M 208*

En algunos casos se exigen especificaciones adicionales para otros tipos de emulsiones tales como emulsiones de alta flotación (HFE). Estas especificaciones difieren un poco de entidad a entidad y deben ser comprobadas antes de la evaluación para el uso de mezclas emulsión-agregado.

Se requiere aproximadamente un galón (4 lt.) de cada tipo de emulsión y grado considerado para el proyecto y para cada tipo de agregado por evaluar durante el diseño de la mezcla.

4.2.4.- CONTENIDO ASFALTO RESIDUAL TENTATIVO

El contenido de asfalto residual se calcula en base al análisis granulométrico del agregado. Utilizaremos tres métodos de cálculo los que al promediarlos dan directamente el porcentaje de cemento asfáltico, con respecto a la mezcla total.

Estos métodos son:

4.2.4.1.- METODO FRANCES

$$SE = (1/100) * (0.237 G + 1.60 g + 12.85 A + 117.8 F)$$

Donde:

SE = Area Superficial o Superficie Específica

G = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz 3/4 y se retiene en el tamiz N° 04

g = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N° 04 y se retiene en el tamiz N° 40

A = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N° 40 y se retiene en el tamiz N° 200

F = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N° 200

Del gráfico de M. Duriez (Superficie Específica vs Porcentaje de Cemento Asfáltico) calculamos el porcentaje de Cemento Asfáltico para las emulsiones.

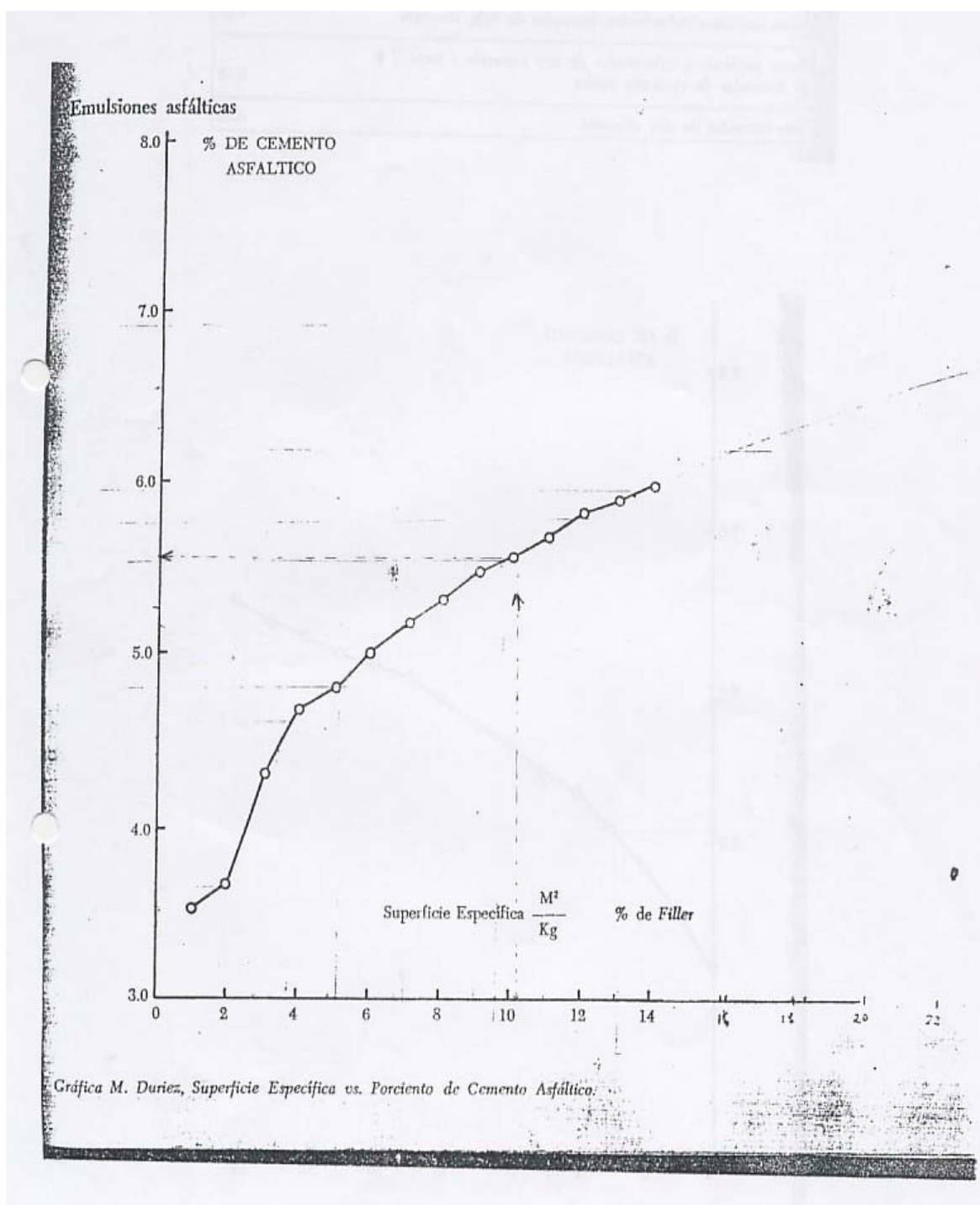


FIGURA N° 4.3.- Gráfica M. Duriez, Superficie Específica Vs % de Cemento Asfáltico

4.2.4.2.- METODO DEL INSTITUTO DEL ASFALTO (USA)

$$P = 0.035 a + 0.045 b + kc + K$$

Donde:

P = Porcentaje de cemento asfáltico respecto al peso de la mezcla

a = Porcentaje de agregado retenido en el tamiz N° 10

b = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N° 10 y se retiene en el tamiz N° 200

c = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N° 200

k = Toma los siguientes valores:

0.20	Cuando el porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N° 200 varia del 11% al 15%
0.18	Cuando el porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N° 200 varia del 06% al 10%
0.15	Cuando el porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N° 200 es menos del 05%

K = Varía de 0 a 2, dependiendo del grado de absorción de los pétreos.
Alta absorción : K = 2

4.2.4.1.- METODO DE LA SECRETARIA DE ASENTAMIENTOS HUMANOS Y OBRAS PUBLICAS (SAHOP).- MEXICO

$$P = (n/100) * (0.41 G + 2.05 g + 15.38 A + 53.3 F)$$

Donde:

P = Porcentaje de cemento asfáltico mínimo para cubrir el pétreo, respecto al peso del árido.

G = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz 3/4 y se retiene en el tamiz N° 04

g = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N° 04 y se retiene en el tamiz N° 40

A = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N° 40 y se retiene en el tamiz N° 200

F = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N° 200

n = Indice asfáltico

TIPO DE MATERIAL	n
Gravas o arenas de río o materiales redondeados de baja absorción	0.55
Gravas angulosas redondeadas, triturados de baja absorción	0.60
Gravas angulosas o redondeadas de alta absorción y rocas trituradas de absorción media	0.70
Rocas trituradas de alta absorción	0.80

4.2.5.- 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 una agregado dado, la selección debe basarse en las propiedades de la mezcla determinadas por comparación con otros tipos de mezcla. Otros factores adicionales que no pueden ser evaluados en el momento de diseño de la mezcla pero que deben ser tenidos en cuenta en el momento de la construcción son:

- Clima anticipable durante el tiempo de construcción.
- Tipo y proceso de mezcla
- Selección del equipo de construcción y procedimiento de campo usado.

El ensayo de recubrimiento se realiza mezclando el agregado con una cierta cantidad de agua y emulsión en donde se estima visualmente el recubrimiento como porcentaje del área total. *Para el caso de mezclas con emulsiones tibias el agregado, el agua y la emulsión han sido entibiados hasta alcanzar una temperatura de aproximadamente 70 °C y mezclados a esta temperatura.* La habilidad de una emulsión para recubrir un agregado es usualmente afectado por el contenido de agua de premezcla en el agregado. Esto es especialmente cierto para agregados que contiene un alto porcentaje de material que pasa el tamiz N° 200, donde insuficiente agua de premezcla resulta en una aglutinamiento del asfalto con los finos y por lo tanto un recubrimiento insuficiente. Por esta razón el ensayo de recubrimiento se ejecuta a diferentes contenidos de agua del agregado. Las emulsiones que no cumplan con el ensayo de recubrimiento no serán usadas posteriormente.

PROCEDIMIENTO

A) Obtener muestras representativas de cada tipo de emulsión y agregado considerada para el proyecto.

B) Calentar hasta un rango de temperatura comprendido entre 70 °C a 80 °C los agregados, el agua y la emulsión. De preferencia el agregado deberá estar completamente seco, en caso contrario se calcula el contenido de humedad para luego ser corregido.

C) Pesar una cierta cantidad de agregados grueso y fino en la combinación adecuada para la mezcla.

D) Colocar la combinación de agregado tibios en un recipiente de mezcla e incorpore un X% de agua tibia (70-80 °C), como porcentaje en peso del agregado seco y mezcle hasta que el agua se disperse totalmente. El agua debe ser añadida en una corriente delgada y el agregado mezclado hasta que el agua se disperse totalmente

E) Añadir la cantidad de emulsión asfáltica tibia como porcentaje en peso de agregado seco. La emulsión debe ser añadida también en una corriente delgada para minimizar la tendencia del asfalto a formar grumos con el agregado fino. Aproximadamente 5 minutos de mezclado son usualmente satisfactorios. En el caso del mezclado manual este debe ser lo suficientemente enérgico para dispersar el asfalto por toda la mezcla.

F) Calcular el contenido de agua de premezcla, como la cantidad de agua agregada al agregado antes de la emulsión más el contenido de humedad del agregado, en caso que no estuviese totalmente seco.

G) Permitir el secado al aire de la mezcla o con la ayuda de una estufa, prepare nuevas mezclas repitiendo los pasos anteriores añadiendo un incremento del 1% de agua. Las mezclas que comienzan a ser fluidas o a segregarse se consideran inaceptables.

H) Calificar la apariencia de la mezcla seca por estimación visual del área superficial del agregado cubierto con asfalto. Para cada contenido de agua de premezcla anote el recubrimiento estimado como un porcentaje del área total. Recubrimiento del agregado mayor del 50% debe considerarse aceptable, si la mezcla no obtiene el 50% de recubrimiento con ningún contenido de agua la emulsión debe ser rechazada para posterior consideración.

El agua de premezcla debe ser suficiente para obtener una dispersión óptima del asfalto y un incremento adicional de agua no mejora el recubrimiento. Todas las siguientes mezclas en el proceso de diseño deben realizarse con el contenido de agua de premezcla calculado.

4.2.6.- CONTENIDO OPTIMO DE AGUA EN LA COMPACTACIÓN

Las propiedades de la mezcla están íntimamente relacionadas con la densidad de las muestras compactadas. Por tal motivo es necesidad 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.

Para determinar el contenido óptimo de agua en la compactación se preparan tres muestras para cada contenido de agua en la compactación para ser evaluada, con incrementos en el contenido de agua de 1% para definir la curva de estabilidad – contenido de agua en la compactación. Generalmente son necesarios 4 incrementos de agua para este ensayo.

PROCEDIMIENTO

A) Se pesa una cierta cantidad (1000 gr.) de agregados tibios (70 – 80°C), y luego se adiciona agua tibia (70 – 80°C), siendo este contenido de agua el determinado por el ensayo de recubrimiento, se bate con una espátula hasta ver una masa uniforme.

B) Se adiciona la emulsión asfáltica tibia ($70 - 80^{\circ}\text{C}$), siendo este contenido el que se obtiene del contenido de asfalto residual tentativo, batirlo hasta que se mezcle uniformemente. El contenido de agua de la mezcla será la suma del agua adicionada más el agua contenida en la emulsión.

C) Se deja airear la mezcla para reducir el contenido de agua. Airee las sucesivas muestras con un 1% de incremento de agua en peso de agregado.

D) Una vez que la muestra haya llegado al contenido de agua deseado, se compactan usando los moldes Marshall y se dejan curar por 24 horas antes de retirarlas del molde.

E) Se ensaya las muestras por estabilidad Marshall y se prepara un gráfico de Estabilidad Marshall Modificado vs. Contenido de Agua en la compactación. Seleccione el pico de la curva como el contenido de agua óptimo en la compactación. El contenido de agua óptimo en la compactación debe ser usado en todas las siguientes compactaciones independientemente del contenido de asfalto residual.

4.2.7.- VARIACION DEL CONTENIDO DE EMULSION

En la determinación del contenido óptimo residual para la combinación de un agregado particular y asfalto, debe realizarse una serie de ensayos sobre las muestras en una gama de contenidos de asfalto residual. Las muestras de ensayo se preparan con incrementos del 0.5% en asfalto residual teniendo dos incrementos a ambos lados del contenido de asfalto residual tentativo.

Para completar el diseño de la mezcla se realizan los siguientes ensayos y análisis con los datos contenidos de la muestra compactada:

- Gravedad específica Bulk
- Estabilidad y flujo Marshall modificado de las muestras secas.
- Estabilidad y flujo a $22.2 \pm 1.1^{\circ}\text{C}$ de las muestras después de 4 días de inmersión
- Análisis de densidad y vacíos.
- Humedad de absorción durante el ensayo de inmersión.