

**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA**

Facultad de Ingeniería



## **Certificación de plantas asfálticas**

Trabajo de tesis presentado por Raúl Alejandro Alvarado Guzmán para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala  
2010



# **Certificación de plantas asfálticas**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA**

Facultad de Ingeniería

**Certificación de plantas asfálticas**

Trabajo de tesis presentado por Raúl Alejandro Alvarado  
Guzmán para optar al grado académico de Licenciado en  
Ingeniería Civil

Guatemala  
2010

Vo. Bo. :

(f) \_\_\_\_\_  
Ing. Hugo Leonel Fuentes Sandoval  
Asesor

(f) \_\_\_\_\_  
Ing. Roberto Gödo  
Director del Departamento de Ingeniería Civil

(f) \_\_\_\_\_  
Ing. Francisco Vela  
Catedrático

Fecha de aprobación: Guatemala. 08 de Diciembre de 2010.

# CONTENIDO

LÍSTA DE ILUSTRACIONES .....	ix
LISTA DE TABLAS .....	xi
RESUMEN .....	xii
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. OBJETIVOS .....	4
A. General .....	4
B. Específicos .....	4
III. INTRODUCCIÓN AL ASFALTO .....	5
A. Composición y propiedades mecánicas.....	5
B. Comportamiento.....	6
C. Propiedades físicas.....	7
1. Durabilidad.....	7
2. Reología.....	8
3. Seguridad del asfalto.....	9
4. Pureza.....	9
D. Sistemas de clasificación .....	9
1. Clasificación por penetración.....	9
2. Clasificación por viscosidad.....	11
3. Clasificación por desempeño (para Superpave). .....	13
IV. PLANTAS ASFÁLTICAS DE MEZCLA EN CALIENTE .....	16
A. Mezcla asfáltica en caliente .....	16
B. Evolución de los diseños de mezcla asfáltica en caliente .....	16
C. Tipos de plantas asfálticas de mezcla en caliente.....	18
V. MANEJO Y ALMACENAMIENTO DEL AGREGADO.....	20
A. Depósitos del agregado .....	20
1. Construcción de los depósitos. ....	20
2. Retiro del agregado del depósito.....	21
B. Sistemas de alimentación en frío para agregado nuevo. ....	22
1. Tolvas de alimentación en frío y bandas de alimentación.....	22

2. Banda colectora .....	25
3. Tamiz de control.....	25
4. Banda de carga.....	26
VI. SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE CEMENTO ASFÁLTICO .....	28
A. Tanques de almacenamiento.....	28
B. Bomba y sistemas de medición.....	30
1. Plantas de bachadas.....	30
2. Plantas de tambor.....	31
C. Calibración .....	33
D. Adición de aditivos contra el desvestimiento.....	34
VII. PLANTAS DE BACHADAS .....	35
A. Manejo del agregado.....	35
1. Almacenamiento del agregado .....	35
2. Sistema de alimentación en frío para agregado nuevo .....	35
3. Sistema de alimentación en frío para RAP .....	36
B. Sistema de abastecimiento de cemento asfáltico. ....	36
1. Tanques de almacenamiento.....	36
2. Sistema de bombeo .....	36
3. Adición de aditivos contra el desvestimiento. ....	37
C. Calentado y secado del agregado .....	37
D. Tamizado y almacenamiento del agregado caliente .....	39
1. Elevador en caliente.....	39
2. Cámara de tamizado .....	41
3. Tolvas calientes .....	43
4. Tolla de pesado .....	44
E. Mezclado del agregado y del cemento asfáltico.....	46
1. Capacidad del molino de mezclado .....	46
2. Tiempo de mezclado .....	48
F. Producción de mezcla reciclada. ....	50
1. Variables del reciclado .....	50
2. Operaciones del secador.....	53

3. Emisiones visibles.....	53
G. Carga directa de camiones o del silo .....	54
H. Control de emisiones.....	54
I. Calibración.....	55
VIII. PLANTAS CONTINUAS DE TAMBOR .....	57
A, Plantas continuas de tambor de flujo paralelo.....	57
1. Sistema de secado.....	57
2. Proceso de transferencia de calor .....	61
3. Inyección del cemento asfáltico.....	68
4. Sistema de reciclado .....	71
5. Tasas de producción.....	73
6. Eficiencia de la planta .....	76
7. Temperatura de la mezcla y de la chimenea .....	76
8. Monitoreo de la temperatura de descarga.....	77
B. Plantas continuas de tambor de contraflujo .....	78
1. Entrada del agregado .....	78
2. Secado y calentado .....	79
3. Unidad de mezclado.....	81
IX. SILOS DE CARGA Y ALMACENAMIENTO Y TÉCNICAS DE CARGA DE CAMIONES .....	85
A. Tipos y diseños de silos.....	85
1. Silos de carga contra silos de almacenamiento. ....	85
2. Aislamiento y calentado .....	86
3. Almacenamiento .....	86
B. Transporte de la mezcla al silo.....	88
C. Geometría del silo. ....	89
1. Cono del silo.....	89
D. Entrega de la mezcla.....	90
1. Segregación en la parte superior del silo.....	90
2. Segregación longitudinal.....	92
E. Carga de los camiones.....	92
X. SISTEMA DE CONTROL DE EMISIONES .....	95

A. Colector seco .....	95
B. Colector húmedo .....	96
C. Cámara de filtros.....	99
1. Tecnología .....	100
2. Materiales .....	102
3. Sistemas de limpieza .....	104
4. Sistemas de eliminación de finos .....	106
5. Funcionamiento .....	106
6. Mantenimiento .....	108
XI. CERTIFICACIÓN DE PLANTAS ASFÁLTICAS DE MEZCLA EN CALIENTE .....	109
A. Antecedentes .....	109
B. Objetivo.....	109
C. Procedimiento para la certificación .....	110
D. Limitaciones de la certificación .....	113
E. La matriz de verificación .....	113
1. Descripción de las áreas a evaluar en la matriz de verificación.....	113
XII. MATRIZ DE VERIFICACIÓN.....	124
XIII. CONCLUSIONES.....	131
XIV. RECOMENDACIONES.....	134
XV. BIBLIOGRAFÍA .....	136

## LÍSTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Esquema general de una planta de bachadas o dosificadora .....	18
Ilustración 2. Esquema general de una planta continua de tambor. ....	19
Ilustración 3. Depósito techado de agregado en planta de Asfalgua, S.A. ....	21
Ilustración 4. Carga de los tolvas de alimentación en frío. ....	23
Ilustración 5. Tolvas de alimentación en frío. ....	23
Ilustración 6. Banda de alimentación y compuerta del bin. ....	24
Ilustración 7. Tamiz de control. ....	25
Ilustración 8. Banda de carga y báscula de puente. Planta de Padegua S.A. ....	26
Ilustración 9. Tanque de almacenamiento de cemento asfáltico.....	28
Ilustración 10. Interior del tanque de almacenamiento de cemento asfáltico.....	29
Ilustración 11. Sistema transporte de cemento asfáltico de velocidad constante y volumen constante.....	32
Ilustración 12. Sistema de adición de aditivos.....	34
Ilustración 13. Funcionamiento del tambor secador.....	37
Ilustración 14. Sección interna del secador. ....	38
Ilustración 15. Torre de tamizado y mezcla de bachadas .....	40
Ilustración 16. Vista interior de la cámara de tamizado. ....	41
Ilustración 17. Interior del molino de mezclado. ....	46
Ilustración 18. Quemador de aire inducido y forzado.....	59
Ilustración 19. Quemador de aire forzado.....	60
Ilustración 20. Temperaturas de los agregados y los gases dentro del tambor de flujo paralelo. ....	61
Ilustración 21. Temperaturas de los agregados y los gases dentro del tambor de contraflujo.....	62
Ilustración 22. Procesos dentro de un tambor de flujo paralelo.....	69
Ilustración 23. Planta de tambor de flujo paralelo con mezclado exterior.....	70
Ilustración 24. Efecto de la humedad y la temperatura de descarga en la tasa de producción de una planta continua de tambor. ....	75
Ilustración 25. Planta de tambor de contraflujo con la unidad de mezclado separada. ...	78
Ilustración 26. Plantas de contraflujo de doble barril.....	79

Ilustración 27. Banda de carga. Planta de Asfalgua, S.A. ....	80
Ilustración 28. Tambor de doble barril. Planta de Padegua, S.A. ....	83
Ilustración 29. Banda transportadora de láminas de arrastre. Planta de Padegua, S.A. ....	88
Ilustración 30. Zona de carga de camiones. Planta de Padegua, S.A. ....	93
Ilustración 31. Consola para control del silo. ....	94
Ilustración 32. Cámara de expansión o caja de separación. ....	96
Ilustración 33. Esquema de un colector húmedo. ....	97
Ilustración 34. Estanque de desecho del colector húmedo. ....	98
Ilustración 35. Cámara de filtros, vista exterior. ....	100
Ilustración 36. Función de filtrado de la capa de polvo. ....	101
Ilustración 37. Lámina de tubos vacía. ....	102
Ilustración 38. Fibras de aramida. ....	103
Ilustración 39. Sistema de limpieza por impulsos de aire. ....	104
Ilustración 40. Ejemplo de certificado. ....	112

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas de la clasificación por penetración .....	10
Tabla 2. Grados de penetración y descripción.....	11
Tabla 3. Viscosidades del asfalto, según clasificación AC (AASHTO M226-80, 1986) ..	12
Tabla 4. Ventajas y desventajas de la prueba de viscosidad.....	13
Tabla 5. Clasificación basada en asfalto original y asfalto envejecido.....	13
Tabla 6. Limitaciones anteriores contra nuevas especificaciones y ensayos por desempeño.....	14
Tabla 7. Relación de la temperatura de la mezcla reciclada, porcentaje de RAP y contenido de humedad.....	52
Tabla 8. Tabla de relación de dimensiones del tambor, humedad del agregado y producción.....	74
Tabla 9. Verificación de los ensayos de laboratorio de la planta. ....	115

## RESUMEN

Una mezcla asfáltica en caliente es una composición formada por tres elementos fundamentales: agregado, cemento asfáltico y aditivos. El agregado generalmente consiste en roca triturada de distintos tamaños cuya granulometría constituye una de las partes más importantes del diseño de mezclas. El cemento asfáltico es el material más característico del concreto asfáltico y cumple la función de aglomerar los componentes de la mezcla. El cemento asfáltico se obtiene casi en su totalidad como un subproducto de la refinación del petróleo. La calidad del cemento asfáltico determina la durabilidad de la mezcla ya que es susceptible de distintas formas de degradación. Por esta razón, desde que se usa como ligante en mezclas asfálticas se han desarrollado pruebas que al inicio brindaban indicadores empíricos, hasta el día de hoy, que mediante equipo de ensayos de tecnología avanzada se ha hecho posible establecer parámetros físicos, químicos y mecánicos reales y objetivos propios de cada asfalto. No obstante, esta tecnología aún no está disponible en el país por lo que la calidad de un asfalto se continúa midiendo mediante pruebas empíricas.

En Guatemala existen más de 40 plantas asfálticas de mezcla en caliente y todas ellas pueden dividirse en dos grandes grupos: las plantas dosificadoras o de bachadas y las plantas continuas de tambor.

Las plantas de bachadas producen lotes de mezcla de forma independiente. El agregado llega a la planta y se deposita en las tolvas de alimentación en frío, luego un medio de transporte traslada el agregado hacia el secador. El secador es un tambor rotatorio con una llama en uno de sus extremos que cumple la función de calentar y reducir hasta el nivel mínimo el contenido de humedad en el agregado, este proceso tiende a generar emisiones tanto de finos como de hidrocarburos por lo que se añade en el proceso un sistema de control de emisiones. El agregado seco pasa a la torre de dosificación en la cual una serie de tamices garantiza la correcta granulometría de la mezcla y lo deposita en el molino de mezclado hasta que se alcanza el peso requerido.

El proceso de mezclado comienza y la inyección del cemento asfáltico se da unos segundos después. La mezcla producida se deposita en un silo de carga o de almacenamiento y finalmente se cargan los camiones transportadores.

Las plantas continuas de tambor no producen mezcla por lotes, sino que generan un flujo continuo de mezcla. Esto se logra uniendo el proceso de mezcla con el proceso de secar y calentar el agregado. Las plantas continuas de tambor se pueden dividir en dos grupos: las plantas de tambor de flujo paralelo y las plantas de tambor de contraflujo. La diferencia entre estos dos tipos de plantas es el sentido en el que fluye el agregado y la mezcla dentro del tambor con respecto al quemador (que es la llama que seca y calienta el agregado). En las plantas de flujo paralelo el agregado se deposita en el tambor del lado del quemador y fluye hacia el otro extremo a medida que se calienta y se seca. En las plantas de contraflujo, el agregado se deposita dentro del tambor del lado opuesto del quemador y fluye hacia él a medida que se calienta y seca el agregado. Las plantas de contraflujo son más eficientes por lo que su fabricación se ha hecho más popular en los últimos años. Una de las variantes más comunes de las plantas de contraflujo son las plantas con doble barril, en las cuales la inyección del cemento asfáltico se da en un segundo barril externo y que envuelve al barril del secador. La ventaja de estas plantas es que la llama del quemador nunca está en contacto directo con el cemento asfáltico. La diferencia principal con respecto a las plantas de bachadas es la ausencia de la torre de dosificación debido a que la mezcla se produce en el tambor de forma continua.

El objetivo de comprender los distintos procesos para generar mezcla asfáltica y las características fundamentales del equipo de producción de la mezcla es poder determinar una serie de requerimientos mínimos que permitan establecer la capacidad de una planta asfáltica particular de producir una mezcla adecuada. Para ello se desarrolló una matriz de verificación de plantas asfálticas de mezcla en caliente que incluye los dos tipos de plantas asfálticas existentes en el país. Esta matriz consiste en una serie de requerimientos ordenados en dieciocho incisos que son: 1) Verificación del

sistema de control de calidad o Manual de procedimientos; 2) Verificación de los agregados en los apilamientos; 3) Verificación de los ensayos de laboratorios de planta; 4) Verificación del sistema de alimentación de agregados; 5) Verificación del secador; 6) Verificación de camiones de volteo; 7) Verificación del acceso apropiado para los camiones; 8) Verificación de Básculas para camiones; 9) Verificación del Laboratorio de materiales y equipo para ensayos; 10) Verificación del sistema de control de emisiones; los incisos del 11 al 15 aplican para las plantas de Bachadas: 11) Verificación de las tolvas calientes y zarandas; 12) El filler mineral se introduce apropiadamente en la mezcla; 13) Verificación de la tolva de pesaje; 13) Verificación del mezclador; 14) Equipo de reciclaje; los incisos del 16 al 19 aplican a las plantas continuas de tambor: 16) Verificación de la planta; 17) Verificación del sistema abastecimiento de cemento asfáltico; 18) Verificación del funcionamiento del de proporcionamiento y mezcla automático; y 19) Equipo de Reciclaje. La mayoría de estos incisos contiene otros requisitos, para algunos de los cuales aplican normativas internacionales.

El hecho de obtener la certificación implica cumplir con todos los requisitos contenidos en la matriz. De no cumplir con alguno de ellos, no se podrá emitir la certificación. Este documento y su implementación cuenta con el apoyo de la Asociación de Productores de mezcla asfáltica en caliente (ASOASFALTOS) y debe ser extendido por una empresa certificadora o consultor independiente debidamente aprobado por la Asociación. De esta forma se logra obligar a aquellas plantas con equipo y prácticas defectuosas a invertir en la calidad de la mezcla para beneficiar al país y sus habitantes quienes son los principales usuarios del producto final.

# I. INTRODUCCIÓN

En Guatemala, el cien por ciento de las personas y la carga, se transportan por las carreteras, de aquí la importancia de la infraestructura vial. Sin embargo, debido a la falta de inversión en este rubro, a lo largo de los últimos sesenta años, existe una brecha considerable entre la infraestructura necesaria para facilitar el desarrollo, y la red vial existente. Esta situación requiere que se tomen decisiones para incrementar aceleradamente la construcción y pavimentación de carreteras.

Casi la totalidad de la red vial pavimentada está construida con la capa de rodadura de concreto asfáltico y, a pesar de que el uso de pavimentos de concreto hidráulico se está incrementando, aún no representan un porcentaje significativo de la red vial y la tendencia sigue siendo utilizar el concreto asfáltico en carreteras, con mejoras en la caracterización del ligante asfáltico.

El concreto asfáltico ha demostrado ser un buen material para su uso en la carpeta de rodadura y la vasta experiencia adquirida en todo el mundo por su uso tan popular ha permitido desarrollar continuamente mejoras en los materiales, mezclas, técnicas de diseño y colocación, que lo han vuelto el material preferido para la construcción de carreteras y calles a nivel mundial.

El asfalto es el ligante más utilizado en los pavimentos del país, en donde se consumieron 457,380 barriles americanos (19,209,960 galones) en 2009. Debido a la importancia de su utilización, y a la proliferación de Plantas de asfalto en los últimos años –actualmente existen en el país, poco más de 40 Plantas-, es necesario promover que los procedimientos de fabricación avalen una buena elaboración del producto.

Guatemala está al comienzo de un proceso de transición en el que se busca incorporar todo el conocimiento y la tecnología desarrollada por otros países a la producción y construcción de carreteras de asfalto a nivel nacional. Sin embargo, para llevar a cabo esta transición, se deben implementar normas que motiven a los productores y contratistas a innovar y generar productos de calidad.

La construcción y el mantenimiento de las carreteras son actividades complejas en las cuales intervienen muchos procesos que pueden alterar la calidad del producto final, tales como la selección de la materia prima, la producción de la mezcla y la colocación. Este trabajo se centra en uno de estos procesos específicamente para las mezclas asfálticas en caliente: la producción de la mezcla.

A pesar de que el objetivo principal de una planta asfáltica es que la mezcla cumpla con las especificaciones requeridas de diseño, independientemente del proceso utilizado para producirla, las condiciones de la planta asfáltica son un buen indicador de la calidad de la mezcla. Los estudios desarrollados en otros países y la experiencia nacional en la producción de mezcla asfáltica en caliente, permiten establecer una serie de procesos fundamentales que son necesarios para generar una mezcla resistente y duradera.

En este trabajo se propone la implementación de un procedimiento de certificación de plantas de asfalto a través de una entidad que agrupa los productores de asfalto, denominada Asoasfaltos; aunque el procedimiento es genérico, y puede ser utilizado por instituciones públicas.

Inicialmente, se desarrolla una introducción al asfalto, como parte fundamental de la mezcla asfáltica en caliente, su composición y propiedades, y una descripción de los sistemas de clasificación. Luego se describe detalladamente el proceso de producción en las plantas: manejo de agregados, abastecimiento de cemento asfáltico, tipos de plantas de asfalto (plantas de bachadas o dosificadoras y plantas continuas de tambor), silos de carga y de almacenamiento, carga de camiones y sistema de control de emisiones.

Finalmente, se desarrolla el procedimiento de la certificación y se presenta la matriz de verificación (lista de verificación, sí o no cumple, con observaciones), que constituye un documento que evalúa las condiciones del equipo de la planta y de las prácticas utilizadas durante el proceso de producción.

Aquellas plantas que cumplan todos los requisitos contenidos en la matriz, tendrán el derecho de adquirir la certificación que acredite la conformidad de la planta con los

requisitos establecidos y producir mezclas de calidad. La responsabilidad final sobre la mezcla producida corresponde a la empresa productora del asfalto, que está obligada a aprovechar su equipo, sus instalaciones y su conocimiento técnico en todo momento para producir mezclas que cumplan con las especificaciones.

La certificación de las plantas asfálticas de mezcla en caliente regula sólo una parte del complejo proceso de la pavimentación. Las demás actividades requieren el desarrollo de sus normativas específicas para garantizar un mayor tiempo de vida de las carreteras con lo cual se lograría un gran beneficio económico para el país.

## **II. OBJETIVOS**

### **A. General**

- Definir un procedimiento para la certificación de plantas de asfalto.

### **B. Específicos**

- Conocer los tipos de plantas asfálticas de mezcla en caliente existentes en Guatemala.
- Conocer con detalle el proceso de producción de mezcla asfáltica en caliente.
- Definir los subprocesos de producción de mezcla asfáltica en caliente.
- Definir la matriz de verificación para la certificación de mezclas asfálticas en caliente.
- Proponer las acciones para implementar el proceso de certificación de Plantas Asfálticas.

### III. INTRODUCCIÓN AL ASFALTO

El asfalto es un material aglomerante, formado por complejas cadenas de hidrocarburos pesados no volátiles. Es altamente impermeable, cementante, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes. Por estas propiedades el asfalto es ampliamente utilizado en la construcción de pavimentos. (Roberts, 1996)

El asfalto es un material que puede ser encontrado en forma natural o provenir de la refinación del petróleo. Los naturales son producto de un proceso natural de evaporación de los componentes volátiles, dejando únicamente los asfálticos. Los depósitos naturales se encuentran en depresiones terrestres formando lagos de asfalto, o bien pueden encontrarse impregnados en los poros de algunas rocas llamadas *rocas asfálticas*. En la naturaleza es común encontrar el asfalto mezclado con elementos minerales y orgánicos, por lo que muchas veces es necesario someterlo a procesos de purificación, de otro modo no podría usarse para la pavimentación con resultados positivos. Actualmente, los asfaltos naturales son muy poco utilizados para la pavimentación. (Roberts, 1996)

Por otro lado, se tienen los asfaltos derivados de la refinación del petróleo que son los más utilizados en el mundo, los cuales se obtienen por medio de un proceso de destilación industrial del crudo, básicamente constituye el residuo. La proporción de asfalto varía de una fuente de petróleo a otra, por lo que suelen clasificarse de acuerdo a la cantidad de asfalto como petróleos de base asfáltica, de base parafínica y de base mixta. Siendo el primero con mayor proporción de asfalto, el segundo con mayor proporción de parafina y menor proporción de asfalto y el último con una mezcla de parafina y asfalto. El asfalto obtenido a partir de petróleos con altos contenidos de parafina no es adecuado para la pavimentación ya que posee algunas propiedades físicas y mecánicas que reducen la vida útil de los pavimentos. (Roberts, 1996)

#### **A. Composición y propiedades mecánicas**

A nivel molecular, el asfalto es una mezcla de moléculas orgánicas complejas que varían en peso molecular, desde varios cientos hasta varios miles. Sin embargo muchas de las características del asfalto están regidas por sus propiedades intermoleculares.

A nivel intermolecular es un fluido polar disperso (DPF, por sus siglas en inglés), el modelo teórico describe el asfalto como una asociación tridimensional de moléculas polares (conocidas como asfaltenos) dispersas en un fluido apolar o con polaridad relativamente baja (conocidos como maltenos). Estas moléculas son capaces de formar enlaces intermoleculares bipolares y aparecen dispersos en el tercer componente del asfalto: los aceites. (Roberts, 1996)

El asfalto es considerado un sistema coloidal complejo de hidrocarburos. El modelo adoptado para configurar la estructura del asfalto se denomina modelo micelar, el cual provee de una razonable explicación de dicha estructura, en el cual existen dos fases; una discontinua (aromática) formada por dos asfaltenos y una continua que rodea y solubiliza a los asfaltenos, denominada maltenos. Las resinas contenidas en los maltenos son intermediarias en el asfalto, cumpliendo la misión de homogeneizar y compatibilizar a los, de otra manera insolubles, asfaltenos. Los maltenos y asfaltenos existen como islas flotando en los aceites. (Roberts, 1996)

El resultado de estas características químicas es un material que se comporta:

- Elásticamente, por el efecto de las redes de moléculas polares.
- Viscosamente, porque varias partes de las redes de moléculas polares se pueden mover respecto a las otras debido a su dispersión en el fluido de moléculas apolares.

Entonces, desde el punto de vista ingenieril, el asfalto es un material visco-elástico.

## **B. Comportamiento**

Robertson *et al.* (2001) describió el comportamiento del asfalto en términos de sus mecanismos de falla.

- Envejecimiento:
  - En algunos casos es reversible y en otros no. Es irreversible cuando el envejecimiento está asociado a la oxidación a nivel molecular.
  - Relacionado con la oxidación a nivel molecular, aumenta la viscosidad.

- Agrietamiento y deformación permanente:
  - Si la red molecular es simple y no está interconectada el asfalto tenderá a deformarse inelásticamente.
- Ruptura por fatiga:
  - Si la red molecular se vuelve muy organizada y rígida, el asfalto se fracturará en lugar de deformarse elásticamente.
- Ruptura por temperatura:
  - A bajas temperaturas, la estructura molecular se ordena (incluso el fluido apolar) y es más susceptible de rupturas.
- Desvestimiento:
  - Incapacidad de adherirse a los agregados y otros materiales, regularmente por acción del agua.
- Daño por humedad:
  - El agua es aceptada por las moléculas polares del asfalto, lo cual puede causar *desvestimiento* o decremento en la viscosidad del asfalto. Actúa como solvente en el asfalto reduciendo su capacidad para resistir esfuerzos y aumentando el agrietamiento.

## C. Propiedades físicas

Las propiedades físicas relevantes son aquellas que describen como se comportará el asfalto como parte de la mezcla asfáltica. La dificultad en la medición de las propiedades físicas radica en desarrollar pruebas cuantitativas que permitan comparar los resultados obtenidos entre varias muestras.

**1. Durabilidad.** Es una medida de cómo cambian las propiedades físicas con el envejecimiento. En general, con el tiempo, el asfalto aumenta su viscosidad, se agrieta y se vuelve quebradizo. (Robertson, 2001)

La durabilidad es el resultado de varios factores, los principales son:

- Oxidación
- Polimerización: evaporación de componentes más ligeros.
- Tixotropía: Incremento en la viscosidad y, por lo tanto, endurecimiento del asfalto. Es posible revertirlo si el asfalto es calentado y agitado.
- Sinéresis: Separación de los líquidos menos viscosos de la red molecular de asfaltos más viscosa.
- Separación: Remoción de los componentes aceitosos, resinas o asfaltenos del asfalto por absorción de algunos agregados porosos.

Existen dos tipos de envejecimiento. El envejecimiento a corto plazo, que ocurre durante la producción de la mezcla asfáltica en caliente; y el envejecimiento a largo plazo, que ocurre luego de la colocación del pavimento asfáltico y es producido por factores ambientales y cargas. (Robertson, 2001)

No existe una medición directa del envejecimiento, los efectos del envejecimiento se encuentran sometiendo muestras de asfalto a condiciones simuladas de envejecimiento y luego haciendo pruebas físicas estándar como viscosidad, reómetro de corte dinámico, reómetro de flexión de viga y la prueba de tensión directa. (Robertson, 2001)

**2. Reología.** La reología es el estudio de la deformación y flujo de la materia, es decir las relaciones esfuerzo-deformación. La deformación y el flujo del asfalto es importante para determinar el desempeño del pavimento asfáltico. Las mezclas que se deforman y fluyen mucho pueden ser susceptibles al agrietamiento y a la exudación (bleeding), mientras que aquellas que son muy rígidas son susceptibles a la fatiga o ruptura térmica. (Robertson, 2001)

Debido a que la reología del asfalto varía con la temperatura, la clasificación reológica involucra dos consideraciones:

- a. Para comparar asfaltos distintos, sus propiedades reológicas deben ser medidas a una temperatura común de referencia. (Robertson, 2001)

- b. Para clasificar completamente un asfalto, sus propiedades reológicas deben ser examinadas en el rango de temperaturas que experimentará a lo largo de su vida útil. (Robertson, 2001)

**3. Seguridad del asfalto.** El cemento asfáltico, como muchos otros materiales, se evapora cuando se calienta. A temperaturas extremadamente altas (arriba de aquellas experimentadas durante su producción y colocación de la mezcla asfáltica) el cemento asfáltico puede liberar suficiente vapor como para incrementar la concentración volátil de la capa inmediatamente superior al cemento asfáltico a un punto al cual encenderá una llama cuando sea expuesto a una chispa o a una llama. Esto es llamado punto de llama. Por razones de seguridad el punto de llama del cemento asfáltico es medido y controlado. El punto de inflamación, el cual ocurre después del punto de llama, es la temperatura a la cual el material (no sólo los vapores) mantiene la combustión. (Robertson, 2001)

**4. Pureza.** El cemento asfáltico, tal como es usado para la mezcla asfáltica, debería consistir en casi solo bitumen puro. Las impurezas no son compuestos cementantes activos y su presencia es determinante para el desempeño del cemento asfáltico. Las impurezas minerales se pueden cuantificar disolviendo una muestra de cemento asfáltico en tricloroetileno o en 1-1-1 tricloroetano y colar la muestra en un filtro. Todo lo que queda en el filtro se considera impureza. Las impurezas de agua son cuantificadas por destilación. (Robertson, 2001)

## D. Sistemas de clasificación

Los asfaltos se catalogan por uno o más métodos simples de clasificación. Los siguientes métodos, ordenados de simple a complejo, representan una evolución en la habilidad de caracterizar el asfalto:

- Clasificación por penetración
- Clasificación por viscosidad
- Clasificación por desempeño del *Superpave*

**1. Clasificación por penetración.** El sistema de clasificación por penetración fue desarrollado a principios de la década de 1,900 para clasificar la consistencia

de asfaltos semi-sólidos. La clasificación por penetración mide las siguientes características:

- Profundidad de penetración de una aguja de 100g a 25°C
- Temperatura de llama (flash point)
- Ductilidad a 25°C
- Solubilidad en tricloroetano
- Prueba de horno de capa delgada (Thin film oven test), la cual mide el efecto del envejecimiento a corto plazo que ocurre durante la mezcla con agregado caliente basado en dos parámetros principales:
  - Penetración permanente
  - Ductilidad a 25°C

La prueba de penetración se basa en el hecho de que mientras menos viscoso sea el asfalto, mayor será la penetración de la aguja. La profundidad de penetración es empírica y se correlaciona con el desempeño del asfalto.

Asfaltos con números altos de penetración (llamados "suaves") son usados para climas fríos y los asfaltos con números pequeños de penetración (llamados "duros") son usados en climas más cálidos. Es importante mencionar que este sistema de clasificación ya no se usa en los Estados Unidos.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de la clasificación por penetración

<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La prueba se lleva a cabo a 25°C (77°F) lo cual es razonablemente cercano a la temperatura típica del pavimento.</li> <li>• Provee una mejor correlación con las propiedades de los asfaltos a bajas temperaturas que la prueba de viscosidad, la cual se lleva a cabo a 60°C.</li> <li>• Los cambios en la reología del asfalto se pueden determinar llevando a cabo la prueba a distintas temperaturas.</li> <li>• La prueba es rápida y barata por lo que puede ser realizada en campo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La prueba es empírica y no mide directamente ningún parámetro fundamental de ingeniería, tal como la viscosidad.</li> <li>• La velocidad de corte es variable y alta durante la prueba, debido a que el asfalto es un fluido no newtoniano a 25°C, esto afectará los resultados.</li> <li>• Los cambios en la reología del asfalto no pueden determinarse llevando a cabo una sola prueba a 25°C.</li> <li>• La prueba no provee información con la cual establecer temperaturas de mezcla y colocación.</li> </ul>

Tabla 2. Grados de penetración y descripción

Grado de penetración	Descripción
40-50	Duro
60-70	Grados típicos (en Guatemala)
85-100	
120-150	
200-300	Suave (para climas fríos)

**2. Clasificación por viscosidad.** A comienzos de la década de 1,960, se desarrolló un nuevo sistema de clasificación que incorporaba una prueba científica de viscosidad. Esta prueba reemplazó a la prueba de penetración para la clasificación del asfalto. La clasificación por viscosidad cuantifica las siguientes características del asfalto:

- Viscosidad a 60°C
- Viscosidad a 135 °C
- Profundidad de penetración de una aguja de 100g aplicada durante 5 segundos a 25°C
- Temperatura de encendido (flash point)
- Ductilidad a 25°C
- Solubilidad en tricloroetileno
- Prueba de horno de capa delgada (*Thin film oven test*), con el objeto de medir el efecto del envejecimiento. Esta prueba mide:
  - Viscosidad a 60°C
  - Ductilidad a 25°C

Las especificaciones para los cementos asfálticos clasificados por viscosidad se basan normalmente en rangos a 60°C (140°F). También se especifica una viscosidad mínima a 135°C (275°F).

El propósito es prescribir valores límites de consistencia a esas dos temperaturas. La temperatura de 60°C se escogió debido a que es aproximadamente la máxima temperatura de servicio de las carreteras. La temperatura de 135°C se escogió como

una que aproxima las temperaturas de mezcla y colocación de las mezclas asfálticas en caliente.

La prueba de viscosidad a 60°C emplea un viscosímetro capilar, tal como el viscosímetro de vacío del Asphalt Institute.

Debido a que el cemento asfáltico a 60°C es muy viscoso para fluir a través de un tubo capilar, se aplica un vacío para inducir el flujo. Los cementos asfálticos son suficientemente fluidos a 135°C para fluir a través de tubos capilares, únicamente bajo las fuerzas gravitatorias. Entonces no se requiere el vacío, se utiliza un tipo diferente de viscosímetro: el viscosímetro Zeifuchs de brazo cruzado. Las medidas de viscosidad a 135°C (275°F) se expresan en centistokes y las medidas de viscosidad a 60°C (140°F) en poises. La gravedad induce el flujo en el ensayo de viscosidad cinemática (resulta en centistokes), y la densidad del material afecta la tasa de flujo dentro del tubo capilar.

Tabla 3. Viscosidades del asfalto, según clasificación AC (AASHTO M226-80, 1986)

PROPIEDAD	AC – 10	AC – 20	AC-40
Viscosidad, 60°C (140°F), Poises	1000+-200	2000+-400	4000+-800
Viscosidad, 135°C (275°F), Centistokes	150 min.	210 min.	300 min.

Por ejemplo, el AC-20 es un asfalto que tiene una viscosidad a 60°C de 2,000 +- 400 poises, o si cumple la especificación para AC-20 debe tener una viscosidad promedio del número x 100 = 20 x 100 = 2000 Poises.

La clasificación por viscosidad puede ser realizada sobre una muestra de asfalto original (llamada clasificación AC) o sobre muestras envejecidas (llamada clasificación AR). La prueba de viscosidad AR está basada en la viscosidad de una muestra envejecida en el horno para capa delgada giratoria (Rolling Thin Film Oven Test). Con la clasificación AC, el asfalto se clasifica de acuerdo a las propiedades que posee antes de iniciar el proceso de producción de mezcla asfáltica en caliente. La clasificación AR busca simular las propiedades del asfalto luego del proceso de producción de mezcla asfáltica en caliente y, por lo tanto, los resultados son más representativos sobre lo que ocurre en los pavimentos asfálticos.

Tabla 4. Ventajas y desventajas de la prueba de viscosidad

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• A diferencia de la profundidad de penetración, la viscosidad es un parámetro de ingeniería.</li> <li>• La temperatura de la prueba se correlacionan bien a: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 25°C, Temperatura promedio del pavimento</li> <li>○ 60°C, Temperatura alta para un pavimento.</li> <li>○ 135°C, Temperatura de mezcla asfáltica</li> </ul> </li> <li>• El cambio en la reología del asfalto debida a la temperatura puede ser, en alguna medida, determinada porque la viscosidad es medida a tres temperaturas distintas.</li> <li>• El equipo para realizar la prueba es estándar y fácil de adquirir.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La clasificación principal (hecha a 25°C) puede no reflejar la reología del asfalto a bajas temperaturas.</li> <li>• Cuando se usa el sistema de clasificación AC, la prueba en el horno para capa delgada (Thin Film Oven Test) produce asfaltos con viscosidades muy variables. Por lo tanto, asfaltos de la misma clasificación AC pueden comportarse diferente después de la colocación de la mezcla.</li> <li>• La prueba es más cara y lleva más tiempo que la prueba de penetración.</li> </ul>

La siguiente tabla muestra las clasificaciones de las viscosidades estándar para los sistemas AC y AR de las normas AASHTO M226 y ASTM D3381. Los grados típicos para las mezclas asfálticas usadas en Estados Unidos son AC-10, AC-20, AC-30, AR-4,000 y AR-8,000:

Tabla 5. Clasificación basada en asfalto original y asfalto envejecido.

NORMA	CLASIFICACIÓN BASADA EN ASFALTO ORIGINAL (AC)						CLASIFICACIÓN BASADA EN EL ASFALTO ENVEJECIDO (AR)				
	<b>AASHTO M226</b>	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40	AR-10	AR-20	AR-40	AR-80
<b>ASTM D3381</b>	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40	AR-1000	AR-2000	AR-4000	AR-8000	AR-16000

**3. Clasificación por desempeño (para Superpave).** La clasificación por penetración y la clasificación por viscosidad están limitadas de alguna forma por su capacidad de caracterizar de manera completa el asfalto usado en los pavimentos asfálticos mezclados en caliente. Por esta razón, como parte de las investigaciones con *superpave*, se desarrollaron nuevos ensayos para medir con mayor precisión y para

caracterizar por completo el asfalto utilizado en la mezcla en caliente. Estos ensayos y especificaciones están diseñados para cuantificar parámetros que reflejan el desempeño de los pavimentos asfálticos tales como el agrietamiento, la ruptura por fatiga y la ruptura por temperatura.

La clasificación por desempeño del *superpave* está basada en la idea de que las propiedades del asfalto mezclado en caliente deben estar relacionadas con las condiciones bajo las cuales será usado a lo largo de su vida útil. Esto incluye condiciones climáticas y consideraciones de envejecimiento. La clasificación por desempeño utiliza un conjunto de pruebas, al igual que lo hacen la clasificación por penetración y por viscosidad, pero especifica que cada cemento asfáltico debe pasar estas pruebas a temperaturas específicas que dependen de las condiciones climáticas del área de uso.

Tabla 6. Limitaciones anteriores contra nuevas especificaciones y ensayos por desempeño.

<b>Limitaciones de los sistemas de clasificación por penetración y viscosidad</b>	<b>Pruebas para <i>superpave</i> que superan las limitaciones anteriores</b>
Las pruebas de penetración y ductilidad son empíricas y no se relacionan de manera directa con el desempeño del pavimento.	Las propiedades físicas medidas se relacionan de manera directa con el desempeño en campo por principios físicos cuantificables.
Las pruebas se llevan a cabo a una temperatura estándar sin considerar el clima en el lugar en el que se usará el asfalto.	El criterio de las pruebas permanece constante, sin embargo la temperatura a la cual se deben cumplir estos criterios varía de acuerdo a las condiciones climáticas del lugar en el que se usará el asfalto.
El rango de temperaturas a las cuales estará sometido el asfalto no es cubierto de manera adecuada. Por ejemplo, no existe un método de prueba para la dureza del asfalto a bajas temperaturas para controlar la ruptura por temperatura.	Se cubre todo el rango de temperaturas a las cuales estará sometido el asfalto en un sitio particular.
Los ensayos sólo consideran envejecimiento del asfalto a corto plazo (ensayo al horno de capa delgada - <i>thin film oven test</i> -). Sin embargo, el envejecimiento a largo plazo es un factor significativo en la ruptura por fatiga y ruptura por bajas temperaturas.	Se simulan y ensayan 3 estados de envejecimiento: 1. Estado original del asfalto, antes de su mezclado con el agregado. 2. Asfalto envejecido según las condiciones inmediatamente posteriores al mezclado y colocación. 3. Envejecimiento a largo plazo.
La clasificación no aplica para asfaltos modificados.	Los ensayos y especificaciones incluyen tanto asfaltos sin modificar como asfaltos modificados.

La nomenclatura por desempeño está compuesta por dos números: el primero es el promedio, durante siete días, de las máximas temperaturas que alcanzará el pavimento (en grados celsius); y el segundo es la temperatura mínima que alcanzará el pavimento (en grados celsius). Por ejemplo, un PG 58-22 será usado en un lugar en el cual el máximo promedio de temperatura del asfalto durante siete días es 58°C y la temperatura mínima del asfalto será -22°C. Es importante notar que las temperaturas son del pavimento, no del aire.

Como regla general, asfaltos en los que existe una diferencia de 90°C o más entre el promedio máximo de los siete días y la temperatura mínima requieren el uso de aditivos.

## **IV. PLANTAS ASFÁLTICAS DE MEZCLA EN CALIENTE**

### **A. Mezcla asfáltica en caliente**

El término "mezcla asfáltica en caliente" se utiliza de forma genérica para incluir muchos tipos diferentes de mezclas de agregado y cemento asfáltico que se producen a una temperatura elevada en una planta asfáltica. Comúnmente, las mezclas asfálticas en caliente se dividen en tres grandes grupos: de textura densa, de textura abierta y de textura semi-densa.

Las mezclas asfálticas están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua éste. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan.

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, parqueos, entre otros. Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos gruesos y finos, un 5% de polvo mineral (filler, que depende de la práctica de cada país) y otro 5% (según el diseño específico) de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y los finos son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

### **B. Evolución de los diseños de mezcla asfáltica en caliente**

- The Hubbard-Field (1920's). Este método de diseño de mezclas asfálticas, fue uno de los primeros en evaluar contenidos de vacíos en la mezcla y en los agregados. Usaba una estabilidad como prueba para medir la deformación. Funcionó adecuadamente para evaluar mezclas con agregado pequeño o granulometrías finas, pero no también para mezclas con granulometrías que contenían agregados grandes. (Padilla, 2004)
- Método Marshall (1930's). Este método fue desarrollado durante la Segunda Guerra Mundial y después fue adaptado para su uso en carreteras. Utiliza una

estabilidad y porcentaje de vacíos como pruebas fundamentales. Exceptuando cambios en las especificaciones, el método no ha sufrido modificación desde los años 40's, y es el único utilizado en Guatemala actualmente.

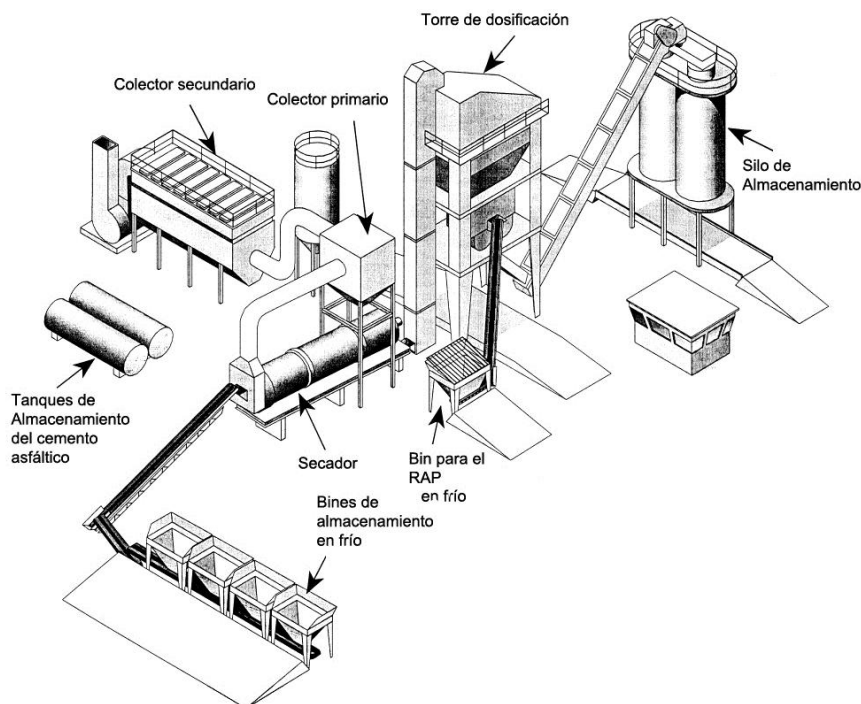
- Método Hveem (1930's). Este método de diseño fue desarrollado casi en el mismo tiempo que el método Marshall. Evalúa una estabilidad pseudotriaxial. (Padilla, 2004)
- Método de la Western Association of State Highway on Transportation Officials. WASHTO (1984). Este método de diseño de mezclas recomendó cambios en los requerimientos del material y especificaciones de diseño de mezclas para mejorar la resistencia al paso de vehículos. Es el primer esfuerzo concreto de mejora del método Marshall. (Padilla, 2004)
- Método de Asphalt Aggregate Mixture Analysis System. AAMAS (1987). La necesidad de cambios en el diseño de mezclas fue reconocida, tardaron 2 años para desarrollar un nuevo proyecto para el diseño de mezclas, que incluía un nuevo método de compactación en laboratorio y la evaluación de las propiedades volumétricas, desarrollo de pruebas para identificar las deformaciones permanentes, grietas de fatiga y resistencia a las grietas a baja temperatura. (Padilla, 2004)
- Método *Superpave* (1993) El método AAMAS, sirvió como punto de inicio del método *Superpave*, que contiene un nuevo diseño volumétrico completo de mezcla, con funcionamiento basado en predicción a través de modelos y métodos de ensayo en laboratorio, grietas por fatiga y grietas por baja temperatura. Los modelos de predicción de funcionamiento fueron completados satisfactoriamente hasta el año 2000. El diseño volumétrico de mezclas en el *Superpave* es actualmente implementado en varios estados de Estados Unidos, debido a que ha sido reconocida una conexión entre las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica caliente y su correcto funcionamiento. Tiene su resultado, ahora la aceptación en el control de calidad ha sido cambiado a propiedades volumétricas. El *Superpave* promete un funcionamiento basado en métodos o ensayos de laboratorio que pueden ser usados para identificar la resistencia a las deformaciones plásticas de los pavimentos. (Padilla, 2004)

## C. Tipos de plantas asfálticas de mezcla en caliente

El propósito de una planta de mezcla asfáltica en caliente es mezclar agregado y cemento asfáltico a una elevada temperatura para producir una mezcla asfáltica homogénea y de calidad para pavimentos. El agregado utilizado es una combinación de agregado triturado grueso y fino, con o sin relleno mineral. El material ligante utilizado comúnmente es el cemento asfáltico pero puede ser una emulsión asfáltica o uno de los muchos materiales modificados. Varios aditivos, incluidos materiales líquidos y sólidos, pueden ser incorporados a la mezcla. De hecho, con la introducción del *Superpave*, el uso de aditivos cada vez se hace más común.

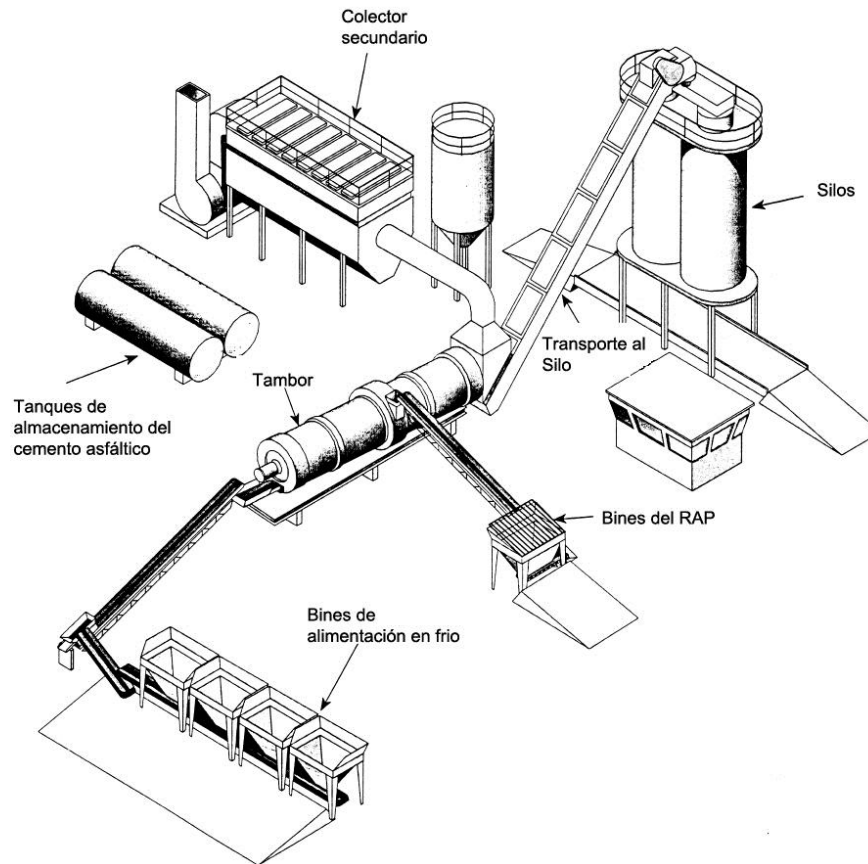
Existen dos tipos principales de plantas asfálticas según su producción: las plantas de batchadas o dosificadoras y las plantas continuas de tambor o continuas (divididas a su vez, en plantas de flujo paralelo y plantas de contraflujo). Ambos tipos buscan un mismo propósito, y la mezcla asfáltica producida debería ser similar sin importar su forma de producirse. Sin embargo, ambos tipos difieren en la forma en que mezclan los componentes de la mezcla. Los siguientes capítulos describen el funcionamiento de estos dos tipos de plantas.

Ilustración 1. Esquema general de una planta de batchadas o dosificadora



US Army Corps of Engineers, *et al.*

Ilustración 2. Esquema general de una planta continua de tambor.

US Army Corps of Engineers, *et al.*

## V. MANEJO Y ALMACENAMIENTO DEL AGREGADO

### A. Depósitos del agregado

El control de calidad de una planta asfáltica comienza con el depósito del agregado que está por ser procesado a través de la planta e incorporado a la mezcla. El agregado debe almacenarse en una superficie inclinada, limpia y estable con los distintos tamaños de agregados almacenados en depósitos separados. Se debe tener mucho cuidado tanto en el acomodo en los depósitos como en la extracción del agregado para minimizar la segregación del agregado en cada depósito (la segregación es la separación del agregado en zonas con granulometría inadecuada). Si la segregación llegara a ocurrir, se debe incluir un proceso de mezcla del agregado segregado antes de que sea depositado en los contenedores (tolvas) de alimentación en frío. Esta operación de mezcla es difícil de hacer por lo que es preferible tener cuidado con esta operación para evitar agravar el problema de segregación.

**1. Construcción de los depósitos.** El agregado debe ser almacenado en una superficie limpia, seca y estable y no se debe permitir su contaminación con materiales externos tales como polvo, lodo o grasa. El polvo en el área del depósito debe controlarse para que cubra la superficie del agregado y por lo tanto no altere la granulometría del material en cada depósito. Los depósitos se deben construir para permitir un drenaje libre y, de este modo asegurar que el contenido de humedad del agregado se mantenga tan bajo como sea posible.

Para reducir la cantidad de humedad que se acumula en el agregado, especialmente la que proviene de la lluvia, comúnmente resulta rentable construir techos en los depósitos de agregado.

Si solo se dispone de un depósito techado debe utilizarse para almacenar los finos, si se dispone de un segundo depósito techado se debe colocar sobre el RAP (pavimento asfáltico reciclado, por sus siglas en inglés: *Reclaimed Asphalt Pavement*, que no es más que el material resultado del perfilado o fresado de la capa de rodadura asfáltica existente). Si existen más techos disponibles se pueden colocar sobre los distintos tamaños del agregado grueso.

Ilustración 3. Depósito techado de agregado en planta de Asfalgua, S.A.



Los distintos tamaños de agregado deben mantenerse separados (por barreras físicas, si es necesario) todo el tiempo. Las tolvas de alimentación en frío están calibrados para proveer una cantidad específica de un cierto tamaño de partículas de cada tolva. Si los distintos tamaños se mezclan durante su almacenamiento, la mezcla producida no tendrá la granulometría deseada.

La segregación es un problema serio con los depósitos de agregado. La prevención de la segregación comienza desde la construcción de los depósitos. Si es posible, los depósitos deben construirse en capas horizontales o levemente inclinadas. Si se utilizan camiones para depositar el agregado nuevo en la planta, cada camión debe depositar su carga en un solo montículo. Los camiones y demás equipo de transporte deben mantenerse alejados de los depósitos para evitar romper las partículas, formar finos y contaminar el agregado.

**2. Retiro del agregado del depósito.** Una apropiada operación del cargador frontal utilizado para cargar los camiones de volteo o las tolvas de alimentación

en frío, ayuda a reducir los problemas de segregación y granulometría del agregado. La parte externa de los montículos de agregado por lo general es más gruesa que el interior debido a que las partículas más grandes tienden a rodar hacia los lados del montículo. El operador del cargador frontal debe remover el agregado en una dirección perpendicular al flujo de agregado cuando se deposita en el montículo y debe extraer material desde todos los sentidos del depósito. Esta práctica reducirá los cambios en la granulometría del agregado y la variación en el contenido de humedad de la mezcla producida por la planta.

## **B. Sistemas de alimentación en frío para agregado nuevo.**

Comúnmente, los sistemas de alimentación en frío de las plantas de tambor y las plantas de bachadas son similares. El sistema consiste en tolvas de alimentación en frío, bandas transportadoras de alimentación, una banda transportadora que junta los distintos agregados y una banda de carga. En muchas plantas de tambor y en algunas plantas de bachadas, un tamiz de preclasificación se incluye en el sistema en algún punto. Si se utiliza RAP, se requiere también una o varias tolvas de alimentación en frío, una banda transportadora, un tamiz y una banda de carga para el material adicional que se utilizará en la mezcla. En Guatemala, existe sólo un equipo de éstos, y para beneplácito de la ingeniería, ya se produce mezcla asfáltica con incorporación de RAP.

**1. Tolvas de alimentación en frío y bandas de alimentación.** El flujo de agregado a través de una planta comienza en las tolvas de alimentación en frío. La planta está equipada con múltiples tolvas para manejar los distintos tamaños de agregado nuevos utilizados en la mezcla. La mayoría de tolvas de alimentación en frío son rectangulares, con lados inclinados y tienen una abertura rectangular o trapezoidal en la parte de abajo. Se debe utilizar un método de división entre cada tolva, para evitar el flujo de material entre las tolvas. Esto es un requisito para todas las plantas asfálticas, pero se debe poner especial cuidado en las plantas continuas debido a que la granulometría solo se determina una vez y el material transportado por las bandas proveniente de cada tolva es el mismo que compondrá la mezcla, sin pasar por un segundo proceso de clasificación granulométrica.

Cada banda de alimentación en frío está equipada con una compuerta para controlar el tamaño de la abertura por la cual pasa el agregado y con una banda

transportadora (banda de alimentación) que lleva el agregado hacia otra banda a una tasa controlada. En algunas plantas, la velocidad de la banda de alimentación no puede variarse por lo que la cantidad de agregado se determina por el tamaño de la abertura de la compuerta de la tolva.

Ilustración 4. Carga de los tolvas de alimentación en frío.



Ilustración 5. Tolvas de alimentación en frío.



La mayoría de tolvas de alimentación en frío están equipadas con bandas de alimentación de velocidad variable debajo de cada tolva. La abertura de la compuerta y la velocidad de la banda se determinan para cada tolva con el fin de entregar la cantidad de material correspondiente a la proporción requerida de ese agregado requerido en la mezcla. Si se requiere un ligero cambio en la proporción de cierto agregado, la velocidad de cada banda puede ser aumentada o disminuida para acomodarse a ese cambio. Teóricamente es posible extraer el agregado de las tolvas utilizando el rango de velocidades de la banda de alimentación, sin embargo se recomienda utilizarla solo entre el 20% y el 80% de su máxima velocidad e idealmente que funcione al 50%. Esto permite al operador de la planta reducir o aumentar la velocidad de cada banda según requiera la granulometría de la mezcla.

Ilustración 6. Banda de alimentación y compuerta de la tolva.



**2. Banda colectora.** El agregado de cada una de las bandas de alimentación se deposita en la banda colectora, la cual está localizada debajo las bandas de alimentación individuales. La velocidad de esta banda es constante, para cada calibración. La cantidad de agregado depositada en esta banda es función de la abertura de la compuerta de cada tolva y de la velocidad de las cintas de alimentación.

Para que el material se acumule y se adhiera a la banda (en especial cuando las partículas están húmedas), el agregado grueso se deposita primero y luego se deposita la arena sobre éste.

**3. Tamiz de control.** En las plantas de tambor es una buena práctica colocar un tamiz de seguridad en el sistema de alimentación en frío para evitar que ciertas partículas de tamaño muy grande ingresen en la mezcla. En algunos casos se suele colocar un tamiz en la parte superior de las tolvas de alimentación en frío, sin embargo este tamiz posee aberturas muy grandes debido a que si se utilizan aberturas más pequeñas no se consigue alcanzar una producción muy fluida.

Ilustración 7. Tamiz de control.



El tamiz de seguridad se utiliza para remover elementos muy grandes tales como raíces de árboles, materia vegetal y agregado excesivamente grande. El tamiz de seguridad se coloca comúnmente en algún lugar entre el final de la banda colectora y el ingreso al tambor. En las plantas de bachadas, los tamices propios de la planta se encargan de desechar la materia de gran tamaño.

**4. Banda de carga.** En las plantas de bachadas, el agregado grueso y el agregado fino se descargan de la banda colectora hacia la banda de carga para que sean transportados al secador. La banda de carga es una banda sencilla que funciona a velocidad constante pero que transporta una cantidad variable de agregado, dependiendo del volumen depositado de las tolvas de alimentación en frío. La banda debe estar equipada con un dispositivo en la parte inferior que la limpie a medida que camina.

En una planta de tambor de flujo paralelo la banda de carga deposita el agregado en un colector ubicado del lado del quemador. En una planta de tambor de contraflujo la banda de carga deposita el agregado en un colector ubicado en la parte opuesta al quemador. En ambas plantas, la banda de carga es uno de los dispositivos clave para la producción y monitoreo de la mezcla asfáltica debido a que tiene la función de definir el flujo de agregado en términos del peso y de la velocidad de la banda.

Ilustración 8. Banda de carga y báscula de puente. Planta de Padegua S.A.



La báscula está ubicada cerca del centro de la banda de carga. A medida que el material pasa a través de la báscula, el peso del material se graba en el sistema de control computacional. El peso instantáneo por sí solo es un dato sin significado pero al relacionarlos con la velocidad de la banda se puede determinar el flujo instantáneo y por lo tanto se puede determinar el flujo total en un período de tiempo. Además, para obtener el verdadero valor de la cantidad de agregado que ingresa al tambor se debe monitorear el contenido de humedad del agregado como mínimo dos veces al día, o más si algún evento podría hacer variar la humedad del agregado.

## VI. SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE CEMENTO ASFÁLTICO

El sistema de abastecimiento de cemento asfáltico consiste de dos grandes componentes. El primero consiste en uno o más tanques usados para almacenar el cemento asfáltico hasta que sea requerido por la planta asfáltica de mezclado en caliente. El segundo componente es una bomba y un sistema de medición utilizado para extraer el cemento asfáltico de los tanques de almacenamiento en proporción a las cantidades de agregado que son utilizadas por la planta de bachadas o de tambor.

### A. Tanques de almacenamiento

Todos los tanques de almacenamiento deben calentarse para mantener la temperatura correcta del cemento asfáltico y, de esta manera, se logra que su viscosidad sea suficientemente baja como para ser bombeada y mezclada con el agregado caliente y seco. La mayoría de los tanques para cementos asfálticos son calentados por sistemas de aceite caliente y están equipados con un pequeño calentador que permite alcanzar y mantener la temperatura del cemento asfáltico.

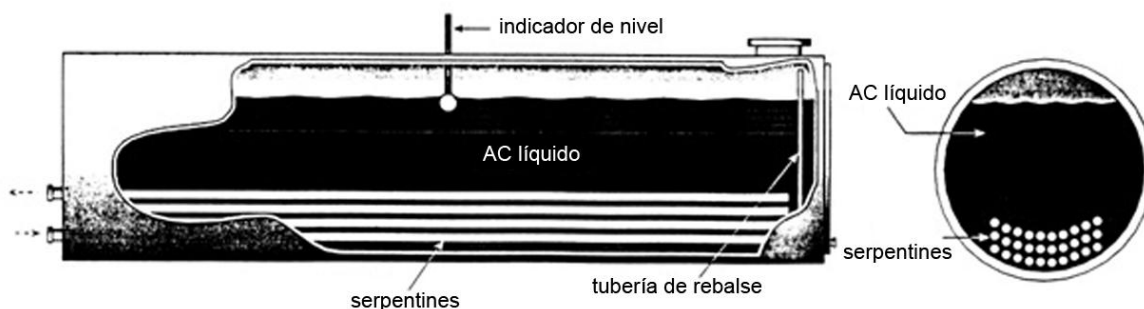
Ilustración 9. Tanque de almacenamiento de cemento asfáltico.  
Planta de Padegua, S.A.



El aceite caliente se circula a través de una serie de tubos en espiral dentro del tanque de almacenamiento y el calor se transfiere del aceite, a través de los tubos, al

cemento asfáltico. Este proceso de transferencia de calor reduce la viscosidad del asfalto causando que fluya hacia arriba provocando que el asfalto mas viscoso que se encontraba originalmente en la parte superior fluya hacia abajo, siendo calentado por el sistema de aceite caliente provocando un flujo circular que garantiza que todo el cemento asfáltico dentro del tanque permanezca con la temperatura adecuada. Regularmente esta temperatura se encuentra entre los 150°C y los 180°C, dependiendo del grado y tipo de cemento asfalto usado.

Ilustración 10. Interior del tanque de almacenamiento de cemento asfáltico.



US Army Corps of Engineers, *et al.*

Otra práctica común es utilizar calentadores eléctricos, los cuales se introducen en los tanques y pueden ser removidos para su mantenimiento.

Un procedimiento poco común consiste en calentar los tanques mediante fuego directo. En este sistema el asfalto es calentado mediante el intercambio de calor directo con la fuente de combustión a través de una serie de tubos calientes. Es necesario tomar especial precaución con este tipo de sistemas para prevenir sobrecalentamiento del cemento asfáltico que se encuentra inmediatamente adyacente a los tubos calientes.

Todos los tanques de almacenamiento deben calentarse y estar completamente aislados térmicamente. Toda la tubería para transportar el asfalto y el aceite también debe ser aislada térmicamente para evitar la pérdida de calor. Tanto la tubería de entrada del cemento asfáltico proveniente del camión que la transporta como la tubería de salida del cemento asfáltico hacia la planta de mezclado en caliente deben estar ubicadas cerca de la parte baja del tanque de almacenamiento. La tubería de retorno de la bomba debe estar ubicada de manera que el cemento asfáltico regrese al tanque en

un nivel bajo la superficie del asfalto líquido contenido en el tanque de manera que nunca haga contacto con el aire durante su reingreso al tanque. Esto reduce la oxidación del asfalto durante el proceso de circulación.

Todos los tanques de almacenamiento de cemento asfáltico contienen un material de desperdicio en la parte baja del tanque. Este material se localiza abajo de los tubos calientes y usualmente no circula eficientemente. El volumen de este material de desperdicio depende del tipo y del estilo del tanque de almacenamiento, en la localización de los tubos calientes y el tiempo transcurrido desde la última limpieza. Se debe considerar que siempre permanece cierta cantidad de asfalto en el tanque incluso un después de su limpieza por lo que la introducción de un nuevo tipo de asfalto puede causar alteraciones del asfalto al punto en que ya no cumple con las especificaciones.

La capacidad de un tanque de almacenamiento es función de su diámetro y longitud. La cantidad de material en el tanque puede ser determinada usando una varilla de medición. Esta varilla mide la distancia de la parte superior del tanque al nivel del cemento asfáltico en el tanque. Esta distancia se relaciona con tablas de calibración del fabricante del tanque.

Cuando el cemento asfáltico se deposita en los tanques de almacenamiento por medio de un vehículo de transporte, es importante asegurar que el tanque está completamente limpio o que contiene el mismo tipo de cemento asfáltico. Si está vacío en el momento de depositar el nuevo material, el tanque deberá ser revisado para garantizar que no existen residuos de agua acumulados en la parte de abajo del tanque.

La mayoría de los tanques son horizontales, sin embargo se ha incrementado el uso de tanques verticales. Éstos minimizan la separación de los aditivos en el cemento asfáltico y ocupan menos espacio en planta.

## **B. Bomba y sistemas de medición**

**1. Plantas de bachadas.** Existen dos métodos para transportar el cemento asfáltico del tanque de almacenamiento a la báscula que se encuentra antes de la mezcladora en las plantas de bachadas. El tipo de sistema utilizado depende de la ubicación de la tubería de retorno.

En el primer método, el de la línea simple, dos tuberías conectan el tanque de almacenamiento con la bomba pero sólo una tubería conecta la bomba con la báscula. La bomba es una unidad de velocidad y volumen constante que funciona continuamente. El cemento asfáltico fluye constantemente del tanque de almacenamiento, a través de la bomba y de regreso al tanque de almacenamiento. Cuando el cemento asfáltico es requerido por la planta, se abre una válvula en la parte superior de la báscula y el material se descarga sobre ella. Cuando la cantidad adecuada de cemento asfáltico se deposita en la báscula (determinada por peso, no por volumen) la válvula se cierra y el cemento asfáltico que pasa por la bomba es recirculado de regreso al tanque de almacenamiento.

El segundo método es el de la línea doble. En él, se usa una tubería para depositar el cemento asfáltico en la báscula y se utiliza otra tubería para retornar el exceso de cemento asfáltico al tanque de almacenamiento.

Debido a que las plantas de bachadas miden la cantidad de asfalto por peso, no es necesario hacer correcciones por temperatura.

## **2. Plantas de tambor.**

**a, Transporte de cemento asfáltico.** La mayoría de las plantas asfálticas de tambor utilizan alguno de los siguientes tres sistemas para extraer el cemento asfáltico del tanque de almacenamiento, medirlo, y bombearlo a la planta:

- Bomba de volumen variable con un motor de velocidad constante.
- Bomba de volumen constante con un motor de velocidad variable.
- Bomba de volumen constante con un motor de velocidad constante y una válvula de medición.

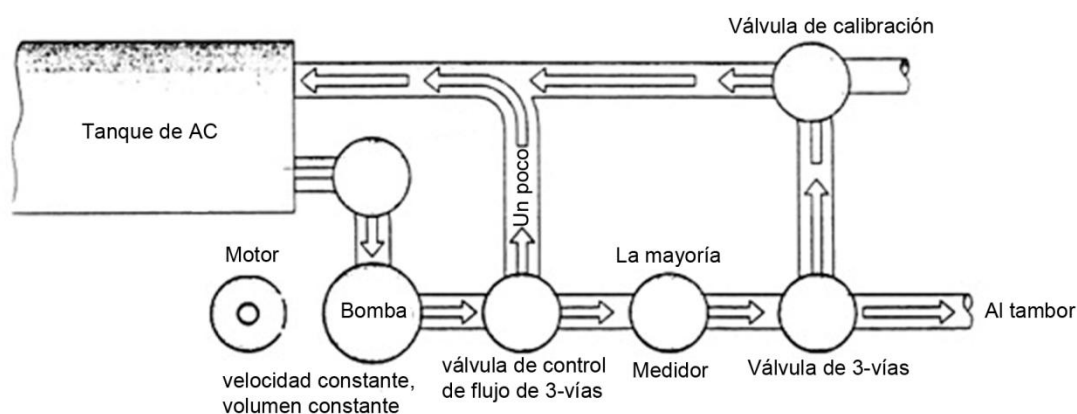
Con un sistema que emplee una bomba de volumen variable con un motor de velocidad constante, la cantidad de cemento asfáltico extraído del tanque de almacenamiento se controla cambiando el volumen de asfalto que se bombea. El volumen requerido por la bomba se determina usando la computadora de la planta en proporción a la cantidad de agregado utilizada en la mezcla. Cuando la planta no utiliza

el cemento asfáltico, el material pasa continuamente a través de la bomba y a través de una válvula que circula el cemento asfáltico de regreso al tanque de almacenamiento en lugar de transportarlo a la planta.

Un segundo sistema incorpora una bomba de desplazamiento fijo (volumen constante) con un motor de velocidad variable. La cantidad de cemento asfáltico que se transporta a la planta se varía cambiando la velocidad del motor. Esta cantidad depende también de la cantidad de agregado utilizado en la mezcla.

El tercer sistema consiste en una bomba de volumen constante con un motor de velocidad constante. En este sistema, el mismo volumen de cemento asfáltico se extrae del tanque de almacenamiento en todo momento. Una válvula de proporcionamiento se coloca en la tubería entre la bomba y el sistema de medición de cemento asfáltico. La válvula determina el volumen del material que pasa por el sistema de medición. La válvula de proporcionamiento envía una cantidad de cemento asfáltico hacia el sistema de medición y el resto de regreso al tanque de almacenamiento.

Ilustración 11. Sistema transporte de cemento asfáltico de velocidad constante y volumen constante.



**b. Compensación por temperatura.** La mayoría de los sistemas de medición de cemento asfáltico miden el flujo de asfalto por volumen y convierten este volumen a peso utilizando la gravedad específica y la temperatura del asfalto. El

cemento asfáltico se dilata cuando se calienta, por ejemplo una cantidad de cemento asfáltico a 180°C tendrá más volumen que esa misma cantidad a 150°C y este volumen será mayor que el que tendrá a 15°C, la cual es la temperatura estándar para determinar el volumen del cemento asfáltico utilizando las tablas de conversión basadas en la gravedad específica del asfalto. Si se conoce la gravedad específica y la temperatura del cemento asfáltico, el volumen medido a una temperatura determinada puede ser convertido al volumen estándar a 15°C usando el procedimiento dado en la especificación D4311 de ASTM.

Otro tipo de sistema de medición del cemento asfáltico llamado "medidor de flujo másico", mide el flujo de cemento asfáltico por peso y por lo tanto no requiere correcciones por temperatura.

### **C. Calibración**

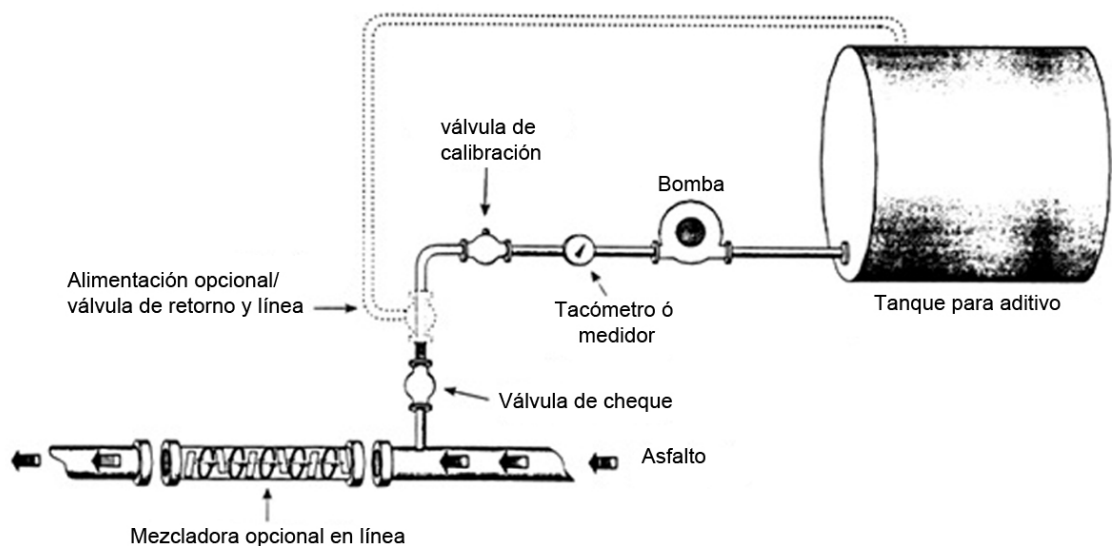
La bomba y el sistema de medición en una planta de bachadas y de tambor deben ser calibrados para asegurar que la cantidad adecuada de cemento asfáltico está siendo depositada en la mezcla. Para una planta de bachadas, la cantidad de cemento asfáltico requerida se determina por peso y el cemento asfáltico se deposita en una báscula. Para una planta de tambor, la cantidad de cemento asfáltico se determina por volumen mientras es bombeada a través de un sistema de medición al interior del tambor.

Para un tambor mezclador, la cantidad de cemento asfáltico se calibra bombeando el material hacia un contenedor vacío cuya tara es conocida. Comúnmente un camión distribuidor de asfalto es utilizado con este propósito. Se determina el peso real del material depositado en el contenedor y se compara con el calculado con el sistema de medición (determinado a partir de la gravedad específica y el volumen indicado por el sistema). Si el sistema se encuentra bien calibrado ambos valores se deben encontrar entre los límites de tolerancia del sistema de abastecimiento de cemento asfáltico (regularmente  $\pm 1\%$ ).

## D. Adición de aditivos contra el desvestimiento

Comúnmente se añaden aditivos líquidos contra el desvestimiento al cemento asfáltico para mejorar la adhesión del material ligante con la superficie del agregado e incrementar la resistencia a los daños ocasionados por la humedad. El aditivo puede ser mezclado con el cemento asfáltico en distintos puntos. Puede ser mezclado en la tubería cuando el material se bombea del tanque de transporte al tanque de almacenamiento. También puede ser añadido al cemento asfáltico en el tanque de almacenamiento haciendo circular ambos materiales dentro del tanque antes de que el cemento tratado se transporte al tambor mezclador. Sin embargo, el método más común es añadir el aditivo al cemento asfáltico utilizando una tubería de mezclado en el tramo en que el material ligante se bombea del tanque de almacenamiento al tambor mezclador.

Ilustración 12. Sistema de adición de aditivos.



US Army Corps of Engineers, *et al.*

## VII. PLANTAS DE BACHADAS

### A. Manejo del agregado

**1. Almacenamiento del agregado.** Las técnicas de almacenamiento utilizadas para almacenar los agregados en una planta de bachadas no son distintas a las utilizadas en las plantas de tambor. Las prácticas adecuadas de almacenamiento de agregados son tan importantes para una planta de bachadas, como para una de tambor. Se debe tener cuidado especial en mantener separados los distintos tamaños de agregados para evitar la segregación en el sitio de almacenamiento.

Algunas veces se asume que las zarandas en la torre de la planta de bachadas solucionan cualquier problema en la variación de la clasificación del agregado nuevo. Sin embargo, si la proporción adecuada de cada tamaño de agregado nuevo no es depositada en las tolvas de alimentación, la cantidad de agregado en las tolvas calientes quedará desproporcionada. Como resultado de la falta de separación de los agregados en el sitio de almacenamiento o debido a la segregación, es posible que una o más de las tolvas calientes se queden sin material, o que tengan un exceso de éste.

**2. Sistema de alimentación en frío para agregado nuevo.** Algunas tolvas(o bines) de alimentación en frío de antiguas plantas de bachadas están equipados con una banda de alimentación de velocidad constante debajo de cada tolva. La cantidad de agregado que sale de cada tolva es controlada por el tamaño de la abertura de la compuerta correspondiente a cada tolva. Sin embargo, la mayoría de las plantas poseen tolvas de alimentación en frío equipadas con una banda de alimentación de velocidad variable debajo de cada tolva. La cantidad de agregado que sale por cada tolva es controlada tanto por la abertura de la compuerta de cada tolva como por la velocidad de la banda de alimentación. El agregado se descarga de la banda de alimentación de cada uno de las tolvas a una banda colectora, la cual transporta el material hasta un tamiz. Luego de que el agregado pasa este tamiz, se deposita en la banda cargadora para ser depositado en el secador. Si no se incluye el tamiz (lo cual es una práctica común), el agregado se transfiere directamente de la banda colectora a la banda de carga.

**3. Sistema de alimentación en frío para RAP.** El RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) o material asfáltico recuperado, se mantiene usualmente en una tolva de alimentación en frío distinta y separada del resto de tolvas. Ésta puede estar equipada con una banda de alimentación de velocidad variable o de velocidad constante. De esta banda se transfiere a la banda colectora que deposita el RAP en un tamiz. Luego de pasar el tamiz el material se deposita en la banda de carga para ser transportado a la planta.

El RAP no puede ser calentado en el secador porque generaría emisiones visibles de hidrocarburos (humo azul) al ser expuesta a los gases de la combustión a alta temperatura del quemador. Por esta razón la alimentación del RAP debe estar separada de la alimentación del agregado nuevo. El RAP puede entrar a la planta en tres distintos puntos: en la parte de abajo del elevador en caliente, en una de las tolvas calientes al final de la torre o en la tolva de pesado, el cual es el lugar más común para la mayoría de las plantas de bachadas.

En Guatemala, recién se está iniciando la utilización de RAP, pero en plantas de tambor.

## **B. Sistema de abastecimiento de cemento asfáltico.**

**1. Tanques de almacenamiento.** El tanque de almacenamiento utilizado para el cemento asfáltico en las operaciones de una planta de bachadas es el mismo que el utilizado para las plantas de tambor. El material es generalmente almacenado a temperaturas entre 149°C y 177°C (300°F y 350°F), dependiendo de la clasificación o la viscosidad (o ambos) del cemento asfáltico. El material cementante debe ser suficientemente fluido para mezclarse apropiadamente con el agregado en el mezclador.

**2. Sistema de bombeo.** El contenido de asfalto en la mezcla se determina por peso, no por volumen (a excepción de algunas antiguas plantas de bachadas). Por esta razón no hay ningún sistema de medición para proporcionar la cantidad de cemento asfáltico requerido en la mezcla. La bomba, que funciona continuamente, extrae el asfalto del tanque de almacenamiento y lo deposita en la báscula o bien, lo devuelve al tanque, dependiendo del estado de la válvula de control en la báscula.

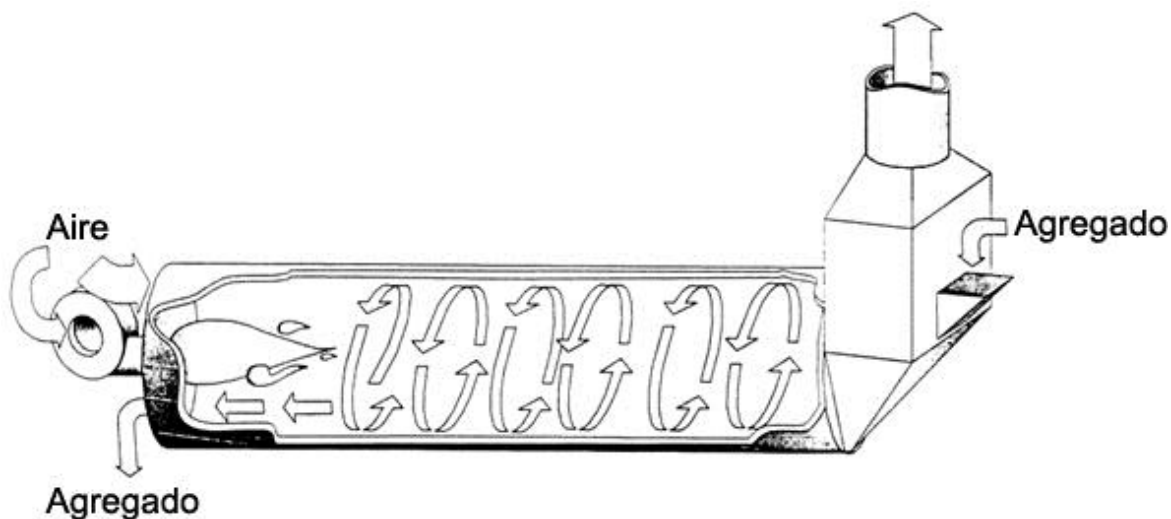
Cuando la válvula está abierta a la báscula, el cemento asfáltico es bombeado a la báscula hasta que se alcanza el peso correcto. En este punto, la válvula se cierra y el cemento asfáltico se devuelve al tanque de almacenamiento.

**3. Adición de aditivos contra el desvestimiento.** En las plantas de bachadas, los aditivos líquidos contra el desvestimiento se añaden al cemento asfáltico de manera similar que en las plantas de tambor. El aditivo puede ser mezclado con el cemento asfáltico mientras éste es bombeado del camión transportador o mientras es bombeado del tanque de almacenamiento a la báscula. Alternativamente, puede ser mezclado con el cemento asfáltico en el tanque de almacenamiento haciendo circular los dos materiales por un período de tiempo antes de que el material tratado sea bombeado hacia la báscula

### C. Calentado y secado del agregado

El secador en una planta de bachadas convencional opera bajo un principio de contraflujo. Su funcionamiento es similar al de las plantas de tambor de contraflujo. El agregado es cargado al secador en la parte de arriba del tambor y fluye a través de él por acción de la gravedad y unas paletas giratorias. El quemador se ubica en la parte inferior o de descarga del secador. Los gases de la combustión se mueven hacia la parte más alta del secador, en contra de la dirección del flujo del agregado.

Ilustración 13. Funcionamiento del tambor secador.

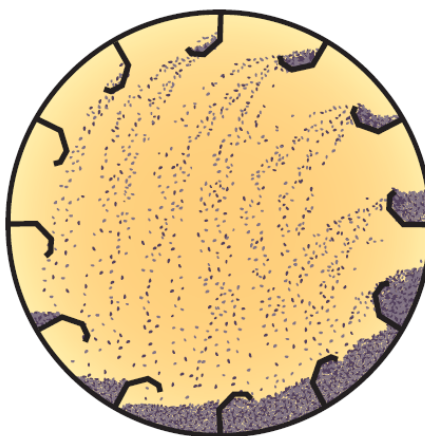


US Army Corps of Engineers, *et al.*

El secador es un tambor giratorio que mide entre 1.5m y 3.0m (5' a 10') de diámetro y entre 6m y 12m (20' a 40') de longitud. Esta longitud normalmente es proporcional al diámetro en una relación de 4:1. La función del secador es remover la humedad del agregado y calentar el material hasta la temperatura deseada de descarga, que generalmente se encuentra entre 138°C y 163°C (290°F y 325°F). El contenido de humedad del agregado al salir del secador debe ser inferior al 0.5% e idealmente inferior a 0.2%.

El agregado se vierte en el secador por medio de la banda de carga, a través de un colector en la parte alta del secador u, ocasionalmente, por medio de una banda transportadora que lanza el material a velocidad en la parte baja del secador. Dentro del secador se encuentran unas paletas cuya función es levantar y dejar caer el material creando una cortina a lo largo de la sección del secador. A medida que el agregado fluye hacia abajo en el secador, es calentado por los gases de la combustión reduciendo su contenido de humedad. La llama del quemador, cuya forma es generalmente más larga y delgada que la llama producida por el quemador de las plantas de tambor de flujo paralelo, se extiende en el secador para penetrar la cortina de agregado. El agregado es calentado y secado por los gases de la combustión del quemador por medio de conducción, convección y radiación. Debido a la gran eficiencia del sistema de contraflujo, el secador de una planta de bachadas comúnmente utiliza menos combustible para calentar y secar una cantidad de agregado que una planta de tambor de flujo paralelo.

Ilustración 14. Sección interna del secador.



Astec, Inc.

El tiempo que el agregado pasa por el secador es función de la longitud del tambor, el diseño y número de paletas, la velocidad de rotación y la pendiente del secador (comúnmente de 2.5° a 6°, o de 26 a 63 mm/m). Si el contenido de humedad del agregado es mayor al 0.5% al momento de salir del secador, la densidad de la cortina de agregado debe incrementarse. Generalmente esto se logra reduciendo la pendiente del tambor o cambiando el número o tipo de paletas utilizadas en el secador. Ambas soluciones incrementan el tiempo que el agregado pasa dentro del secador pero también pueden ser operaciones difíciles y costosas. No se acostumbra en el país.

Debido a que típicamente el agregado constituye entre el 92% y el 96% del peso de la mezcla asfáltica, es su temperatura la que rige la temperatura de la mezcla producida en el mezclador. El calentamiento excesivo del agregado puede causar el endurecimiento del cemento asfáltico en el proceso de mezclado. Si se va a producir una mezcla reciclada, sin embargo, el agregado nuevo debe ser sobrecalentado en el secador para lograr alcanzar el intercambio de calor necesario en el mezclador. En este caso, la temperatura requerida del agregado nuevo depende de la cantidad de RAP y su contenido de humedad.

## **D. Tamizado y almacenamiento del agregado caliente**

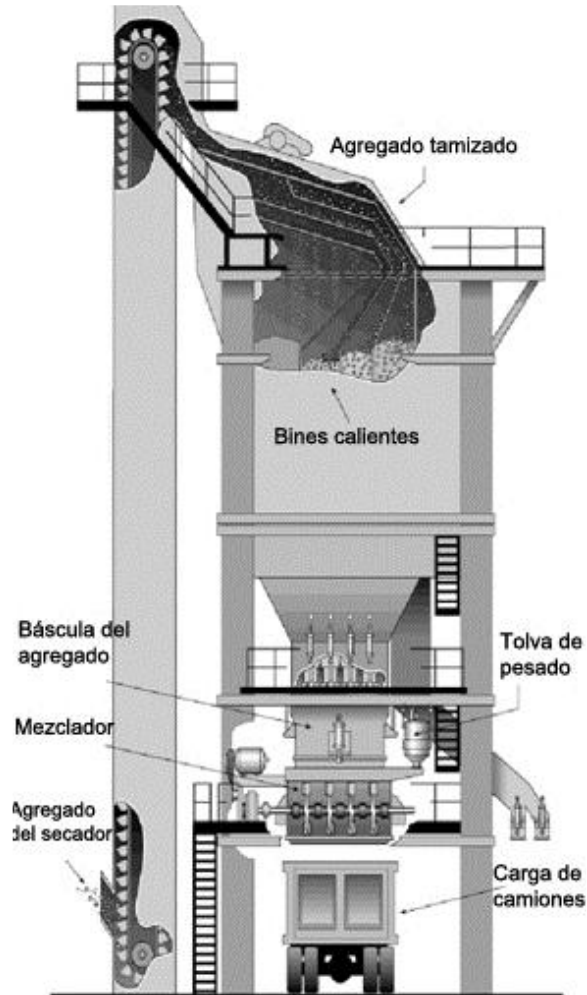
### **1. Elevador en caliente.**

**a. Agregado nuevo.** El agregado caliente y seco es descargado del secador a través de un colector hacia la parte baja del elevador. El material caliente es transportado hacia arriba por los recipientes del elevador, que están en continuo movimiento, hasta la parte alta de la torre de la planta de batchadas. Posteriormente, el elevador en caliente deposita el agregado en la cámara de tamizado.

**b. RAP.** Generalmente no es recomendable agregar el RAP a la planta en la parte baja del elevador en caliente, particularmente cuando la cantidad de RAP excede el 10% de la mezcla. El RAP debe ser depositado, si es posible, en el colector del agregado nuevo del secador para que esté sobre el agregado caliente y se dirija hacia el centro de los recipientes. Si esto no es viable, el material reciclado debe ser depositado en un colector separado ubicado arriba de la entrada para el agregado nuevo en la parte baja del elevador en caliente. El RAP debe ser colocado en los recipientes luego del agregado nuevo para prevenir que el material cubierto con asfalto

se quede pegado en los recipientes al ser calentado por contacto con el nuevo agregado sobrecalentado.

Ilustración 15. Torre de tamizado y mezcla de bachadas

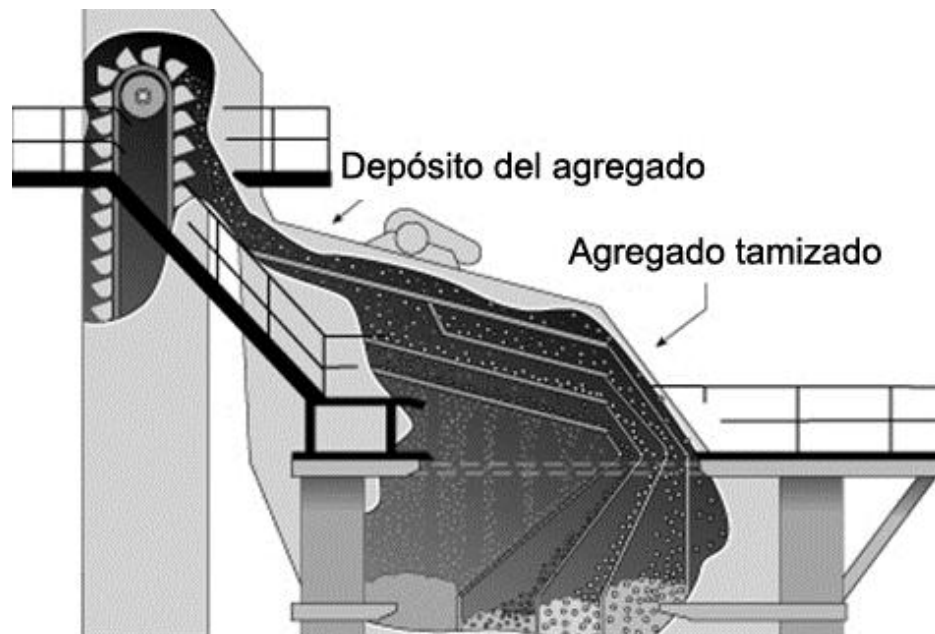


Existe un límite para la cantidad de RAP que puede ser depositada en la parte baja del elevador en caliente, y este límite está relacionado con el proceso de calentamiento mientras el material viaja hacia la parte alta de la torre. Dependiendo del porcentaje de RAP usado en la mezcla, el contenido de humedad del RAP y las condiciones ambientales, el material reciclado puede ser calentado mientras viaja en el elevador junto con el agregado nuevo al punto en el que puede quedarse pegado a los tamices en la parte alta de la torre en lugar de pasar a través de ellos. El resultado puede ser el bloqueo de los tamices y como consecuencia un cambio en la proporción del agregado nuevo en cada uno de las tolvas calientes debido a que el material que debería estar en

una tolva pasa sobre ésta y termina en otra tolva, de granulometría más grande. Si los tamices se bloquean demasiado se puede provocar el paro de la planta. Se recomienda que si más de un 10% de RAP será agregado a la mezcla y si éste será introducido a la planta en la parte baja del elevador en caliente, los tamices en la parte de arriba de la torre sean removidos.

**2. Cámara de tamizado.** El agregado se descarga del elevador en caliente a un conjunto de tamices vibratorios que son usados para separar el material de acuerdo a su tamaño. Comúnmente se utilizan cuatro capas de tamices. El tamiz de arriba se utiliza para remover el material muy grande del flujo de agregado y rechazarlo hacia un depósito de desecho. Los tres tamices restantes dividen el agregado en cuatro fracciones diferentes. La cantidad de material en cada fracción depende del tamaño y la forma de las aberturas en los tamices. Cada capa de tamices puede tener distintos tamaños de tamices con el fin de mejorar la eficiencia en el tamizado y proteger los tamices pequeños del agregado sobre dimensionado.

Ilustración 16. Vista interior de la cámara de tamizado.



Los tamices pueden tener aberturas cuadradas (las más comunes), rectangulares o ranuradas. Algunas cámaras de tamizado utilizan tamices de distintos tamaños en una misma capa. Por ejemplo, la capa superior puede emplear un tamiz con una abertura de

8mm para la mitad de la capa que se encuentra más cercana al elevador en caliente y un tamiz con una abertura de 32mm para la mitad de la capa sobre las tolvas calientes No. 3 y No. 4. Esta distribución mejora la eficiencia de la operación de tamizado.

No todo el material que debe estar en una tolva particular termina en dicha tolva. El término "*carryover*" se refiere al agregado relativamente pequeño que no pasa por los tamices de abertura grande y se deposita en tolvas destinadas a material más grande. Generalmente se encuentra menos del 10% de *carryover* en una tolva particular. Éste es causado por el flujo de agregado que se mueve a lo largo del tamiz en lugar de pasar a través de él. La cantidad de *carryover* aumenta a medida que los tamices se van tapando o saturando con el agregado y al aumentar la cantidad de agregado proveniente del elevador en caliente. El problema principal ocurre cuando la cantidad de *carryover* es variable en el tiempo, causando que la granulometría del agregado que se encuentra en cada tolva cambie. Esto se produce comúnmente por la variación continua de la tasa de sustento de agregado en las tolvas de alimentación en frío.

Por otro lado, si un tamiz se encuentra agrietado o roto, parte del agregado que debe ser depositado en una tolva pasará a través del tamiz para terminar en una tolva destinada a material más pequeño. Por esta razón, los tamices deben ser revisados periódicamente para asegurar que no existen agujeros ni se encuentran tapados o bloqueados con agregado. El análisis de la granulometría en las tolvas calientes ayuda a identificar la existencia de imperfecciones en los tamices.

En algunos lugares, las plantas de bachadas funcionan de manera rutinaria sin tamices, el conjunto de tamices se remueve o se utiliza un colector que permite el paso libre del agregado. Todo el agregado que es transportado hacia arriba por el elevador en caliente se deposita directamente en la tolva No. 1. Sin tamices, una planta de bachadas se opera de manera muy similar a una planta de tambor de contraflujo, y la granulometría final de la mezcla se determina por la consistencia de granulometría en las tolvas de alimentación en frío. Debido a que no se utilizan tamices para separar el material de acuerdo a su tamaño, la granulometría que se coloca en las tolvas de alimentación en frío se deposita directamente en la tolva caliente No. 1. Todo el agregado utilizado en la mezcla es vertido de esta única tolva en la báscula y luego en

el mezclador. Debido a la variabilidad en la granulometría de los agregados, esta práctica debe evitarse.

### **3. Tolvas calientes.**

**a. Agregado nuevo.** La capacidad total de las tolvas calientes es comúnmente proporcional al tamaño del mezclador. Sin embargo, la capacidad de cada una de las tolvas calientes no es la misma. La tolva No.1 (arena) tiene la mayor capacidad. Generalmente entre el 40% y el 50% en peso del agregado transportado por el elevador en caliente atraviesa los tamices y se deposita en esta tolva. La capacidad común (porcentaje de la capacidad total de la tolva caliente) de cada una de las tres tolvas restantes es entre 25% y 30% para la tolva No. 2, 15% a 20% para la tolva No.3 y 10% para la tolva No. 4.

Algún grado de segregación ocurre en cada una de las tolvas calientes, especialmente en la tolva No. 1 (arena). Esta segregación es causada porque el material más fino en una porción de material con un rango de tamaños, pasa de manera más directa que las partículas más grandes de ese mismo rango. Entonces, el agregado en el lado de la tolva caliente que está más cerca al elevador en caliente será, por lo general más fino en granulometría que el agregado en el lado opuesto de la misma tolva caliente.

Las divisiones entre las tolvas calientes deben ser revisadas con regularidad para asegurar que no exista ningún agujero y que no haya intercambio de material entre tolvas. Los ductos de sobreflujo en la parte de arriba de cada tolva deben estar siempre abiertos. Los finos algunas veces se acumulan en las esquinas de la tolva No. 1.

A pesar de que los tamices en las plantas de bachadas son usados para reclasificar el agregado que es depositado en las tolvas de alimentación en frío, la proporción del material en cada tolva de alimentación en frío debe ser la correcta o una de las tolvas calientes puede quedarse sin material o tener un exceso. Debido a que todo el agregado que se deposita en las tolvas de alimentación en frío son utilizados por la planta, es muy importante que el material colocado en estas tolvas tenga granulometría consistente. Los tamices no deberán ser utilizados para intentar corregir

un problema de variabilidad en los tamaños del agregado depositado en las tolvas de alimentación en frío.

**b. RAP.** Aunque no es recomendado, en algunas plantas de bachadas el RAP se deposita directamente en una de las tolvas de alimentación en frío. Una cinta de carga separada o un elevador de cangilones se utiliza para transportar el material reciclado a la parte alta de la planta. El RAP se deposita directamente en la tolva caliente No. 1, junto con la arena o en la tolva No. 4 si no se encuentra en uso para otro tamaño de agregado. Además, si el RAP es depositado en la tolva caliente No. 1, el proceso de transferencia de calor entre la arena sobrecalentada y el RAP (a temperatura ambiente) se inicia desde el momento en que ambos materiales se encuentren juntos en una misma tolva. Si el material cubierto con asfalto se coloca en la tolva No. 4, no sucede dicha transferencia de calor debido a la ausencia de agregado sobrecalentado.

La desventaja de colocar el RAP en cualquiera de las tolvas No.1 y No. 4 es que algunas de las partículas del material cubierto con asfalto se quedan pegadas a las paredes de la tolva. Esto puede ser un problema mayor, particularmente si la cantidad de material reciclado usado en la mezcla y su contenido de humedad son ambos altos. Si en la tolva adyacente a la tolva del RAP se encuentra agregado sobrecalentado, una cantidad significativa de RAP se quedará pegado a la división entre las dos tolvas.

#### **4. Tolva de pesado**

**a. Agregado nuevo.** Si una mezcla para base está siendo producida, todos (cuatro) las tolvas calientes pueden ser llenadas con agregado. Si se está produciendo mezcla asfáltica, solo dos o tres de las tolvas calientes serán necesarias. El agregado en las tolvas calientes puede ser descargado en la tolva de pesado en cualquier orden, sin embargo, el agregado grueso es comúnmente descargado antes que el agregado más fino. Esto se hace con el fin de prevenir que la arena se escape a través de las compuertas ubicadas en la parte de abajo de la tolva de pesado.

Normalmente la compuerta en la parte de debajo de la tolva caliente No. 3 se abre y el agregado se descarga en la tolva de pesado hasta que el peso correcto se alcanza. Esta compuerta se cierra y la compuerta de la tolva caliente No. 2 se abre hasta que se alcanza el peso especificado de ese material (combinado con el peso del material

proveniente de la tolva caliente No. 3), ésta compuerta se cierra y se sigue este mismo procedimiento para las tolvas calientes No. 2 y No. 1. El peso requerido de cada material se alcanza en cerca de 5 segundos. Es importante que el agregado proveniente de cada tolva caliente sea depositado tan cerca del centro de la tolva de pesado como sea posible, de esta manera se evita el desbalance de la tolva, el cual puede provocar el derrame del material.

Muchas de las plantas de bachadas se operan en modo automático o semiautomático. Los diferentes agregados, almacenados temporalmente en las tolvas calientes, se pesan uno a la vez. Si no se dispone de suficiente agregado en una tolva caliente en particular para alcanzar el peso especificado en la tolva de pesado, el sistema de pesado espera hasta que se disponga suficiente de ese agregado particular antes de comenzar la descarga del agregado de la siguiente tolva caliente. Por esta razón, si se desea un funcionamiento eficiente y evitar la espera de un tamaño específico de agregado, es necesario que las tolvas de alimentación en frío contengan la granulometría adecuada. A pesar de que las plantas de bachadas están equipadas comúnmente con tamices, el control de la granulometría debe realizarse en las tolvas de alimentación en frío.

**b. RAP.** La ubicación más común para agregar el RAP en una planta de bachadas es en la tolva de pesado. Una vez que el agregado de las tolvas calientes ha sido depositado en la tolva y pesado, el material reciclado es comúnmente añadido a la tolva como un quinto agregado (o sexto agregado si se utiliza relleno mineral en la mezcla), sin embargo el RAP puede ser agregado en cualquier orden excepto de primero. La cinta de carga utilizada para transportar el RAP a la tolva de pesado, debe ser sobredimensionada en este caso debido a que no corre de manera continua. El RAP debe ser depositado en la tolva de pesado en aproximadamente 5 segundos.

El RAP debe ser descargado de la cinta de carga en un colector de paredes inclinadas y depositado en el centro de la tolva de pesado. La inclinación de las paredes del colector evita que el RAP se quede en el colector. Si este material no se deposita en el centro, no será posible determinar con precisión el momento en el que se alcanza el peso requerido.

## E. Mezclado del agregado y del cemento asfáltico

El agregado y el cemento asfáltico se mezclan en un molino de mezclado de dos ejes. Las paletas de mezclado están unidas a dos ejes que giran en direcciones opuestas. El agregado se descarga primera proveniente de la tolva de pesado y se mezcla durante un corto período de tiempo (tiempo de mezclado en seco) antes de que el cemento asfáltico se introduzca en el molino de mezclado y el tiempo de mezclado inicie. Cuando el mezclado se completa, la mezcla asfáltica se descarga directamente del molino de mezclado al camión transportador o a un medio de transporte hacia el silo de almacenamiento.

**1. Capacidad del molino de mezclado.** El tamaño de cada bachada producida depende del tamaño del molino de mezclado. Algunas plantas de bachadas tienen una capacidad tan pequeña como 0.9 toneladas. Sin embargo la capacidad de casi todos los molinos de mezclado es entre 1.8 y 4.5 toneladas. Algunos molinos han llegado a tener una capacidad de hasta 10.4 toneladas para una sola bachada. El tiempo de mezclado total para los distintos tamaños de molinos es el mismo (comúnmente cerca de 35 segundos por bachada). La única diferencia es el tamaño de cada bachada, no el tiempo necesario para producirla.

Ilustración 17. Interior del molino de mezclado.



Ciber, Inc.

Si se coloca mucho agregado en el mezclador, el material que queda arriba de las paletas tenderá a quedarse arriba y no se mezclarán con el resto de la mezcla. Por otro lado, si se coloca muy poco material en el molino, las paletas del molino impulsan el material por el aire en lugar de mezclarlo.

El tamaño de cada bachada no debe variarse entre bachadas; la producción de bachadas del mismo tamaño es una práctica clave para lograr mezclas consistentes. Una buena práctica es seleccionar un tamaño de bachadas de la capacidad nominal del molino mezclador y producir todas las bachadas del mismo peso. Por ejemplo, si la planta está equipada con un molino de 2.7 toneladas y el camión transportador promedio tiene una capacidad de 12.5 toneladas, cada bachada debe ser de 2.5 toneladas (12.5 toneladas por camión equivalen a cinco bachadas). El operador de la planta no debe tratar de producir cuatro bachadas de 2.7 toneladas y una quinta bachada de 1.8 toneladas.

**a. RAP.** Si se agrega una tolva de pesado adicional a la planta de bachadas, el RAP puede ser transportado y pesado en su propia báscula mientras el asfalto y los agregados están siendo pesados en otra báscula. La misma transferencia de calor, liberación de vapor y los mismos límites prácticos son aplicables a este enfoque de la misma manera que aplican al método de reciclaje de la “caja de pesado”.

Las ventajas de éste método incluyen las siguientes consideraciones:

- Durante largo tiempo de elaboración de pavimento reciclado se puede producir un aumento en la producción debido a que el tiempo necesario para completar cada bachada se reduce ligeramente.
- Hay menos desgaste en el equipo por arranques y paradas abruptas.
- El proceso de pesado puede realizarse más lentamente y de manera más precisa con una tolva de pesado que no está influenciada por la liberación instantánea de vapor.

Comúnmente, una cinta transportadora especial para el RAP es utilizada para llevarlo de la tolva de pesado al molino de mezclado. Un colector o un tornillo sin fin también pueden ser utilizados.

## 2. Tiempo de mezclado.

**a. Tiempo de mezclado en seco.** El tiempo de mezclado en seco comienza cuando se deposita el agregado en el molino de mezclado y termina cuando la inyección del cemento asfáltico comienza. El tiempo de mezclado en seco debe ser mínimo (normalmente, no mayor de 1 o 2 segundos). A pesar de que el agregado en la tolva de mezclado se encuentra en capas, el agregado de distintos tamaños puede ser mezclado de manera adecuada durante el mezclado con el cemento asfáltico y no necesita ser premezclado durante el mezclado en seco. El propósito principal del mezclado en seco es permitir que el agregado entre en el molino mezclador para evitar que el cemento asfáltico se salga del molino por la compuerta de abajo.

Incrementar el tiempo de mezclado en seco disminuye la producción de la planta sin añadir beneficios a la mezcla y causa un desgaste innecesario en las paletas del molino mezclador. Además, un incremento en el tiempo de mezclado en seco aumenta el costo de producción de la mezcla. Por estas razones el tiempo de mezclado en seco debe mantenerse tan corto como sea posible, por lo general 1 segundo es adecuado.

**b. Tiempo de mezclado con el cemento asfáltico.** Mientras que el agregado aún está siendo descargado de la tolva de pesado en el molino mezclador, la adición de cemento asfáltico comienza. Este material ingresa en el molino mezclador por gravedad o por riego a presión y se añade por medio de un tubo en el centro del molino o por dos tubos arriba de cada uno de los ejes rotatorios. El tiempo de mezclado con el cemento asfáltico comienza cuando el asfalto entra en el molino mezclador. Regularmente se requiere entre 5 y 10 segundos para que todo el asfalto ingrese en el molino proveniente de la tolva de pesado. Sistemas de inyección a presión pueden ser utilizados para reducir este tiempo.

El tiempo de mezclado con el cemento asfáltico debe ser el menor tiempo necesario para cubrir completamente el agregado con cemento asfáltico. Si el cobertor del molino y las paletas se encuentran en buen estado y si el molino de mezclado está lleno, el tiempo de mezclado con el cemento asfáltico debe ser de alrededor de 27 segundos. Si las paletas están desgastadas, éste tiempo debe ser aumentado, pero no es recomendable exceder los 33 segundos. Debido a que la condición de las paletas afecta el tiempo de mezclado, éstas deben ser revisadas con regularidad y

reemplazadas cuando sea necesario. Como regla general, un tiempo de mezclado con el cemento asfáltico de 30 segundos es suficiente para distribuir uniformemente el cemento asfáltico y cubrir todo el agregado.

El tiempo de mezclado debe ser tan corto como sea posible con el fin de evitar el endurecimiento excesivo del cemento asfáltico en una delgada capa alrededor de las partículas del agregado como resultado de la exposición a altas temperaturas. El tiempo requerido para el mezclado con el cemento asfáltico puede determinarse utilizando el procedimiento de Ross para determinar el grado de recubrimiento de las partículas del agregado grueso en la mezcla (norma ASTM C2489). Cuando el cemento asfáltico se haya distribuido adecuadamente, el tiempo de mezclado adicional no mejora la calidad de la cobertura asfáltica sino que oxida el cemento asfáltico (endureciéndolo) mediante la exposición continua del material aglomerante al oxígeno del aire.

La cobertura del agregado en el molino de mezclado ocurre primero con las partículas más pequeñas del agregado. Si el mezclado con el cemento asfáltico se lleva a cabo por solo 10 segundos y el material se descarga luego de ese tiempo, solo el agregado fino (material más pequeño de 0.60mm o 0.425mm, que pasa el tamiz No. 30 o el No. 40) será cubierto con cemento asfáltico, en este caso las partículas más grandes sólo estarán parcialmente cubiertas con cemento asfáltico. Si el tiempo de mezclado con el cemento asfáltico se aumenta a 20 segundos, solo el agregado de 4.75mm (tamiz No. 4) y más pequeño será cubierto con el cemento asfáltico. El agregado más grande permanecerá parcialmente cubierto. El recubrimiento completo de todas las partículas de agregado grueso toma entre 26 y 28 segundos de mezclado con el cemento asfáltico en un molino con unas paletas y un interior en buen estado. Debido a esto, el procedimiento Ross, que solo toma en cuenta la cobertura del agregado grueso, es una manera efectiva de determinar el tiempo mínimo de mezclado con el cemento asfáltico.

**c. Tiempo total de mezclado.** El tiempo de mezclado tiene un efecto directo en la capacidad de producción de una planta. Si se utiliza un tiempo de mezclado en seco de un segundo y un tiempo de mezclado con el cemento asfáltico de 27 segundos, es posible alcanzar una mezcla apropiada en 28 segundos. Si se asumen 7 segundos más para abrir las compuertas del molino de mezcla, descargar la mezcla y

cerrar las compuertas, el tiempo total de un ciclo requerido para producir una batchada de mezcla asfáltica en caliente es de 35 segundos. Este tiempo es el mismo para batchadas desde 1.8 toneladas hasta batchadas de 4.5 toneladas. Teóricamente, si una planta con una capacidad del molino mezclador de 4.5 toneladas trabaja de manera continua por una hora, 465 toneladas de mezcla asfáltica pueden ser producidas.

Si la planta no cuenta con un silo, habrá momentos en los que la producción de la planta deberá interrumpirse debido a la falta de disponibilidad de los camiones de carga. Este problema debe ser monitoreado por el operador de la planta. En ningún caso el tiempo total de mezclado debe ser aumentado durante el ciclo de mezclado con el cemento asfáltico. Si el cemento asfáltico se añade a la mezcla y el tiempo de mezclado se aumenta a 40 o 50 segundos o más, ocurrirá endurecimiento excesivo del cemento asfáltico. Este aumento en el tiempo de mezclado con el cemento asfáltico puede ser muy perjudicial para el desempeño a largo plazo de la mezcla colocada.

Si no hay camiones disponibles, la planta deberá seguir funcionando sin material en el molino mezclador. La segunda opción, mucho menos deseable, es dejar la planta en espera durante el mezclado en seco, es decir con el agregado en el molino pero sin cemento asfáltico. Esto puede hacerse durante un corto período de tiempo, de otro modo puede ocurrir una ruptura excesiva del agregado.

Varios factores pueden reducir el abastecimiento del agregado nuevo, tales como alto contenido de humedad o insuficiente capacidad de los tamices, que aumentan el tiempo de secado. La tasa de producción de la planta se verá reducida mientras se espera el agregado seco. Si éste problema ocurre, el operador de la planta no debe incrementar el tiempo total del ciclo aumentando el tiempo de mezclado con el cemento asfáltico. Preferiblemente, el tiempo total del ciclo debe aumentarse retrasando la descarga del agregado de la tolva de pesado al molino mezclador y de esta manera mantener el molino con sus paletas en rotación pero sin agregado dentro de él.

## **F. Producción de mezcla reciclada.**

- 1. Variables del reciclado.** La temperatura del agregado nuevo y el contenido de humedad del RAP rigen la cantidad de material reciclado que puede ser

introducido en una mezcla reciclada producida por una planta de bachadas. Para que se lleve a cabo la transferencia de calor del agregado nuevo caliente hacia el RAP (a temperatura ambiente), el agregado nuevo debe ser sobrecalentado, es decir se debe calentar hasta una temperatura mayor de la necesaria para producir una mezcla asfáltica convencional. Esta transferencia de calor puede darse en el elevador en caliente, en las tolvas calientes, en la tolva de pesado o en el molino mezclador, dependiendo del momento en el cual se introduzca el RAP en la planta. Para la mayoría de los secadores, la temperatura máxima para el agregado nuevo al descargarse del secador debe ser alrededor de 260°C, con el fin de no afectar la vida útil del secador.

Las tres variables principales que determinan la temperatura a la cual cada agregado nuevo debe ser calentado para alcanzar la transferencia de calor necesaria son: el contenido de humedad en el material reciclado, la temperatura de descarga de la mezcla reciclada final y la cantidad de material reciclado utilizado. Dependiendo del valor de estas tres variables, hasta un 50% de RAP puede ser mezclado con el agregado nuevo para producir una mezcla asfáltica reciclada. Raras veces es factible utilizar esa cantidad máxima de RAP en una mezcla asfáltica producida en una planta de bachadas.

**a. Contenido de humedad.** Mientras el contenido de humedad del material reciclado aumenta, la temperatura requerida del agregado nuevo también aumenta significativamente. La siguiente tabla muestra la relación entre el contenido de humedad y la temperatura a la cual debe ser calentado el agregado nuevo para obtener la transferencia de calor necesaria. Por ejemplo, si se utiliza un 20% de RAP en la mezcla, el contenido de humedad es 1%, y la temperatura requerida de descarga es 127°C, la temperatura a la cual el agregado nuevo debe calentarse es 177°C. Sin embargo, si el mismo material tiene un contenido de humedad de 4% la temperatura debe aumentarse hasta 199°C para la misma cantidad de material reciclado y la misma temperatura de descarga de la mezcla.

**b. Temperatura de descarga de la mezcla.** Una mayor temperatura de descarga de la mezcla con material reciclado requiere un incremento en la temperatura del nuevo agregado proveniente del secador.

Tabla 7. Relación de la temperatura de la mezcla reciclada, porcentaje de RAP y contenido de humedad.

Contenido de humedad del material reciclado	Temperatura de descarga de la mezcla reciclada			
	104.4°C	115.6°C	126.7°C	137.8°C
<b>A. Relación: 10% RAP / 90% Agregado nuevo</b>				
0	121.1°C	137.8°C	151.7°C	162.8°C
1	126.7°C	143.3°C	154.4°C	168.3°C
2	132.2°C	146.1°C	157.2°C	171.1°C
3	137.8°C	148.9°C	162.8°C	173.9°C
4	140.6°C	151.7°C	165.6°C	176.7°C
5	143.3°C	157.2°C	168.3°C	182.2°C
<b>B. Relación: 20% RAP / 80% Agregado nuevo</b>				
0	137.8°C	154.4°C	168.3°C	182.2°C
1	146.1°C	160.0°C	176.7°C	190.6°C
2	154.4°C	168.3°C	182.2°C	196.1°C
3	162.8°C	176.7°C	190.6°C	204.4°C
4	171.1°C	185.°C	198.9°C	212.8°C
5	179.4°C	193.3°C	207.2°C	221.1°C
<b>C. Relación: 30% RAP / 70% Agregado nuevo</b>				
0	157.2°C	173.9°C	190.6°C	207.2°C
1	168.3°C	185.0°C	201.7°C	218.3°C
2	182.2°C	198.9°C	215.6°C	232.2°C
3	196.1°C	212.8°C	229.4°C	246.1°C
4	210.0°C	226.7°C	243.3°C	260.0°C
5	223.9°C	240.6°C	257.2°C	273.9°C
<b>D. Relación: 40% RAP / 60% Agregado nuevo</b>				
0	179.4°C	198.9°C	218.3°C	237.8°C
1	198.9°C	218.3°C	237.8°C	257.2°C
2	218.3°C	237.8°C	257.2°C	276.7°C
3	243.3°C	260.0°C	279.4°C	298.9°C
4	260.0°C	279.4°C	298.9°C	321.1°C
5	285.0°C	301.7°C	321.1°C	340.6°C
<b>E. Relación: 50% RAP / 50% Agregado nuevo</b>				
0	210.°C	235.°C	257.2°C	282.2°C
1	240.6°C	268.3°C	287.8°C	310.°C
2	271.1°C	304.4°C	318.3°C	343.3°C
3	301.7°C	326.7°C	348.9°C	373.9°C
4	337.8°C	360.°C	379.4°C	404.4°C
5	365.6°C	390.6°C	412.8°C	437.8°C

Hot Mix Asphalt Pavement, Brown, *et al.*

**c. Cantidad de RAP.** Mientras la cantidad de RAP en la mezcla reciclada aumenta, la temperatura del agregado también aumenta. Si sólo se usa el 20% de RAP y si el contenido de humedad de ese material es 4% para una temperatura de descarga de 138°C, la temperatura de descarga del agregado nuevo debe ser 213°C. Al aumentar la cantidad de RAP a 50%, con el mismo contenido de humedad y

la misma temperatura de descarga de la mezcla, la temperatura del nuevo agregado debe ser aumentada hasta 405°C para completar el proceso de transferencia de calor. Esta temperatura excede significativamente la temperatura máxima recomendada para agregado nuevo de 260°C.

**2. Operaciones del secador.** Si la temperatura del agregado nuevo que sale del secador excede aproximadamente 260°C, el costo de operación y mantenimiento del secador puede incrementarse significativamente. Debido a la temperatura excesivamente alta del agregado y su reducido volumen al producir mezclas con altos porcentajes de RAP, es posible que la cortina de agregado dentro del secador no sea la adecuada. Esta falta de cortina incrementará la temperatura de las paredes del secador y puede incrementar la necesidad de mantenimiento del interior del secador, especialmente en las paletas de descarga.

Si la producción de mezcla se detiene por un largo período de tiempo debido a la falta de camiones transportadores o por problemas mecánicos, el agregado nuevo sobrecalentado se quedará en la parte baja del secador. Si la temperatura de este material es mayor de cerca de 260°C puede ocurrir una deformación de las paredes del tambor. Por eso, al final de cada ciclo de producción, el secador debe mantenerse girando vacío con el ventilador encendido por un período razonable de enfriamiento. Este procedimiento protegerá el tambor y las paletas de posibles deformaciones.

**3. Emisiones visibles.** Cuando el RAP se deposita encima del agregado nuevo sobrecalentado en la tolva de pesado y cuando los dos materiales se mezclan juntos en el molino mezclador se puede producir emisión de vapor y polvo. Estas emisiones son causadas por la liberación de humedad, en forma de vapor, del RAP. La cantidad de vapor, así como humo azul, que se libera puede ser bastante grande. Para una mezcla que contiene 50% de RAP en una batchada de 2.7 toneladas de mezcla, con un contenido de humedad de 3%, 40Kg de agua, que se convertirán en aproximadamente 422m<sup>3</sup> de vapor de agua serán liberados en aproximadamente 5 segundos. Esta liberación de vapor causa el acarreo de partículas de polvo de la tolva de pesado y del molino mezclador.

Una forma de controlar la emisión de partículas es reduciendo la cantidad de humedad o la cantidad de RAP utilizado en la mezcla. El contenido de humedad del material reciclado puede mantenerse bajo evitando su trituración hasta justo antes de ser requerido y manteniendo el RAP bajo techo para protegerlo de la lluvia. Otra práctica común es conectar adecuadamente la tolva de pesado y el molino mezclador al sistema de control de emisiones de la planta.

## **G. Carga directa de camiones o del silo**

Si la mezcla proveniente del molino mezclador se descarga directamente sobre el camión transportador en sitios distintos. La primera bachada debe ser descargada en la parte frontal, luego el piloto del camión debe moverse hacia adelante para que la segunda bachada sea descargada en la parte posterior. El resto de bachadas se deben descargar en el centro, con la posición del camión cambiando en cada descarga. Este procedimiento reducirá la distancia que las partículas de agregado grueso pueden rodar en el camión al mismo tiempo que se reduce la posibilidad de segregación.

Si la mezcla se almacenara temporalmente en un silo, debe ser descargada del molino mezclador al centro de una tolva y luego transportada hasta el silo.

## **H. Control de emisiones.**

Debido a que el cemento asfáltico no se añade al agregado dentro del secador, la cantidad de polvo generado por el secador una planta de bachadas es, por lo general, mayor que la generada por una planta de tambor. La operación del equipo de control de emisiones (sistema de retención húmedo y colector de filtros) es la misma independientemente del tipo de planta usada.

Si los finos del colector de filtros se devuelven a la mezcla, deben pasar por un sistema de medición antes de ser introducidos en la tolva de pesado o en la torre. Este procedimiento asegurará que los finos del colector sean añadidos de manera uniforme a la mezcla. En algunas plantas, los finos son transportados a la parte baja del elevador caliente y depositados encima del agregado nuevo que se descarga del secador. Mientras los finos se depositen de manera consistente, este método de retorno de finos es aceptable, particularmente si el agregado pasa a través de la cámara de tamizado. Si

no se utilizan los tamices, pequeñas concentraciones de finos se pueden depositar en el tolva caliente No. 1 y posiblemente terminar en la mezcla sin deshacerse. Por esta razón el retornar los finos del colector de emisiones al elevador en caliente probablemente no sea una buena opción como sería el depositarlos directamente en la tolva de pesado.

Si la planta está equipada con un colector de filtros y se produce una mezcla reciclada con un alto porcentaje de RAP, la temperatura de los gases de la combustión producidos por el secador deben ser controlados continuamente para asegurar que las bolsas en los filtros no se dañen por el calor excesivo. Mientras más se caliente el agregado nuevo, mayor será la posibilidad de problemas con el funcionamiento del colector de emisiones.

## **I. Calibración**

El procedimiento para la calibración de una planta de bachadas involucra el chequeo de la precisión en la medición del peso del agregado y del cemento asfáltico. Esto se obtiene comúnmente mediante la comparación entre una cantidad de material conocida y la lectura de las básculas de pesado. Para este procedimiento se utilizan comúnmente diez pesas de 22.6 Kg.

La báscula del agregado se descarga y se coloca la medición en cero. Las diez pesas de 22.6 Kg se cuelgan de la báscula y lectura indicada se anota. Las pesas se quitan y 226Kg de agregado se colocan en la tolva de pesado. Las diez pesas se cuelgan de nuevo a la báscula y la siguiente lectura (452Kg) se anota. Las pesas se quitan una vez más y se añade una cantidad adicional de agregado de 226Kg. Las pesas se colocan en la báscula y se toma la siguiente lectura (678Kg). Este proceso continúa hasta que se alcance la capacidad de la báscula.

El mismo procedimiento se utiliza para el sistema de pesado del cemento asfáltico, a excepción de que sólo se utiliza una pesa de 22.6Kg. Para ambas básculas, la medición real luego de colocar cada conjunto de pesas ya ha sido determinada y esta medición teórica se compara con la lectura de la báscula. Si ambas mediciones son iguales (con una variación de 0.5%), la báscula está calibrada. Si las dos mediciones

son distintas, las básculas deben ser ajustadas. Los ajustes se realizan usando los procedimientos determinados por el fabricante de la báscula.

## VIII. PLANTAS CONTINUAS DE TAMBOR

### A, Plantas continuas de tambor de flujo paralelo

Existen dos maneras de introducir el agregado nuevo desde la banda de carga. La primera es por medio de un colector localizado arriba del quemador. El agregado se deposita en un colector inclinado y se desliza por gravedad en el tambor. El colector posee una inclinación para evitar que el agregado haga contacto directo con la llama y para que caiga en la parte de atrás del tambor. También, se puede depositar el agregado en una banda transportadora ubicada bajo el quemador. En algunas plantas, la velocidad de esta banda transportadora se puede cambiar para que el agregado se deposite en la parte baja del tambor, lejos de la llama del quemador.

**1. Sistema de secado.** La función del quemador es calentar y secar el agregado.

Los quemadores se califican por el Método Uniforme de Evaluación de Quemadores que se basa en ocho criterios: (a) porcentaje de exceso de aire, (b) porcentaje de escape de aire, (c) porcentaje de pérdida de cubierta, (d) temperatura del gas del ventilador, (e) porcentaje de humedad removida del agregado, (f) temperatura de descarga de la mezcla, (g) uso de combustible No. 2 y (h) calor específico del agregado. La salida máxima de un quemador bajo estas condiciones puede encontrarse en la placa de calificación de cada quemador, sin embargo las condiciones de operación reales para el quemador pueden diferir de las utilizadas para calificar el quemador.

**a. Combustible.** La mayoría de los quemadores están diseñados para quemar más de un tipo de combustible luego de ajustes mínimos en la configuración del quemador. Se utilizan tres tipos de combustible: líquidos, gaseosos o sólidos. Los combustibles gaseosos incluyen gas natural y gases del petróleo líquido. Los combustibles líquidos incluyen propano, butano, combustible No. 2 (el combustible es una fracción obtenida de la destilación del petróleo, se clasifica en seis clases, y el No. 2 corresponde al diesel), aceites pesados No. 4 al No. 6 (el combustible No. 4 es una mezcla de destilados y residuales; los No. 5 y 6 son llamados combustibles residuales o aceites pesados), y aceite reciclado. Algunos ejemplos de combustibles sólidos son el carbón pulverizado y la biomasa.

El combustible seleccionado debe tener la consistencia apropiada para completar el proceso de atomización en el momento de la combustión. El combustible No.2 hará combustión a temperatura ambiente sin necesidad de precalentado debido que su viscosidad es inferior a 100 SSU (*saybolt seconds universal*). Para una atomización adecuada, los aceites pesados (como los Nos. 5 y 6) deben ser precalentados antes de la combustión para reducir su viscosidad hasta 100 SSU o menos y por consiguiente permitir su completa combustión. El aceite reciclado, que ha sido filtrado y deshidratado tiene buena combustión. Otros combustibles reciclados contaminados con metales pesados, desperdicios peligrosos o agua, no tienen combustión completa y no deberán usarse en los quemadores de las plantas asfálticas. La combustión incompleta por lo general no es un problema cuando se utilizan combustibles gaseosos.

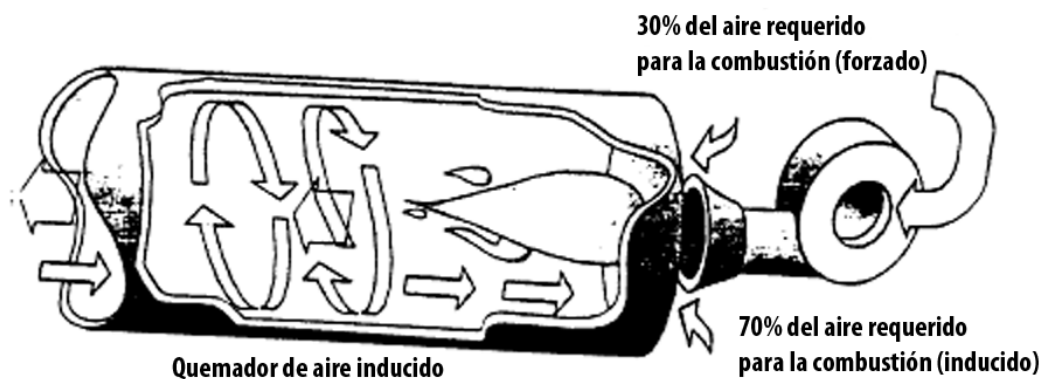
El combustible no quemado puede afectar el quemador, la planta y la mezcla, al mismo tiempo que representa un desperdicio de dinero. Puede causar bloqueos, dificultades para encender el quemador y aumentar los costos de mantenimiento. La combustión incompleta puede provocar que el combustible no quemado ingrese en el equipo de control de emisiones, cubriendo y tapando los filtros en el colector de emisiones (incrementando la posibilidad de incendio en la cámara de filtros) o cubriendo la superficie del estanque de agua de desecho, si se utiliza un sistema de control de emisiones con colector húmedo. La combustión incompleta también reduce la cantidad de calor disponible para secar el agregado y como consecuencia incrementa el consumo de combustible y los costos de operación. Además, puede reducir la temperatura de los gases de la combustión, los cuales pueden causar condensación de la humedad en la tela de los filtros.

El combustible no quemado puede cambiar las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente. Primero, el combustible puede disminuir la viscosidad del cemento asfáltico y reducir el endurecimiento que el material sufre durante el proceso de mezclado. El combustible no quemado también puede adherirse a la superficie de las partículas de agregado grueso, resultando en formaciones de color café en el agregado, al mismo tiempo que reduce el espesor de la capa de asfalto en esas superficies. Estos dos problemas pueden afectar la rigidez, estabilidad y resistencia de la mezcla asfáltica producida.

Los problemas causados por el combustible no quemado pueden ser identificados de varias maneras. Un sensor de llama que reconoce el color de la llama del quemador se puede utilizar para controlar la tonalidad de la llama y detener el quemador cuando el color indique una combustión incompleta. Un sonido uniforme y constante del quemador es, por lo común, una buena señal (sin embargo, es posible tener un problema de combustión incompleta incluso si el sonido del quemador es constante). Por otro lado, un sonido irregular puede indicar una posible combustión incompleta. Si el combustible ingresa en los filtros de la cámara de control de emisiones, puede dañarlos o si ingresa en el sistema de control por medio de agua, puede provocar una capa de aceite sobre los depósitos de agua.

**b. Quemadores.** La función principal del quemador es mezclar las cantidades adecuadas de aire y combustible para obtener una combustión completa. Se pueden utilizar dos tipos básicos de quemadores de tambor, los de contraflujo y los de flujo paralelo. Muchas plantas asfálticas están equipadas con un quemador que requiere que del 30% al 45% del aire necesario para la combustión se obtenga a través de un soplador hacia el quemador. El aire restante se extrae a través de un ventilador a la zona de combustión. La siguiente figura muestra un esquema de este sistema, el cual es una combinación de aire inducido y flujo forzado.

Ilustración 18. Quemador de aire inducido y forzado.

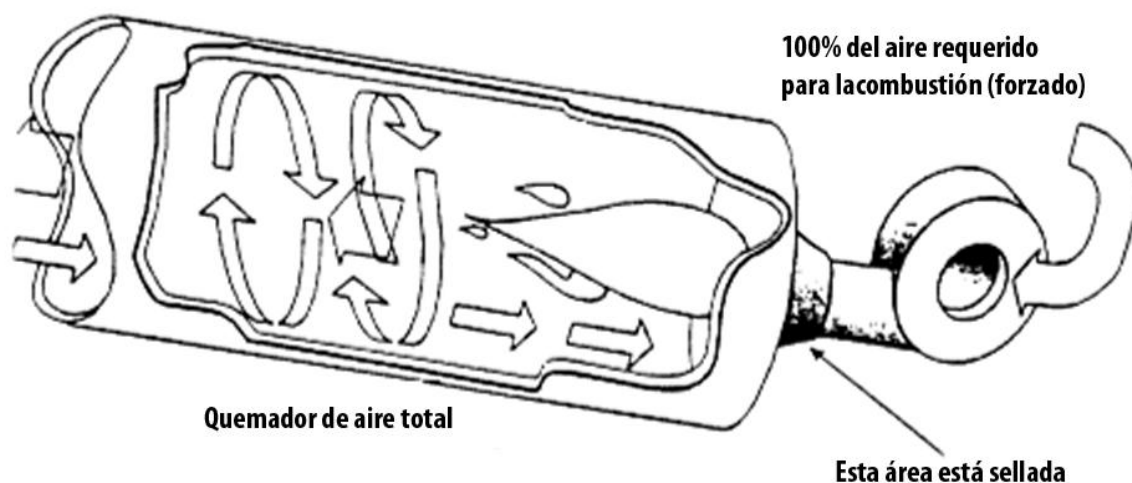


Hot Mix Asphalt Pavement, Brown, *et al.*

Algunos quemadores funcionan con todo el aire necesario para la combustión siendo forzado a fluir a través de un soplador. Este segundo tipo de quemador se

muestra en la siguiente figura y se conoce como quemador de flujo forzado, quemador de aire-total o quemador de 100% aire. Estos sistemas son por lo general menos ruidosos que los sistemas de combustión más eficientes.

Ilustración 19. Quemador de aire forzado.



Hot Mix Asphalt Pavement, Brown, *et al.*

Existen tres razones por las cuales una planta debe ser ajustada por el operador: la primera se basa en el cambio en la cantidad de agregado dentro del tambor; la segunda se basa en el aumento o disminución de la cantidad de humedad en el agregado; y la tercera es por el cambio en la temperatura de descarga requerida por la planta. La mayoría de quemadores están equipados con un dispositivo automático que controla la entrada de combustible, para mantener una temperatura de descarga relativamente constante.

La falta de aire o combustible reducirá la eficiencia del quemador. Comúnmente la disponibilidad de aire es el factor limitante. El ventilador además de proveer el aire inducido, también debe extraer el vapor de agua y los productos de la combustión formados durante el proceso de secado dentro del secador. La capacidad de este ventilador es un factor determinante en el secado y calentado del agregado. El volumen de gases de la combustión (aire, humedad, vapor y otros productos) extraído por el ventilador es constante, dependiendo de la configuración del sistema.

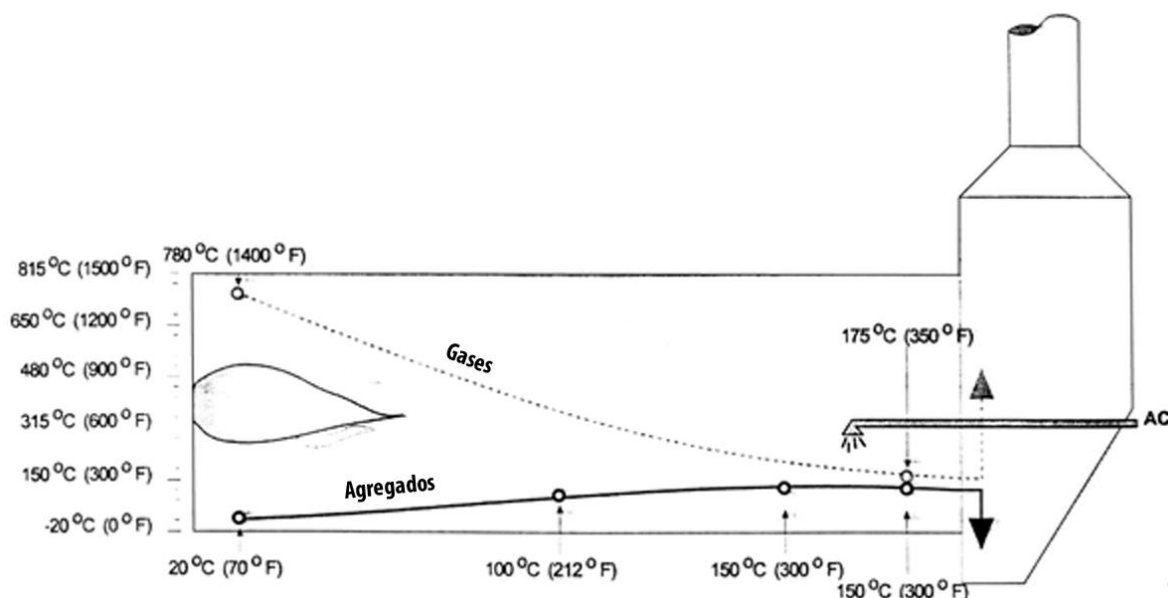
La eficiencia del sistema también se ve afectada por fugas de aire. Debido a que el ventilador extrae un volumen constante de gases de combustión y cualquier cantidad de

aire que ingrese al sistema reduce la cantidad de gases de combustión que pueden ser extraídos por el ventilador. Las fugas de aire deben ser eliminadas para proveer el volumen de aire requerido para alcanzar la combustión completa. Un sistema de graduación, operado manualmente o automáticamente, también debe ser colocado en los conductos para controlar la cantidad de aire que ingresa al sistema.

## 2. Proceso de transferencia de calor

**a. Temperaturas dentro del tambor.** La temperatura de la llama del quemador supera los 1,400°C. La temperatura de los gases de salida de las plantas de tambor de flujo paralelo generalmente es unos 30°C más alta que la temperatura de salida de la mezcla. Mayores temperaturas de la salida de los gases pueden indicar un escape inapropiado y se deben implementar acciones de corrección. Las temperaturas típicas de los gases de combustión y de los agregados a lo largo de del tambor de las plantas de flujo paralelo se muestra en la siguiente gráfica.

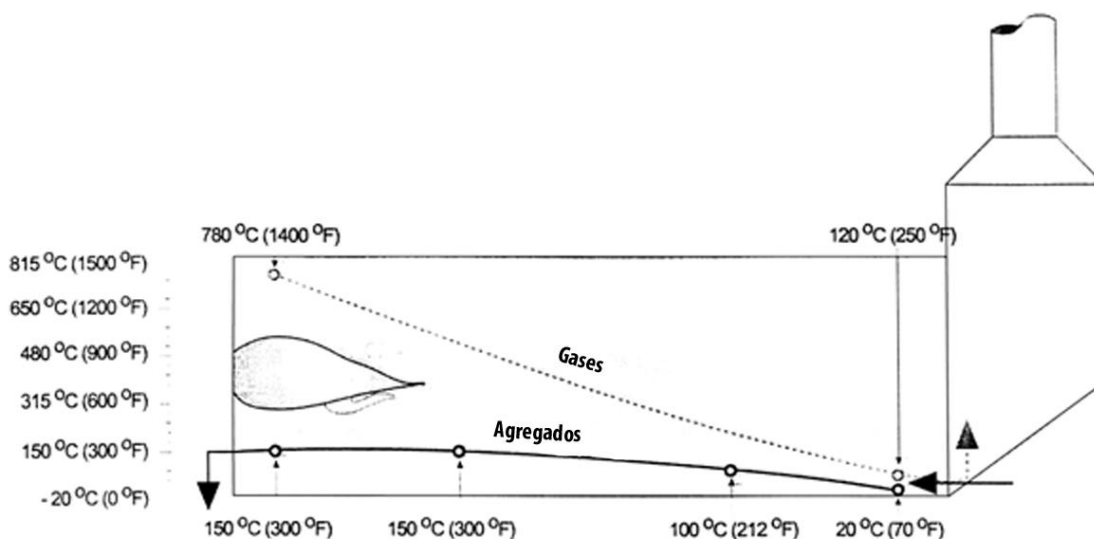
Ilustración 20. Temperaturas de los agregados y los gases dentro del tambor de flujo paralelo.



Hot Mix Asphalt Pavement, Brown, *et al.*

Para las plantas de contraflujo, la temperatura aproximada de los agregados y de los gases de combustión se comporta de acuerdo a la siguiente gráfica.

Ilustración 21. Temperaturas de los agregados y los gases dentro del tambor de contraflujo.



Hot Mix Asphalt Pavement, Brown, *et al.*

La diferencia entre la temperatura de los gases y la temperatura de descarga de la mezcla representa la eficiencia del proceso de transferencia de calor y la cantidad de calor que queda disponible para secar y calentar el agregado. Una transferencia de calor perfecta en una planta de flujo paralelo requeriría que la temperatura de descarga y los gases de la combustión sean iguales en el punto en el cual se descarga la mezcla.

A pesar de que la medida de la eficiencia del proceso de transferencia de calor se obtiene comparando la temperatura de los gases con la temperatura de descarga de la mezcla en el momento en el que salen del tambor, es difícil determinar de forma precisa la temperatura de los gases en este punto. La diferencia de temperatura se mide comúnmente en el conducto en un punto entre el final del tambor y la entrada de los gases al sistema de control de emisiones. Este procedimiento se lleva a cabo por medio de un termopar instalado en los conductos en un punto antes de ser depositados en los filtros secos o húmedos. Para un funcionamiento eficiente del tambor mezclador, la temperatura de los gases de combustión antes de entrar al sistema de control de emisiones debe estar dentro de los 10°C de la temperatura de descarga de la mezcla.

Generalmente, no es posible comparar la temperatura de descarga de la mezcla y la temperatura de los gases de combustión en el punto en el que salen de la chimenea

de la planta. Si se utiliza un filtro húmedo en la planta, el agua utilizada para atrapar las partículas de polvo en los gases de la combustión enfriará los gases de forma natural. Además, tanto para los filtros secos como para los húmedos, cualquier filtración de aire en la tubería o en el equipo de control de emisiones entre el final del tambor y la chimenea reducirá la temperatura de los gases de combustión antes de que salgan por la chimenea. Por esta razón, la temperatura de descarga de la mezcla y la temperatura de los gases de combustión deben compararse en el conducto antes de que los gases entren en el sistema de control de emisiones.

Si la temperatura de los gases de combustión en el conducto es, por ejemplo 180°C y la temperatura de descarga de la mezcla es 140°C, la cortina de agregados dentro del tambor probablemente se forme de manera incompleta, por lo que el tambor está siendo operado ineficientemente. Esto puede generar varios problemas, incluyendo el aumento en el consumo de combustible, posible separación del agregado más fino del resto del agregado dentro del tambor, incremento en el deterioro de los filtros.

La temperatura de los gases de combustión también debe ser controlada en el punto en el que el cemento asfáltico se inyecta. Algunos cementos asfálticos, dependiendo del origen del petróleo y el proceso de refinación usado pueden contener pequeñas cantidades de material volátil que puede ser expulsado a temperaturas tan bajas como 330°C e incluso menores si hay humedad presente. Las emisiones visibles pueden evitarse si la temperatura de los gases de combustión está por debajo de este valor en el punto en el que el cemento asfáltico entra al tambor.

Los gases de combustión serán por lo general mayores cuando se produzca una mezcla reciclada. Estas temperaturas mayores se relacionan con la reducción de la densidad de la cortina de agregado antes del punto de entrada del RAP lo que resulta en un proceso de transferencia de calor menos eficiente. Mientras mayor sea la cantidad de RAP usado en la mezcla reciclada, menor será la cantidad de agregado nuevo y por lo tanto la cortina de agregado será menos completa en el punto en el que se deposita el RAP. La prevenir la producción de emisiones visibles (humo azul) durante el reciclado, la temperatura de los gases de combustión debe ser inferior a 200°C en el punto en el que el RAP entra al tambor.

**b. Diseño de las paletas.** El agregado depositado en el tambor se mueve hacia abajo a lo largo del mismo por una combinación de flujo gravitatorio y de las paletas de carga, mientras el tambor rota. Los factores que afectan el tiempo requerido para que una partícula individual de agregado pase a través del tambor incluyen la longitud y diámetro del tambor, la inclinación del tambor, el número y tipo de paletas dentro del tambor, la velocidad de rotación del tambor y el tamaño de las partículas del agregado. En general, le toma entre 4 y 8 minutos a una partícula alcanzar el punto de descarga del tambor.

Cada fabricante de plantas de tambor utiliza diferentes patrones, formas, número y ubicación de las paletas dentro del tambor. A pesar de utilizar distintos nombres por fabricantes distintos, las paletas usadas en las distintas secciones del tambor generalmente cumplen los mismos propósitos: exponer el agregado al calor producido por los gases del quemador sin hacerlo pasar por la llama, con el fin de eliminar la humedad del agregado, para cubrir el agregado con cemento asfáltico y calentar el material cubierto a la temperatura de descarga apropiada.

Cuando se utiliza un tambor de flujo paralelo, la llama del quemador debe ser corta y ancha y no extenderse mucho en el tambor para proteger el cemento asfáltico de las altas temperaturas. No obstante, la llama del quemador debe tener suficiente espacio para expandirse y hacer una combustión completa. El agregado entrante no puede ser depositado directamente en el fuego o apagaría la llama. Por eso, las primeras paletas en la parte de arriba del tambor se utilizan para dirigir el agregado en el tambor lejos de la punta de la llama.

Las paletas siguientes se usan para levantar algún agregado del fondo del tambor y comenzar a botar el material a través de los gases de combustión del quemador. A medida que el agregado se mueve hacia abajo en el tambor, una cantidad más grande de agregado es levantada y botada. Cerca del centro del tambor, una cortina de agregado se forma en la sección transversal del tambor. Esta cortina es esencial para lograr la transferencia de calor de los gases de la combustión para que el secado y calentado del agregado se pueda llevar a cabo. Mientras más completa se forme la cortina, el proceso de transferencia de calor será más efectivo, se consumirá menos combustible y la emisión de partículas de la planta será menor.

Algunos mezcladores de tambor están equipados con dispositivos, localizados cerca del centro del tambor, designados a retardar el flujo de agregado en el tambor. Un anillo se inserta dentro del tambor y reduce el diámetro en ese punto lo cual produce una acumulación del agregado, creando una cortina más densa. En este mismo lugar, algunos fabricantes de plantas de tambor instalan paletas que interceptan el agregado y lo regresan más arriba con el fin de concentrar el agregado en ese punto. Si bien, restringir el diámetro del tambor ayuda a aumentar la densidad de la cortina, también reduce el área transversal lo que obliga a los gases de combustión a pasar a mayor velocidad a través de ese lugar lo cual puede provocar un aumento en la cantidad de finos atrapados por los gases.

En una parte más abajo en el tambor, el cemento asfáltico se inyecta en el tambor, y las paletas de mezclado se usan para combinar el agregado con el cemento asfáltico. Estas paletas también permiten que las partículas cubiertas con cemento asfáltico continúen siendo calentadas por los gases de combustión, completen el proceso de transferencia de calor y aumente la temperatura de la mezcla a la deseada para la descarga. En la parte de atrás del tambor, las paletas de descarga se emplean para depositar el material en el colector de descarga para ser transportadas al silo.

A medida que las paletas se deterioren por la acción abrasiva del agregado que se mueve a través del tambor, la eficiencia del proceso de secado y calentado puede reducirse, razón por la cual la condición de las paletas debe revisarse con regularidad. El nivel de deterioro de las paletas depende de las condiciones de operación de la planta y del tipo de agregado que se utilice. Las paletas deterioradas deben ser reemplazadas si es necesario. Además, si la transferencia de calor adecuada no se alcanza, el tipo y ubicación de las paletas dentro del tambor puede ser cambiado para mejorar la cortina de agregado.

Las antiguas plantas de tambor se construían con una relación de largo-diámetro de 4:1, que era la usada para las plantas de bachadas. La tendencia actual es utilizar tambores más largos para obtener una transferencia de calor más completa y reducir los problemas de emisiones, particularmente cuando se está produciendo una mezcla

reciclada. Algunos mezcladores de tambor actuales tienen relaciones largo-diámetro de 5:1 ó 6:1.

**c. Incremento en la cortina de agregado.** Se pueden utilizar paletas de retorno, donas o anillos de retención para retardar el flujo de material que baja a través del tambor e incrementar la densidad de la cortina de agregado. Otro método para alcanzar el mismo propósito es reducir la pendiente del tambor. Esta reducción de la pendiente (de un máximo de 6.0% a un mínimo de 2.5%) aumenta el tiempo que el agregado pasa en el tambor y por lo tanto provee más tiempo para completar el proceso de transferencia de calor. El agregado adicional retenido en el tambor debido a la baja pendiente también causa una cortina de material más densa mejorando el grado de transferencia de calor.

Normalmente, reducir la inclinación del tambor, no produce cambios en la tasa de producción de la planta. Una partícula individual de agregado tarda más en viajar a través del tambor cuando la inclinación se reduce, pero la producción real de la planta permanece igual en términos de toneladas por hora. La energía necesaria para hacer girar el tambor aumenta debido al peso extra que se debe mover para hacerla girar. El resultado neto, sin embargo, es una mejor cortina de agregado, una transferencia de calor más completa y la reducción en la temperatura de los gases de combustión en el tambor.

Varios fabricantes han desarrollado tambores mezcladores que cambian de diámetro a lo largo de su eje: el tambor tiene el mismo diámetro en los extremos y un diámetro menor en el centro. El cambio de diámetro permite más espacio para la combustión del quemador y obliga la formación de una cortina de agregado más densa en el centro. En este caso el diámetro reducido trabaja del mismo modo que lo haría la instalación de un anillo dentro del tambor. Una cortina más densa mejora la eficiencia del proceso de transferencia de calor. Sin embargo, la velocidad de los gases de combustión también aumenta debido a la reducción del diámetro, aumentando potencialmente la cantidad de arrastre de partículas al sistema de control de emisiones y posiblemente reduciendo los niveles de producción.

**d. Transferencia de calor.** Mientras que la temperatura de los gases de combustión se reduce a medida que los gases se mueven hacia abajo dentro del tambor, la temperatura del agregado aumenta a medida que viaja en la misma dirección (para una planta de flujo paralelo). El proceso de transferencia de calor se lleva a cabo de tres maneras: por radiación, por conducción y por convección. La radiación se da debido a la acción directa de la llama cuando el agregado pasa sobre o bajo esta. La conducción proviene del contacto entre el agregado y las paredes del tambor y la convección es la producida por la interacción entre los gases de la combustión y el agregado. El método principal de transferencia de calor es por convección.

El agregado entra al tambor a temperatura ambiente y el calor radiante de la llama lo alcanza, lo cual comienza el secado y calentado del agregado. A medida que el material se mueve hacia abajo en el tambor, su temperatura aumenta hasta que alcanza un punto (antes de llegar a la mitad del tambor) en el cual su temperatura permanece relativamente constante debido a que el calor de los gases de combustión está siendo usado para evaporar la humedad en el agregado. La porosidad del agregado también es un factor importante. La humedad en los materiales porosos tarda más en removerse de los poros internos. El agregado fino (arena) es comúnmente calentado más rápido y alcanza temperaturas más altas que el agregado grueso debido a su gran área superficial por kilogramo.

Una vez que toda la humedad ha sido removida, la temperatura del agregado comienza a subir nuevamente. Luego de que se inyecte el cemento asfáltico, las paletas mezcladoras se usan para levantar y botar la mezcla, exponiendo parcialmente el material a los gases de combustión. La mezcla alcanza la temperatura requerida de descarga a medida que se acerca al final del tambor. En resumen, la temperatura del agregado aumenta hasta que comienza el secado, la temperatura permanece relativamente constante hasta que el agregado se seca y luego la temperatura vuelve a crecer mientras el agregado continúa bajando en el tambor.

El contenido de humedad del agregado disminuye gradualmente en la parte frontal del tambor y luego disminuye más rápido a medida que alcanza la temperatura necesaria para vaporizar el agua. Si el tiempo que el agregado pasa en la parte central

del tambor es suficientemente largo, el contenido de humedad de la mezcla en la descarga puede ser reducido hasta 0.1%. El contenido de humedad de la mezcla en la descarga debe ser casi siempre menor de 0.5% e idealmente menor de 0.2%.

**3. Inyección del cemento asfáltico.** En algunas antiguas plantas de tambor de flujo paralelo, la tubería de abastecimiento del cemento asfáltico entra en la parte frontal del tambor, del lado del quemador. El diámetro de la tubería usada depende de la capacidad de la planta, con diámetros comunes entre 50mm y 100mm. No es común rociar el cemento asfáltico a través de una boquilla, en cambio es inyectado en el tambor por medio de un flujo continuo al final de la tubería. El punto de descarga real varía pero tiende a estar al centro o a unos dos tercios del tambor alejado de la llama.

Una ventaja de la introducción temprana del cemento asfáltico es la rápida captura de las partículas de polvo del agregado por el material ligante. Esta acción reduce la cantidad de arrastre de partículas por la encapsulación de los finos en el cemento asfáltico. No obstante, existen tres grandes desventajas: (a) el cemento asfáltico puede sufrir mayor endurecimiento por la exposición a los gases de combustión a altas temperaturas, (b) la producción de humo azul (emisiones visibles por la chimenea) por la volatilización de algunas sustancias de algunos cementos asfálticos puede aumentar, (c) puede ocurrir un incremento en el contenido de humedad de la mezcla debido a que el cemento asfáltico cubre las partículas de agregado antes de que la humedad del material sea completamente removida. Estas desventajas del sistema superan a las ventajas. Por esta razón no es una buena práctica inyectar el cemento asfáltico cerca del quemador dentro del tambor mezclador.

En la mayoría de plantas de tambor de flujo paralelo, el cemento asfáltico se inyecta por medio de una tubería de 100mm (4plg) de diámetro que entra en la parte final del tambor, como se muestra en la siguiente figura.

Ilustración 22. Procesos dentro de un tambor de flujo paralelo.



Hot Mix Asphalt Pavement, Brown, *et al.*

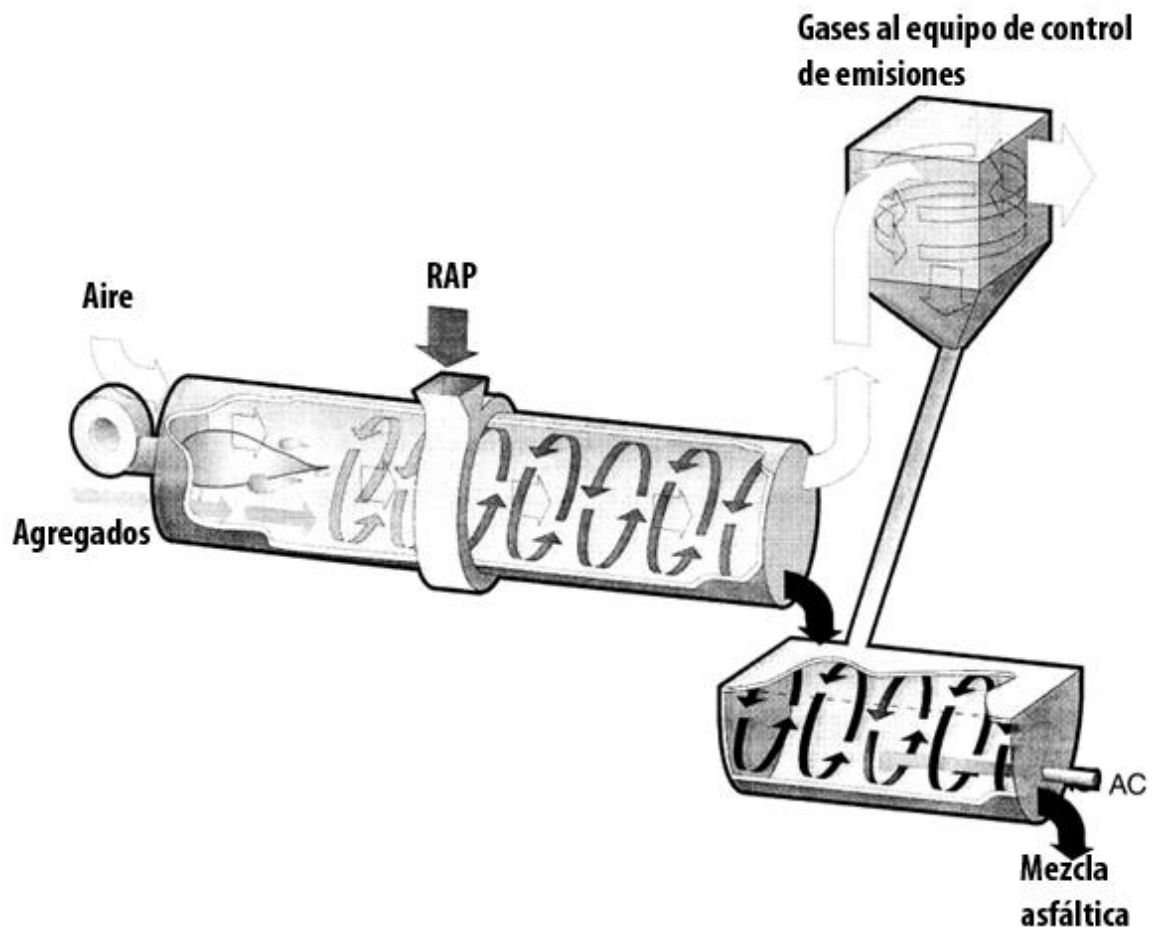
En muchos casos, la ubicación de la entrada del cemento asfáltico es en un punto a aproximadamente un 40% a un 30% de la longitud del tambor, medido desde el final (es decir entre un 60% y un 70% del lado del quemador). En este punto la poca cantidad de humedad en el agregado causa que el volumen de cemento asfáltico se expanda y ayuda a cubrir el agregado. En una planta de tambor, el cubrimiento de partículas más que el mezclado es el término más apropiada para evaluar el grado de combinación de la mezcla. Si el contenido de humedad del agregado es alto en el momento en el que se agrega el cemento asfáltico, la cobertura de las partículas puede retrasarse hasta que se remueva suficiente humedad.

Si el cemento asfáltico que se utiliza contiene materiales volátiles, dando como resultado emisiones visibles de humo azul, puede ser necesario mover la tubería del sistema de abastecimiento de cemento asfáltico más cerca del punto de descarga de la mezcla, alejado del quemador. Este cambio reducirá la exposición del cemento asfáltico a los gases de la combustión a altas temperaturas y disminuirá la generación de emisiones visibles de hidrocarburos. Si la cortina de agregado en el punto medio del tambor es adecuada, no será necesario mover la entrada de cemento asfáltico en el

tambor. Mover esta entrada puede disminuir la uniformidad de la cobertura de cemento asfáltico si se coloca muy cerca del punto de descarga de la mezcla.

En algunas plantas de tambor la tubería de inyección de cemento asfáltico se remueve por completo del tambor. El agregado se seca y se calienta en el tambor pero permanece sin cobertura asfáltica, luego este agregado se descarga en una unidad de mezclado de eje simple o de doble eje en donde se inyecta el cemento asfáltico.

Ilustración 23. Planta de tambor de flujo paralelo con mezclado exterior.



Hot Mix Asphalt Pavement, Brown, *et al.*

El mezclado de los materiales ocurre mientras el agregado y el cemento asfáltico se mueven a lo largo del mezclador rotatorio adicional. El material mezclado luego se deposita en un dispositivo de transporte que lo lleva al silo. El mezclador rotatorio adicional es básicamente un medio para mantener el cemento asfáltico alejado de las

altas temperaturas de los gases de combustión y por lo tanto evitar la generación de emisiones visibles.

Debido a la dificultad de cubrir completamente el agregado durante el corto período de tiempo que pasan por el mezclador rotatorio adicional, muchas plantas con estos dispositivos han sido modificadas por los productores de mezcla asfáltica poniendo el sistema de inyección de cemento asfáltico dentro del tambor a una corta distancia del final. Esto resulta en un tiempo de mezclado más largo y por lo tanto se obtiene una mejor cobertura asfáltica.

#### **4. Sistema de reciclado.**

**a. Sistema de alimentación único.** Debido a los problemas causados por el uso de sistemas de alimentación único, los sistemas de alimentación separados en los cuales el RAP se deposita en el tambor de forma separada del agregado nuevo son utilizados más comúnmente para producir mezclas recicladas. En las pocas plantas restantes, que utilizan un sistema simple (o único) para depositar tanto el agregado nuevo como el RAP en el quemador, se utilizan diversos métodos, solos o combinados, para proteger el material cubierto con asfalto del contacto directo con la llama y reducir la generación de emisiones visibles de hidrocarburos.

Un método es rociar agua sobre la combinación de agregados antes de que entre en el tambor. El grado de protección producido por el agua adicional en la superficie del agregado depende de la cantidad de humedad que ya estaba presente en el material reciclado, la cantidad de agua aplicada (comúnmente entre 1% y 4% en peso del agregado reciclado), y la posición del material reciclado en la cinta transportadora (sobre o bajo el agregado nuevo)

Otro método involucra el uso de un protector de calor para reducir el contacto del agregado combinado con la llama. Este dispositivo esparce la llama alrededor de la circunferencia del tambor y disminuye la concentración de calor en cualquier punto cercano a la llama. El desempeño del protector de calor depende de su ubicación dentro del tambor, la cantidad de RAP en la mezcla, la humedad del agregado nuevo y del reciclado, y la temperatura de descarga requerida. La eficiencia del protector de calor se

puede determinar por la cantidad de humo azul que se genera durante la operación de reciclaje.

**b. Sistemas de alimentación separados.** Con sistemas de alimentación separados el agregado nuevo se deposita en al final del tambor, del lado del quemador, de la manera tradicional. El RAP se deposita en una entrada distinta que se ubica cerca del centro del tambor.

Una variedad de diseños se utilizan para el sistema de entrada del RAP al tambor. Comúnmente, el tambor tiene una serie de puertos o colectores de entrada que permiten depositar el RAP dentro del tambor, mientras éste se encuentra en rotación. En el punto en el que el RAP entra en el tambor, un corto tramo de paletas es removido o configurado de tal modo que el RAP pueda ser fácilmente mezclado con el agregado nuevo. El RAP comienza a calentarse tan pronto como entra en el tambor. El agregado combinado es recogido por las paletas y el secado y calentado del material nuevo y del RAP continúa.

Cuando el RAP se descarga dentro del tambor en su punto medio, menos agregado nuevo se deposita en el tambor en el extremo del quemador, reduciendo la densidad de la cortina de agregado en el tramo anterior al ingreso del RAP y disminuyendo la cantidad de calor transferido de los gases de combustión al agregado nuevo. Por esta razón la temperatura de los gases en el momento en el que hacen contacto con el RAP es mayor, y hay una mayor posibilidad de quemar la cobertura de asfalto del RAP. Este problema aumenta en severidad a medida que la cantidad de RAP usado en la mezcla aumenta y la correspondiente cantidad de agregado nuevo disminuye. Los métodos para reducir la temperatura de los gases de combustión involucran el aumento de la densidad de la cortina de agregado nuevo antes del ingreso del RAP, así como el aumento de la temperatura del RAP antes de que haga contacto con el agregado nuevo calentado.

Normalmente, si un 20% o menos de RAP, se incorpora a la mezcla reciclada y se usa un sistema de alimentación separado, se producen mínimas emisiones de hidrocarburos, dependiendo de la configuración de la cortina de agregado y de la temperatura de descarga de la mezcla. A medida que el porcentaje de RAP aumenta,

aumenta también la posibilidad de problemas de emisiones. Cuando la cantidad de RAP usado excede el 50% en peso de la mezcla, la emisión de humo azul durante el proceso de reciclado puede volverse significativa. Una combinación de procedimientos, como los mencionados anteriormente, son necesarios para asegurar una transferencia de calor adecuado de los gases de combustión al agregado nuevo antes de que esos gases hagan contacto con el RAP.

Solo bajo condiciones de producción ideales y controladas puede ser posible incorporar más del 50% de RAP en una mezcla reciclada sin problemas mayores de emisiones visibles. Debido a la reducida producción y problemas con el control de emisiones que ocurren cuando se usan altos porcentajes de RAP en una mezcla reciclada, normalmente es una buena práctica limitar la cantidad de RAP procesado a través de un tambor con sistema de alimentación separado a aproximadamente 50% del peso total de agregado. En la mayoría de casos, la cantidad de RAP real utilizada es mucho menor que esta cantidad límite.

**5. Tasas de producción.** Las plantas de tambor de mezcla asfáltica en caliente se clasifican por la cantidad de toneladas de mezcla que son capaces de producir en una hora. La capacidad de producción usualmente está relacionada con la temperatura del agregado entrante, la temperatura de descarga de la mezcla, el calor específico del agregado, y el contenido de humedad promedio. Las capacidades de las plantas asfálticas también se ven afectadas por otras variables incluyendo el diámetro del tambor, el tipo de combustible, velocidad de los gases de combustión, capacidad del ventilador, cantidad de aire en el quemador, cantidad estimada de entrada de aire al sistema y condiciones atmosféricas. La granulometría del agregado puede ser un factor con mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso debido a que tales mezclas son más difíciles de calentar uniformemente que las mezclas que incorporan cantidades más balanceadas de agregado fino y agregado grueso.

Una de las variables que tiene de los mayores efectos en la tasa de producción de la planta es el contenido de humedad en el agregado fino y grueso. Comúnmente, el contenido de humedad en el agregado fino es mayor que el del agregado grueso. Por esta razón, el contenido de humedad promedio es función de la cantidad de humedad

en el agregado grueso y su porcentaje en la mezcla, más la cantidad de humedad en el agregado fino y su porcentaje en la mezcla.

A medida que el porcentaje de humedad en el agregado aumenta, la capacidad de producción del tambor mezclador de un diámetro dado disminuye. Si se tiene un contenido de humedad promedio constante, la tasa de producción aumenta a medida que el diámetro del tambor aumenta. La relación teórica entre contenido de humedad promedio, diámetro y longitud del tambor y tasa de producción de una planta de tambor se muestra en la siguiente tabla (para una temperatura de descarga de 132°C).

Tabla 8. Tabla de relación de dimensiones del tambor, humedad del agregado y producción.

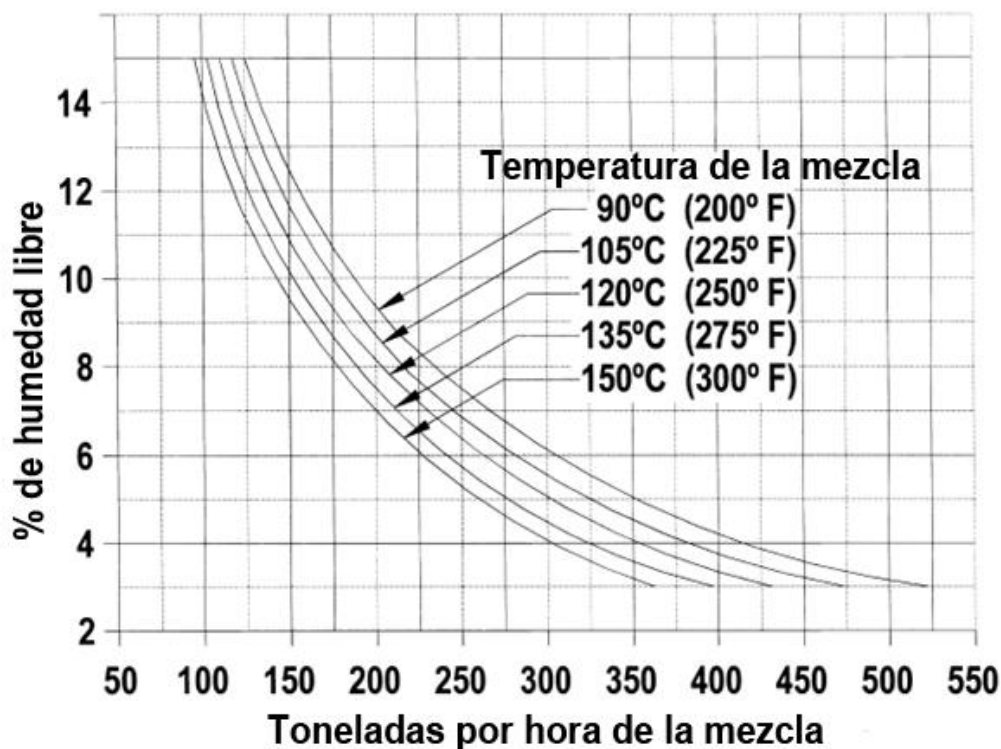
Diámetro y longitud del tambor (pies)	Capacidad (toneladas por hora) para humedad superficial removida (%)								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5 x 22	196	154	128	110	92	87	81	69	64
6 x 24	306	242	196	174	151	133	128	110	98
7 x 30	462	370	300	260	226	202	179	162	151
8 x 32	595	473	387	336	289	260	231	213	190
9 x 36	791	636	526	451	393	347	312	283	260
10 x 40	1052	837	693	595	520	473	416	375	347

Nota: La tasa de producción de cada planta varía de acuerdo a las indicaciones del fabricante.

La temperatura de descarga de la mezcla también afecta la tasa de producción de la planta: mientras la temperatura de descarga disminuya para un contenido de humedad dado y un tamaño de tambor constante, el volumen de la mezcla que puede ser producida en un período de tiempo aumenta. La siguiente gráfica es un ejemplo de la variación en la producción de una planta de acuerdo a la humedad y la temperatura de descarga para una planta en particular.

La tasa de producción de una planta de tambor también se ve afectada por el volumen y velocidad de los gases de combustión que son circulados por el sistema por el ventilador. A medida que el volumen y velocidad de los gases disminuye, la capacidad de producción del tambor mezclador se reduce.

Ilustración 24. Efecto de la humedad y la temperatura de descarga en la tasa de producción de una planta continua de tambor.



Astec, Inc.

Para aquellas plantas que operan con un sistema de alimentación separado, la tasa de producción de mezclas recicladas es también función del volumen de RAP depositado en el tambor. Si la cantidad de RAP sobrepasa el 50% del agregado total, la capacidad de la planta disminuye. Este decremento es causado por la falta de una cantidad adecuada de agregado nuevo en la parte superior del tambor para proveer la transferencia de calor requerida de los gases de combustión al agregado nuevo. Esto da como resultado una reducción en el calor transmitido del agregado nuevo al RAP.

Comúnmente se utiliza un índice que provee un medio para estimar el efecto de la introducción de RAP en el tambor en la tasa de producción de la planta. La producción real de una planta de tambor depende de una variedad de factores, incluyendo el volumen de los gases que atraviesan el sistema y la temperatura de estos gases. Además, varias de las plantas de producción continuas de fabricación reciente, como las plantas de contraflujo son, en general, más eficientes en el proceso de transferencia

de calor y por lo tanto pueden procesar cantidades superiores al 50% de RAP con menores efectos en la tasa de producción de la planta.

**6. Eficiencia de la planta.** Una planta debe funcionar a la tasa de producción más eficiente, independientemente de la demanda; debe detener la producción cuando los silos están llenos y reiniciarse cuando se requiera más mezcla. Existen dos criterios para determinar la eficiencia de una planta: (a) determinando la diferencia entre la temperatura de descarga de la mezcla y la temperatura de los gases de combustión en ese mismo punto, y (b) observando la mezcla asfáltica mientras se descarga.

**7. Temperatura de la mezcla y de la chimenea.** En una transferencia de calor perfecta dentro del tambor, la temperatura de la mezcla en el punto de descarga sería igual a la temperatura de los gases de combustión en ese mismo punto. Este punto de equilibrio significa que la transferencia de calor fue balanceada y que el tambor funcionaba con la mayor eficiencia posible de transferencia de calor. Bajo condiciones de operación normales, si la cortina de agregado dentro del tambor se forma de manera adecuada, la temperatura de los gases de combustión medida en la salida del tambor o antes de que los gases entren en el sistema de control de emisiones debe estar dentro de los 10°C de la temperatura de la mezcla. Por ejemplo si la temperatura de descarga de la mezcla es 140°C, la temperatura medida de los gases de combustión debe ser menos de 150°C. Esta pequeña diferencia implica que el tambor funciona eficientemente y que se utiliza la menor cantidad de combustible por tonelada producida.

Temperaturas de los gases de la combustión mayores de 10°C sobre la temperatura de descarga de la mezcla indica que el proceso de transferencia de calor dentro del tambor no es tan efectivo como podría ser, principalmente por la falta de una cortina de densidad uniforme a través de la sección transversal del tambor. Algunas veces existen diferencias de temperaturas de hasta 55°C, lo cual indica que la planta no está llevando un mantenimiento adecuado o no se opera de la manera correcta y el control de emisiones puede ser un problema. El grado de ineficiencia de operación está relacionado con la diferencia entre las dos temperaturas antes de que los gases de combustión entren en el sistema de control de emisiones.

Durante la producción de una mezcla de asfalto reciclado en un tambor de alimentación simple, la transferencia de calor entre los gases de combustión y el agregado nuevo y el RAP debe ser similar a la diferencia correspondiente a una mezcla compuesta sólo de agregado nuevo. Si se utilizan sistemas de alimentación separados, la diferencia entre las dos temperaturas puede ser mayor de 10°C, dependiendo de la proporción de RAP introducido al centro del punto de entrada. A medida que se aumenta el porcentaje de RAP, la diferencia de temperaturas aumenta. Cuando la mezcla se compone de 50% de RAP, la temperatura de los gases de combustión puede ser más de 40°C sobre la temperatura de descarga de la mezcla.

Por lo tanto, la eficiencia de la operación de calentado y secado, puede ser medida en parte observando la diferencia de temperaturas entre la mezcla al salir del tambor y la de los gases de combustión en la tubería. Debido a que usualmente, ambas temperaturas son medidas de manera continua y desplegadas en la consola de control de la planta, este método para monitorear el proceso de producción de la planta es fácil de implementar.

Altas temperaturas de los gases de combustión también pueden llevar a la corrosión prematura a la tubería que está entre el extremo de descarga del tambor y el colector primario. Esta corrosión es otra razón por la que la eficiencia de las operaciones de la planta necesitan ser monitoreadas y la temperatura de los gases de combustión en el momento en el que salen del tambor deben ser controladas.

**8. Monitoreo de la temperatura de descarga.** Otra forma de determinar la eficiencia de las plantas de tambor es observando la mezcla asfáltica mientras se descarga del tambor. La apariencia de la mezcla debe ser uniforme a lo ancho del dispositivo de descarga. El color de las partículas del agregado debe ser consistente y las partículas más finas de agregado deben estar bien distribuidas en toda la mezcla.

Si el combustible usado por el quemador está siendo quemado por completo, las partículas más gruesas del agregado pueden aparentar estar cubiertas por machas de color café oscuro en lugar de estar cubiertas por el espesor adecuado de la película asfáltica. Además, la adhesión del cemento asfáltico al agregado puede verse reducida

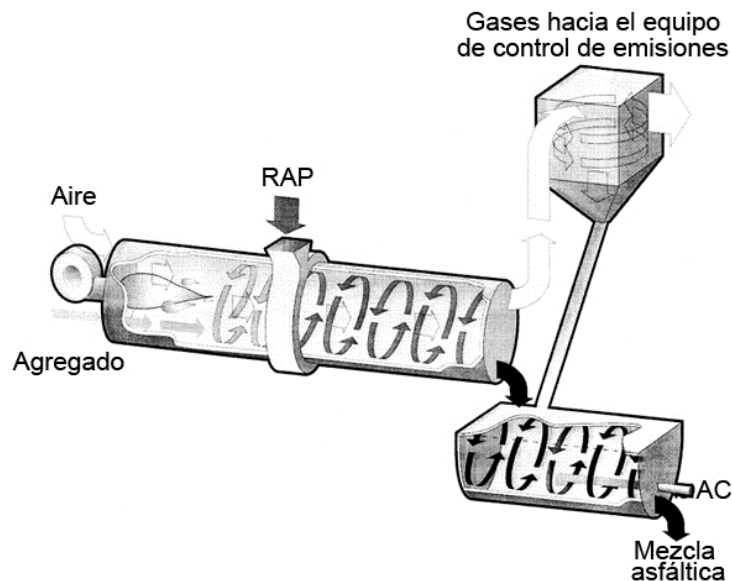
y la mezcla incrementará su tendencia al desvestimiento al ser sometida a ensayos por daños potenciales debido a la humedad.

## B. Plantas continuas de tambor de contraflujo

**1. Entrada del agregado.** Las plantas de contraflujo fueron desarrolladas en la década de 1930 y han reemplazado a las plantas de flujo paralelo en los últimos años como el principal tipo de plantas utilizadas por los contratistas para producir mezcla asfáltica en caliente. Las plantas de tambor de contraflujo consisten básicamente en un secador de contraflujo, como el utilizado en las plantas de bachadas para calentar y secar el agregado. El agregado se introduce en el tambor y se mueve a través de él en dirección contraria a la de los gases de combustión.

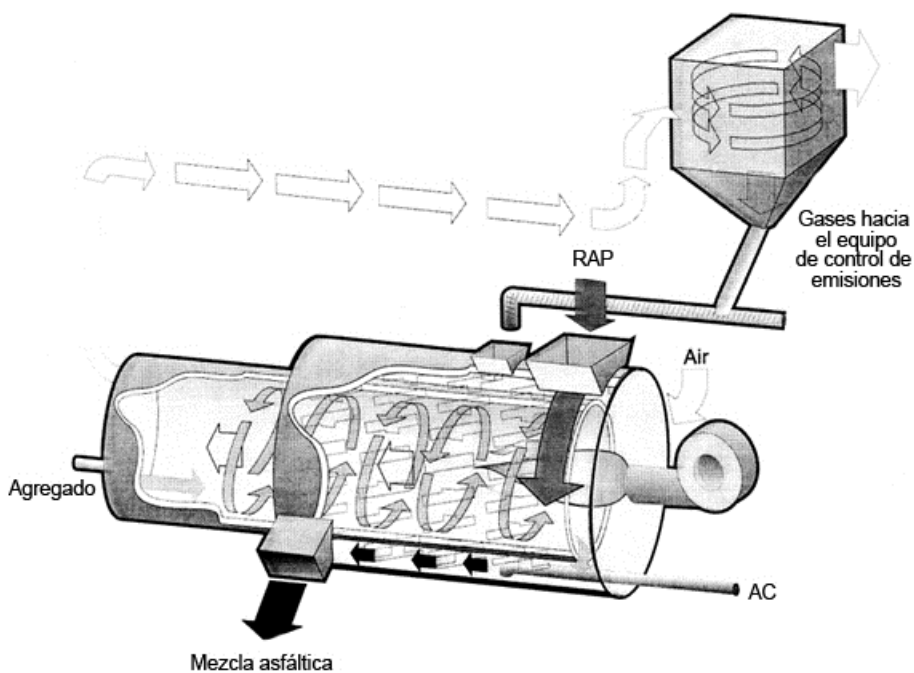
Existen dos tipos comunes de plantas de tambor de contraflujo. La primera posee la unidad de mezclado en una extensión al final de la sección de secado del tambor. La segunda, consiste en una planta de doble barril, la cual dispone de la unidad de mezclado envolviendo el tambor de secado.

Ilustración 25. Planta de tambor de contraflujo con la unidad de mezclado separada.



Hot Mix Asphalt Pavement, Brown, *et al.*

Ilustración 26. Plantas de contraflujo de doble barril.



Hot Mix Asphalt Pavement, Brown, *et al.*

**2. Secado y calentado.** El agregado entra a la planta de tambor de contraflujo desde la parte alta del tambor, de forma similar a la manera de entrar usada en el secador de una planta de bachadas. Normalmente, el agregado se deposita en un colector inclinado por medio de la banda de carga y se desliza por gravedad dentro del tambor. Una banda transportadora puede ser utilizada para depositar el agregado en el tambor.

En las plantas de contraflujo con la unidad de mezclado separada, la cabeza del quemador está metida en el tambor de secado. Sin embargo, el quemador, en sí, se localiza fuera del tambor, el combustible del quemador no se enciende hasta que alcanza la cabeza del quemador. Todo el aire necesario para que se lleve a cabo la combustión se obtiene a través del quemador. El aire adicional lo provee el ventilador a través de un tubo que rodea el chasis del quemador y protege el quemador de daños producidos por el agregado.

En las plantas de contraflujo de doble barril, la posición del quemador es similar a la del tambor de secado en las plantas con dispositivos separados pero el quemador es un quemador de "aire total".

Ilustración 27. Banda de carga. Planta de Asfalgua, S.A.



El proceso de calentar y secar el agregado se logra a medida que la combinación de agregado fino y grueso se mueve a través del secador por acción de las paletas rotatorias y la gravedad. El quemador se ubica en el extremo bajo (o extremo de descarga) del tambor y el agregado se mueve a hacia el quemador mientras se mueve en el tambor. Los gases de combustión del quemador se mueven hacia arriba en dirección opuesta al flujo de agregado. A medida que el agregado se dirige al quemador y se continúa calentando, la humedad se elimina de la superficie de las partículas de agregado. La humedad interna en las partículas de agregado también se elimina y el calentado del agregado continúa hasta que se llega a la temperatura de descarga requerida.

Si el RAP se añade al agregado nuevo, la temperatura del agregado nuevo se incrementa al nivel necesario para permitir la transferencia de calor adecuada entre el agregado nuevo sobrecalentado y el material reciclado a temperatura ambiente. Esta

práctica es similar al calentado adicional del agregado nuevo en una planta de bachadas cuando se utiliza RAP.

A diferencia de las plantas de tambor de flujo paralelo, no se añade el cemento asfáltico en la sección de secado del tambor en las plantas de contraflujo. La sección inicial del tambor es únicamente para secado. Ningún material, se añade en la parte superior del tambor.

### **3. Unidad de mezclado.**

**a. Unidad de mezclado separada.** Para las plantas de contraflujo en las que el quemador está incrustado en el tambor y el proceso de mezclado ocurre como una extensión de la operación del tambor de secado, el agregado seco y caliente pasa sobre un anillo de retención ubicado inmediatamente después de la cabeza del quemador. Una serie de aberturas se utilizan comúnmente para permitir que el agregado pase a la unidad de mezclado.

Cuando el agregado caliente ha entrado en la cámara de mezclado del tambor, el RAP, si se utiliza, se añade al agregado nuevo. Debido a que el RAP se introduce en tambor después del quemador, éste nunca queda expuesto a la llama del quemador. Por ésta razón, las emisiones de hidrocarburos no son un problema, como sí lo son para las plantas de flujo paralelo. La transferencia de calor del agregado nuevo comienza tan pronto como los dos materiales se juntan en el extremo superior de la unidad de mezclado. La humedad contenida en el RAP se extrae de la unidad de mezclado por medio de un ventilador. Toda emisión de hidrocarburos liberada por el RAP también se extrae de la unidad de mezclado por el ventilador, pero estos humos se queman al pasar por el área del quemador. Por estas razones la generación de humo azul en una planta de contraflujo es mínima.

Poco tiempo después de que el RAP se ha introducido en la porción de mezclado del tambor, cualquier otro aditivo necesario en la mezcla asfáltica, incluyendo finos del colector de emisiones y aditivos minerales, pueden ser introducidos. Debido a que el flujo de aire en la unidad de mezclado es mínimo, no existe la posibilidad de que los aditivos relativamente pesados sean transportados por el ventilador del tambor. La

mezcla del RAP, aditivos y finos del colector de emisiones, y el agregado nuevo comienza tan pronto como los materiales son introducidos en la cámara de mezclado.

Al poco tiempo después de que el agregado ha iniciado el mezclado, el cemento asfáltico se introduce para producir mezcla asfáltica. La cobertura del agregado con cemento asfáltico se lleva a cabo mientras los materiales son agitados juntos y se mueven hacia abajo hasta el punto de descarga de la unidad de mezclado. Dependiendo del ángulo del tambor, así como en el número y tipo de paletas en la cámara de mezclado, el tiempo de mezcla en este tipo de tambores de contraflujo, comúnmente se encuentra en un rango de entre 45 y 60 segundos. Al completarse el proceso de mezcla, la mezcla asfáltica se deposita en un colector de descarga y es transportada hasta el silo.

**b. Tambores de doble barril.** Con un sistema de doble barril, la cámara de mezclado se encuentra envolviendo el tambor de secado. El agregado seco y caliente se descarga en el interior del tambor al cilindro no rotatorio exterior. Esto ocurre en el extremo más bajo de la unidad de mezclado.

Poco después de que el agregado nuevo entra en la cámara de mezclado, el RAP, si es que se utiliza, se añade al tambor externo. Este material cae en este tambor y se mezcla rápidamente con el agregado sobrecalentado. La transferencia de calor del agregado nuevo al RAP comienza de manera inmediata. De la misma forma que en las plantas de unidades separadas, toda la humedad del RAP y todas las emisiones de hidrocarburos que se desarrollan durante el proceso de calentado son devueltas al secador por el ventilador. La humedad se lleva al equipo de control de emisiones, de forma similar que la humedad liberada por el agregado nuevo durante el proceso de calentado y secado. Las emisiones de hidrocarburo del RAP son incineradas por el quemador.

Cuando el RAP ingresa en el tambor externo, cualquier aditivo necesario en la mezcla se deposita en el área de mezclado. Los finos provenientes del colector de filtros también se introducen en el tambor externo en la misma posición. Debido a que el flujo de aire en el área entre el tambor interno y el tambor externo es mínimo, no hay

tendencia de los materiales añadidos de ser extraídos de la cámara de mezclado hacia la sección de secado de agregados de la planta de tambor.

Ilustración 28. Tambor de doble barril. Planta de Padegua, S.A.



Cuando todo el agregado se encuentra en el tambor externo, el cemento asfáltico se añade a la mezcla. En la mayoría de las plantas de doble barril, los materiales cementantes o ligantes pueden ser añadidos en dos ubicaciones distintas. Si el RAP no se añade a la mezcla, el cemento asfáltico suele introducirse tan rápido como sea posible (poco tiempo después de que el agregado nuevo, los finos del control de emisiones y los aditivos han sido depositados en el tambor exterior). Si se utiliza RAP en la mezcla, la adición del material cementante o ligante se suele retrasar para que se pueda dar la transferencia de calor entre el agregado nuevo sobrecalentado y el material reciclado. El material ligante entra al tambor externo ligeramente más adelante.

El mezclado toma lugar por una serie de paletas unidas al exterior del tambor interno (el tambor de secado). Las paletas están diseñadas con el ángulo apropiado para que la combinación de agregado nuevo, finos del control de emisiones, aditivos, RAP y el cemento asfáltico sean transportados hacia arriba mientras viajan en el espacio entre el tambor interior (en rotación) y el tambor exterior (estático). El mezclado ocurre únicamente en la cuarta parte inferior de la circunferencia del tambor exterior; la

mezcla nunca pasa sobre el tambor interior. Aparte de la transferencia de calor que toma lugar por el contacto directo entre el agregado nuevo y los demás componentes de la mezcla, un calentamiento adicional ocurre cuando todos los materiales hacen contacto con el tambor interior por radiación de calor del tambor de secado al tambor exterior.

Para conseguir un mezclado eficiente, se debe mantener una distancia apropiada entre las paletas del tambor interior y el interior del tambor exterior. Los extremos de las paletas y el revestimiento del tambor exterior deben ser revisados por desgaste periódicamente para asegurar que el material no se esté acumulando en el tambor exterior y asegurar un mezclado adecuado. Dependiendo del tamaño y la capacidad de producción de la planta de doble barril, el mezclado de todos los materiales comúnmente ocurre en menos de 60 segundos. Al completarse el proceso de mezclado, la mezcla se deposita en una banda de descarga para su transporte al silo.

## **IX. SILOS DE CARGA Y ALMACENAMIENTO Y TÉCNICAS DE CARGA DE CAMIONES**

El propósito principal de un silo en las plantas de batchadas es permitir a la planta continuar la producción de material cuando los camiones no están disponibles para recibir directamente del molino de mezclado. Para las plantas de tambor (de flujo o contraflujo), el propósito principal de un silo es convertir la operación de mezclado continuo en un proceso discontinuo de carga de camiones y almacenar temporalmente la mezcla hasta que el siguiente vehículo de carga esté disponible.

### **A. Tipos y diseños de silos**

**1. Silos de carga contra silos de almacenamiento.** Durante la operación normal de una planta asfáltica, un silo puede usarse para almacenar la mezcla asfáltica entre la llegada de camiones a la planta. En este caso, el silo es comúnmente llamado silo de carga. Si el silo se utiliza para almacenar la mezcla durante períodos más largos de tiempo (varias horas o más), se denomina silo de almacenamiento. Un silo de almacenamiento puede ser fácilmente usado como un silo de carga, pero un silo de carga puede no ser útil como silo de almacenamiento.

Existen varias diferencias entre los dos tipos de silos. Primero, la capacidad de un silo de almacenamiento es típicamente mayor que la de un silo de carga. Segundo, un silo de carga usualmente está térmicamente aislado pero no se calienta, mientras que un silo de almacenamiento además de ser aislado se calienta. Tercero, las compuertas en la parte de abajo del silo de almacenamiento son calentadas y selladas cuando la mezcla se mantendrá dentro del silo durante un largo período de tiempo; esto se hace para reducir la cantidad de aire que puede pasar a través de las compuertas hacia la mezcla. Por otro lado, la parte de abajo de los silos de carga no suele ser calentada o sellada.

La función principal de ambos tipos de silos es similar. Sólo la capacidad de almacenar mezcla por períodos de tiempo más largo sin cambios significativos en las propiedades de la mezcla distingue un tipo de silo del otro. Independientemente del tipo de silo utilizado, la mezcla almacenada en el silo y depositada en el camión debe mantener los mismos requerimientos y especificaciones que la mezcla recién salida del

molino de mezclado (en las plantas de bachadas) o del tambor de mezclado (en las plantas de tambor).

**2. Aislamiento y calentado.** Como se mencionó, la mayoría de los silos son térmicamente aislados; esto se hace para reducir la pérdida de calor de la mezcla mientras permanece temporalmente en el silo. El tipo de material aislante usado y su espesor varía entre los fabricantes de silos.

El cono en la base de un silo de carga es usualmente calentado para prevenir que la mezcla se pegue y acumule en las paredes del cono. El calor puede ser suministrado por un sistema eléctrico o de aceite caliente. En algunos casos, las paredes verticales del silo también se calientan para que la mezcla pueda mantener su temperatura deseada por un largo período de tiempo. Si el silo se utilizará únicamente con un silo de carga y se vacía al final de cada día de producción, el calentar las paredes del silo es prácticamente innecesario.

**3. Almacenamiento.** El almacenamiento de mezcla asfáltica en el silo durante una noche o durante un fin de semana puede conseguirse de manera satisfactoria previniendo el endurecimiento y la pérdida de temperatura de la mezcla. Un silo bien aislado siempre es necesario, pero calentar las paredes verticales puede ser innecesario. Las mezclas almacenadas durante varios días en silo equipados con sistemas de calentamiento en el cono han mostrado sólo una oxidación y pérdida de calor mínima. La cantidad de endurecimiento que ocurre está relacionada con la cantidad de mezcla en el silo. Una gran la cantidad de mezcla en un silo lleno se envejecerá menos que una cantidad pequeña de mezcla en un silo casi vacío. La pérdida de calor en la mezcla almacenada dependerá de otros factores tales como la temperatura inicial de la mezcla, la granulometría del material y las condiciones ambientales.

Las mezclas asfálticas (a excepción de las mezclas con alto contenido de agregado grueso) pueden ser almacenadas por un período de hasta una semana si se mantiene en un silo hermético y calentado. Un sistema de gas inerte puede ser utilizado para eliminar el oxígeno del silo aunque es poco común. La compuerta en la parte de abajo del silo, así como las aberturas en la parte superior del silo debe estar bien selladas

para prevenir el ingreso de aire al silo y a través de la mezcla. El silo también debe estar completamente calentado y bien aislado. Las mezclas con altos contenidos de agregado grueso pueden tender a experimentar segregación si se almacenan durante un largo período de tiempo.

Si la mezcla se almacenará en un silo por más de dos o tres días, como por ejemplo un fin de semana o debido a imprevistos climáticos, es recomendable remover una pequeña cantidad de mezcla (2 o 3 toneladas) cada día o cada dos días durante el período de almacenamiento, para asegurar que la mezcla al fondo del cono no se endurezca y se vuelva imposible de descargar. Si la mezcla se deja sin perturbarse durante algunos días se puede formar un tapón de mezcla fría. Cuando las compuertas de descarga se abran no fluirá la mezcla debido a la formación del tapón por el endurecimiento de la parte inferior de la mezcla almacenada. La mezcla removida del silo según este procedimiento puede ser colocada junto con el RAP para un reciclaje posterior.

A pesar de que la mezcla puede ser almacenada durante períodos relativamente largos de tiempo, raramente es necesario hacerlo con las plantas continuas. La mayoría de los silos son utilizados como silos de carga o, eventualmente, para almacenamiento de la mezcla durante la noche. La mezcla almacenada por más de dos o tres días en un silo, debe someterse a pruebas para asegurar que cumple con las mismas especificaciones y requerimientos que la mezcla a entregar en el sitio de pavimentación. Estas pruebas deben incluir la medida de la temperatura de la mezcla al descargarse del silo y las propiedades del cemento asfáltico recuperado de la mezcla. Mientras las mezclas cumplan las especificaciones, la cantidad de tiempo que el material puede mantenerse en el silo no tiene porqué restringirse. Una restricción innecesaria incrementa el costo de la mezcla y reduce la eficiencia de la producción de mezcla.

Si se almacena temporalmente una mezcla de textura abierta, se debe poner especial atención a mantener la temperatura de almacenamiento suficientemente baja para que el cemento asfáltico no fluya y se desprenda del agregado, acumulándose en la parte baja del silo en las compuertas de descarga. En general no es recomendable mantener una mezcla asfáltica de textura abierta en silos durante la noche.

## B. Transporte de la mezcla al silo.

Una gran variedad de dispositivos de transporte se pueden usar para llevar la mezcla asfáltica del colector de descarga del tambor de mezclado o de la tolva bajo el molino de mezclado de la planta de bachadas al silo. El equipo más comúnmente usado es la banda transportadora de láminas de arrastre.

Ilustración 29. Banda transportadora de láminas de arrastre. Planta de Padegua, S.A.



En este sistema una serie de paletas continuas conectadas por una cadena de arrastre transporta la mezcla hacia arriba a través de una rampa metálica. La cantidad de mezcla que puede ser llevada por las láminas de arrastre dependen del espaciamiento entre las láminas, la profundidad de las paletas, el ancho de las paletas y la inclinación de la rampa, así como del tamaño y velocidad de la cadena de arrastre y la potencia del motor que provee la energía. En algunas bandas transportadoras de

láminas de arrastre la velocidad de la banda puede variarse para cambiar la capacidad del dispositivo con el fin de alcanzar los objetivos de producción de la planta.

Una banda transportadora también puede usarse para llevar la mezcla al silo. Esta banda es básicamente igual a las bandas usadas para llevar el agregado al tambor de mezclado o al secador, a diferencia de que es capaz de soportar las altas temperaturas de la mezcla caliente. Una banda transportadora no puede operar en un ángulo tan pronunciado como una banda de láminas de arrastre.

El tipo de equipo utilizado para transportar la mezcla al silo raras veces es un factor influyente en la uniformidad de la mezcla depositada en el silo. El factor importante es la forma en que la mezcla sale del medio de transporte y se deposita a en la parte de arriba del silo.

### **C. Geometría del silo.**

Existen diversas formas de silos. La mayoría de silos utilizados son circulares, pero pueden ser óvalos, elípticos, rectangulares o cuadrados. La forma del silo puede afectar la cantidad de segregación que ocurre durante la carga y la descarga del silo. Los silos circulares presentan menor segregación que las demás formas de silos. Para los silos circulares la probabilidad de segregación con mezclas que contienen agregado grueso de gran tamaño aumenta a medida que el diámetro del silo aumenta. No obstante, la geometría del silo no es un factor tan importante en la segregación, la forma en que se opera el silo (cómo se carga y descarga) tiene un efecto mucho más importante en la uniformidad de la mezcla y la magnitud de la segregación.

**1. Cono del silo.** La parte de abajo del silo de carga tiene una forma similar a un embudo o un cono. Algunas veces el cono es visible y otras está cubierto por una lámina metálica, como una extensión de las paredes laterales del silo. El ángulo del cono varía entre los fabricantes, pero usualmente se encuentra entre 55° y 70°. El ángulo debe ser suficientemente inclinado y las aberturas de las compuertas deben tener las dimensiones necesarias para asegurar que las partículas más grandes del agregado no se acumulen en el centro del cono mientras la mezcla está siendo descargada, causando segregación.

La mayoría de silos de carga tienen indicadores de volumen bajo que advierten al operador de la planta que el nivel de la mezcla se ha disminuido a un punto cercano a la parte superior del cono. Mantener el volumen de mezcla sobre este nivel mínimo reducirá la segregación.

## **D. Entrega de la mezcla.**

La segregación ocurre con mayor frecuencia en las mezclas que contienen una proporción significativa de agregado grueso. La separación real de las partículas grandes y pequeñas ocurre cuando la mezcla asfáltica se amontona de forma cónica dentro del silo y las partículas más grandes ruedan hacia los lados del silo, juntándose en el borde inferior. La segregación también puede ocurrir cuando toda la mezcla que se descarga del dispositivo de transporte se lanza hacia un lado del silo, permitiendo a las partículas más grandes que rueden a través del silo hacia el lado opuesto.

Recientemente, se ha identificado que la segregación produce enfriamiento diferencial en la mezcla.

**1. Segregación en la parte superior del silo.** La segregación en los pavimentos suele ser el resultado de las operaciones en la parte superior del silo.

En algunos silos, una serie de particiones se utiliza para cambiar la dirección del material. Otros silos utilizan un sistema de separación para dividir la mezcla mientras se deposita en el silo, logrando que una porción de la mezcla se deposite de un lado y la otra porción del otro lado. En general, usar un medio de separación y distribución puede reducir la tendencia a la segregación en el pavimento pero no siempre la elimina. El uso de un sistema de dosificación generalmente provee un mejor medio para resolver el problema de la segregación.

Con un sistema como éste, una tolva de almacenamiento temporal se utiliza en la parte de arriba del silo para mantener la mezcla por unos momentos. Esta tolva colecta el flujo continuo de la mezcla y cuando está casi llena, las compuertas de la tolva de

abren para depositar la mezcla en el silo como una sola masa. Esta masa cae sobre la parte de abajo del silo vacío o sobre la mezcla que ya está depositada en el silo. En el momento del contacto, la mezcla se dispersa en todas las direcciones de manera uniforme, minimizando la segregación. Transportar la mezcla asfáltica en masa siempre minimizará la segregación.

El sistema de dosificación funciona bien a menos que el silo esté casi lleno. En este caso, la mezcla cae desde una altura baja al ser liberada por la tolva. Cuando la mezcla que cae golpea la mezcla depositada en el silo que está bajo la tolva, no tiene la suficiente cantidad de movimiento para esparcirse hacia los lados y se amontona formando un cono. Esta acumulación puede ser el inicio de un problema de segregación a medida que la cantidad de mezcla depositada aumenta. La mayoría de los silos están equipados con un sistema que indica al operador de la planta que el silo está llegando al máximo de su capacidad para que detenga el flujo de mezcla que entra al silo.

El sistema de dosificación puede no ayudar a prevenir la segregación si la mezcla se entrega de manera inadecuada. En algunos casos, el medio de transporte deposita la mezcla en un sólo lado de la tolva. Esto causa que las partículas de agregado grueso rueden por la tolva, produciendo la segregación incluso antes de que llegue al silo.

El sistema de dosificación regularmente está equipado con un dispositivo que abre las compuertas de descarga cada cierto intervalo de tiempo. La cantidad de tiempo entre cada abertura de las compuertas puede variarse para alcanzar la tasa de producción requerida por la planta. Si se encuentra configurada de la manera correcta, el dispositivo abrirá las compuertas antes de que la tolva esté muy llena y las cerrará antes de que la tolva se vacíe por completo. Esto permite que el dispositivo de transporte funcione de manera continua a la vez que evita que la mezcla caiga directamente sobre el silo.

La capacidad de la tolva está relacionada con la capacidad de producción de la planta y se encuentra regularmente en el rango de las 2 a las 5 toneladas. Un camión transportador típico puede llevar entre 14 y 20 toneladas. Por esto, dependiendo de la capacidad de tanto la tolva como de los camiones, tomará entre 3 y 11 descargas de la tolva para alcanzar la cantidad de mezcla necesaria para llenar un camión.

**2. Segregación longitudinal.** La segregación longitudinal (o hacia los lados) ocurrirá en uno de los lados del carril a pavimentar si las partículas de agregado grueso ruedan hacia un lado del silo durante su almacenamiento. Dependiendo de la forma en que la mezcla se deposite en el silo, las partículas más gruesas de agregado en la mezcla pueden acumularse en un lado del silo. Las partículas más grandes viajarán hacia abajo hasta detenerse por la pared del silo y por lo tanto terminarán acumuladas en uno de los lados del camión transportador, que al verter la mezcla en el pavimento quedará, de igual forma, de un lado del carril.

## **E. Carga de los camiones.**

Tan importante como depositar la mezcla en masa en el centro del silo es hacerlo de la misma forma en el camión transportador en varias ubicaciones del recipiente de carga con el fin de prevenir la segregación.

La mayoría de los silos tienen solo una abertura de descarga equipada con una compuerta simple o doble. Las compuertas en la parte de abajo del cono deben abrirse rápido y por completo para que el flujo de agregado comience de forma inmediata y sin restricciones. Una vez que el peso adecuado ha sido descargado en el camión, las compuertas deben cerrarse rápidamente. Para silos equipados con compuertas dobles, el cierre generalmente no da ningún problema. Sin embargo, en los silos con compuerta simple es posible que la mezcla sea tirada a un lado del camión mientras la compuerta se cierra. Para minimizar este problema, es importante cerrar la compuerta simple lo más rápido posible.

Algunos silos están equipados con dos aberturas de descarga separadas. Estos silos son capaces de distribuir mejor la mezcla sobre una longitud mayor del camión y por lo tanto, reduce la segregación que puede ocurrir en el momento de la carga de camiones. Las compuertas del silo pueden ser paralelas o perpendiculares a la ubicación del camión. Ambos sistemas pueden depositar la mezcla en el camión sin segregación siempre que la cantidad adecuada de mezcla se deposite en el lugar correcto del camión.

Ilustración 30. Zona de carga de camiones. Planta de Padegua, S.A.



La segregación puede eliminarse moviendo la mezcla asfáltica en masa y reduciendo la distancia que el agregado grueso puede rodar. Las múltiples descargas de la mezcla en el camión son muy beneficiosas para mantener la mezcla uniforme y para reducir la segregación. Algunas plantas están equipadas con sistemas automáticos de descarga del silo. El número de cada camión se ingresa en la computadora y cada uno de ellos se carga a intervalos predeterminados con las cantidades deseadas de mezcla por cada descarga del silo. Con un sistema manual, el operador de descarga del silo debe ser capaz de determinar el tiempo que toma la descarga de cierta cantidad de mezcla en cada intervalo para cargar cada camión. Esto puede hacerse cronometrando la descarga de cierta cantidad de mezcla y comparar ese tiempo con el peso descargado. Debido a que los camiones vienen en una variedad de tamaños, el tiempo por descarga y el número de descargas por camión varían de un camión a otro. Con práctica, el operador deberá ser capaz de determinar de forma adecuada, el tiempo necesario para depositar la cantidad correcta de mezcla en cada camión. Esta cantidad

debe ser confirmada visualmente observando la altura de la mezcla que se acumula en el camión a mientras se mantiene la descarga del silo.

Ilustración 31. Consola para control del silo.



Cada tipo de camión debe cargarse de manera particular. Un camión de volteo nunca se debe cargar por una sola descarga de mezcla al centro del camión. Son necesarias varias descargas de mezcla: la primera ubicada cerca de la parte frontal del camión y la segunda en la parte posterior. La tercera descarga debe hacerse al centro de las primeras dos descargas.

Un camión de volteo nunca se debe cargar moviendo el camión lentamente mientras el silo descarga la mezcla. Esto causará que las partículas de agregado grueso se acumulen en la parte posterior del camión provocando segregación.

## **X. SISTEMA DE CONTROL DE EMISIONES**

La fuente principal de emisiones en las plantas asfálticas de tambor o de bachadas, es el arrastre de finos durante el proceso de secado y calentado del agregado. Existen tres tipos principales de sistemas de control de emisiones: los colectores secos, los colectores húmedos y las cámaras de filtros. Cuando se utiliza, el colector en seco se coloca enfrente de alguno de los otros dos sistemas de control de emisiones (el colector húmedo o la cámara de filtros) y se le llama colector principal; el colector húmedo o la cámara de filtros son llamados colectores secundarios, y es en donde pasan los gases de la combustión luego de pasar por el colector primario. El colector primario se utiliza para remover las partículas de finos más grandes de los gases de la combustión y para reducir la carga en el colector secundario, el cual se utiliza para capturar las partículas más finas.

La eficiencia del sistema de control de emisiones está relacionada con la cantidad de partículas que son capturadas por el equipo en relación con la cantidad entrante. Si a una cámara de filtros ingresan 1,000 partículas por minuto y, por ejemplo, 990 de ellas son atrapados en la cámara de filtros, el sistema de colección tiene una eficiencia del 99%. La eficiencia se determina, en parte, observando la cantidad de partículas que son emitidas por la chimenea. Esto se hace verificando la opacidad de los gases que salen a través de ella.

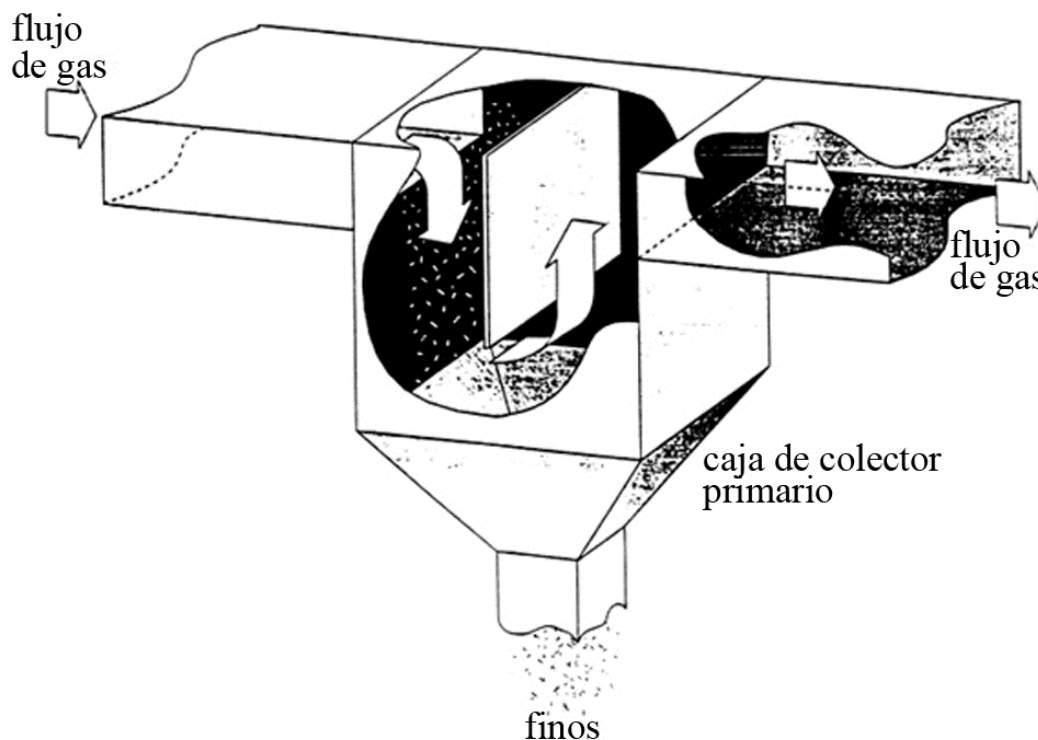
### **A. Colector seco**

Los colectores secos no se utilizan o no son necesarios en todas las plantas asfálticas. Si se utilizan, pueden ser de varios tipos, usados solos o combinados. El colector seco original era un dispositivo que forzaba a los gases de combustión a formar remolinos dentro del colector. El polvo en los gases se removía por fuerza centrífuga, siendo llevados a los lados del colector mientras los gases experimentaban un movimiento circular.

La mayoría de los colectores secos usados actualmente poseen una cámara de expansión combinada con una cámara de filtros. La cámara de expansión o caja de separación tiene una sección transversal más grande que la tubería por la cual pasan los gases de la combustión entre el secador o el tambor de mezclado y el colector

secundario. El colector primario con cámara de expansión se muestra en la siguiente figura.

Ilustración 32. Cámara de expansión o caja de separación.



Hot Mix Asphalt Pavement, Brown, *et al.*

## B. Colector húmedo

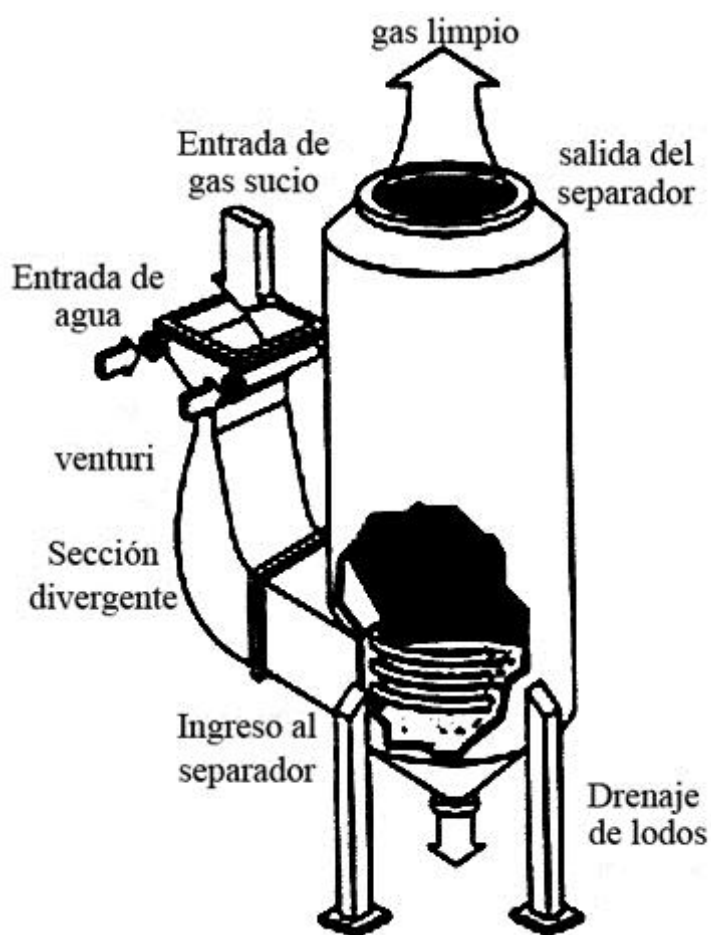
Luego de moverse a través del colector primario (si se utiliza), los gases de combustión en las plantas equipadas con un colector húmedo son forzados a pasar a través de una abertura estrecha o venturi. Cuando el flujo de gas se concentra en un área pequeña, se rocía con agua desde distintos puntos y los finos se humedecen. Los gases de combustión y los finos húmedos viajan a través de la sección de separación del colector.

Los gases de combustión se envían alrededor de la circunferencia de la unidad en un movimiento circular. Los finos húmedos, que han incrementado su peso debido a la humedad son removidos del gas por la fuerza centrífuga y caen al fondo del colector. El

gas limpio continúa viajando en remolino hasta que alcanza el final y sale a través de la chimenea.

Dependiendo del tamaño de las partículas de finos en los gases de combustión, la eficiencia de un colector húmedo es comúnmente entre un 90% y un 99% para remover las partículas de los gases. Además de estar relacionado con el tamaño y la cantidad de finos presentes, la eficiencia es función de la limpieza y el volumen del agua utilizada para rociar los gases.

Ilustración 33. Esquema de un colector húmedo.



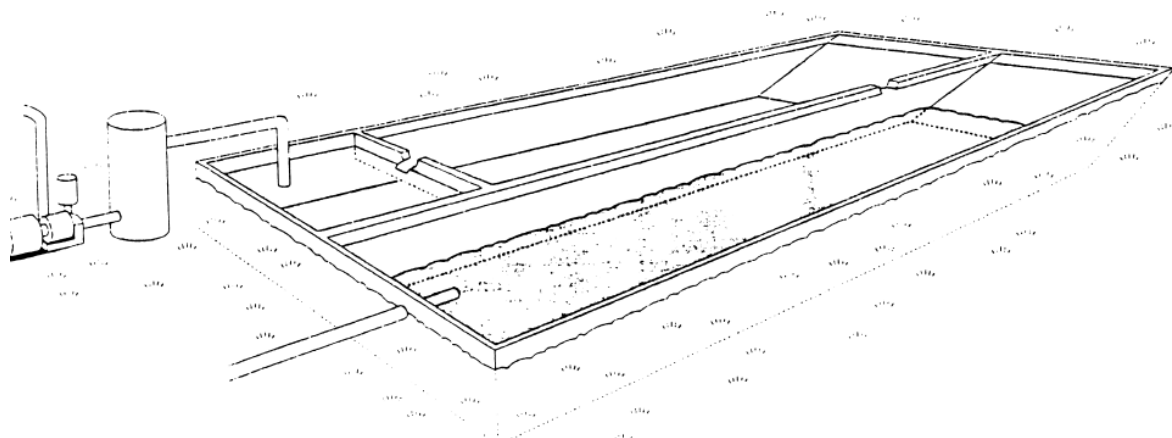
Hot Mix Asphalt Pavement, Brown, *et al.*

La limpieza del agua y el estado de las boquillas están relacionadas a su vez con el tamaño del estanque de sedimentación para recoger el agua descargada por el colector. El agua y los finos, en forma de lodo, se envían desde el fondo del colector, a través de una tubería, a la primera sección del estanque, en donde las partículas más

pesadas se sedimentan. El agua, más limpia, en la parte superior del estanque en esta primera sección pasa hacia la siguiente sección a través de una toma en uno de los lados del estanque. Las sedimentaciones adicionales de los finos ocurren en las siguientes secciones del estanque.

La eficiencia del proceso de sedimentación está directamente relacionada con el tamaño del estanque de sedimentación: mientras más grande y más profundo es el estanque, hay más agua disponible y hay más tiempo para que los finos se separen y sedimenten antes de que el agua sea bombeada del estanque hacia el colector húmedo. Es importante mantener limpia el agua que se bombea desde el estanque hacia el colector húmedo. Eventualmente es necesario reemplazarla y hacer una limpieza de los sedimentos del tanque.

Ilustración 34. Estanque de desecho del colector húmedo.



Hot Mix Asphalt Pavement, Brown, *et al.*

Los finos que se obtienen del colector húmedo no pueden ser utilizados en la mezcla asfáltica. Por lo tanto la granulometría de la mezcla producida por la planta no es la misma que la granulometría del agregado que entra a la planta (por pérdida de finos). En la mayoría de los casos en los que el arrastre de finos no es grande, el cambio de granulometría es pequeño pero si el colector húmedo captura un volumen grande de finos, habrá un cambio significativo en la granulometría de la mezcla, particularmente en las partículas finas de menor tamaño.

Debido a los inconvenientes de espacio, disposición y transporte de los lodos, este sistema es poco utilizado en Guatemala.

## C. Cámara de filtros

Una razón por la cual las cámaras de filtros se han convertido en la opción preferida como sistema de limpieza en la industria de las plantas asfálticas es que, además de cumplir con los códigos de contaminación, también proporcionan ventajas económicas sobre los colectores húmedos. Al devolver el polvo a la mezcla en vez de desperdiciarlo, como en el caso de los colectores húmedos, las cámaras de filtros pueden utilizar mejor el agregado. Las cámaras de filtros también requieren menos potencia que los colectores húmedos con sistema venturi. La flexibilidad de no depender de una fuente de agua y de un estanque de sedimentación es otra ventaja significativa, debido a la reducción de los costos de acarreo en camiones y al aumento de la transportabilidad del equipo.

Las limitaciones de las cámaras de filtros se ven principalmente en términos de restricciones operativas. Por ejemplo, los filtros de fibra aramida (fibra sintética de kevlar y twaron) están limitados a una temperatura máxima de servicio de 200°C. A pesar de que los colectores húmedos no tienen esas limitaciones, las altas temperaturas de los gases de escape no son consistentes con el funcionamiento eficiente de la planta. Las cámaras de filtros generalmente deben funcionar a temperaturas sobre 100°C para evitar la condensación, otro problema potencial. La condensación de la humedad puede causar una acumulación de barro en los filtros y paredes de la cámara. Esto resulta en filtros saturados y taponamiento del equipo de eliminación de polvo. La contaminación de los filtros por vapores de hidrocarburos condensados también puede producir la saturación. Los gases de combustión o, en sistemas de flujo paralelo, los vapores del asfalto pueden ser la fuente de tales problemas. La contaminación por hidrocarburos también puede causar un incendio en la cámara de filtros resultando en la pérdida de los filtros y destrucción de la cámara. Las cámaras de filtros no son útiles para eliminar los contaminantes gaseosos de los gases de escape de la planta.

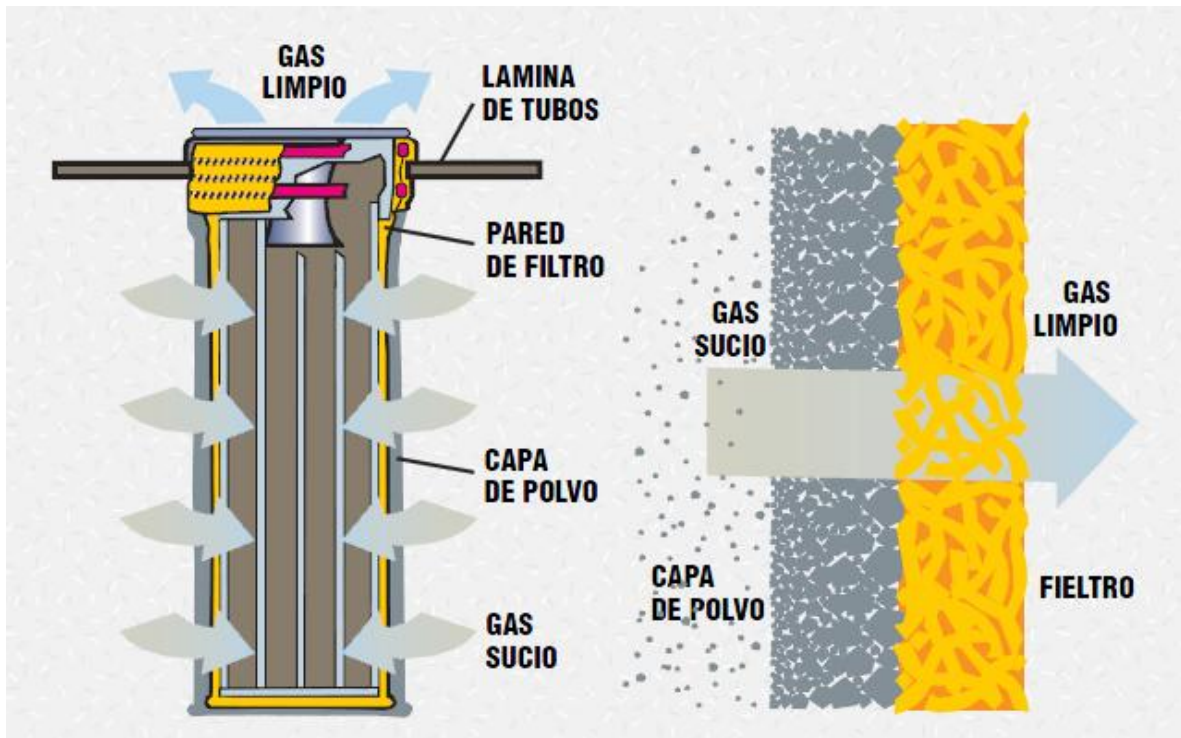
Ilustración 35. Cámara de filtros, vista exterior.



**1. Tecnología.** Una cámara de filtros típica para una aplicación de mezcla asfáltica consta de un sistema de filtros de tela encerrados en una estructura de acero. La tecnología básica de una cámara de filtros es muy simple. La corriente de escape pasa por el filtro de tela antes de escapar hacia la atmósfera. Una serie de filtros conforman el filtro de tela. La corriente de escape entra a los filtros a través de sus paredes de fieltro, el polvo no puede pasar por las paredes de fieltro y se acumula en el exterior de los filtros. A medida que la acumulación de polvo aumenta, se hace necesaria la limpieza periódica de los filtros. (Swanson, 2002)

La acumulación de polvo en los filtros se conoce como la capa de polvo y es de vital importancia en el funcionamiento de la cámara de filtros. La capa de polvo es realmente el filtro operante, puesto que el fieltro de los filtros, sin una capa de polvo, sólo puede atrapar partículas relativamente grandes. Una cámara de filtros con una buena capa de polvo puede recoger partículas tan pequeñas como de 1,0 micrón con un 99,99% de eficacia general e incluso puede recoger algunas partículas menores a un micrón. (Swanson, 2002)

Ilustración 36. Función de filtrado de la capa de polvo.



Boletín Técnico T-139 Astec Inc.

Normalmente, las partículas que no pasan el tamiz 200, se recogen en la superficie del fieltro y se acumulan allí. Las partículas más pequeñas que logran pasar por el fieltro, se hacen pasar por otro hasta que, eventualmente ya no pueden pasar. A medida que las partículas se acumulan en la superficie exterior del fieltro, el tamaño efectivo de la abertura disminuye y las partículas que quedan atrapadas son cada vez más pequeñas. A pesar de que la capa de polvo es normalmente de menos de 0.16 cm de espesor, esto representa una gran acumulación de partículas. Se deben acumular unas 14.5 partículas del diámetro correspondiente a las aberturas del tamiz 200 para lograr un espesor de 0.16 cm. Pero, se debe acumular un promedio de 1,600 partículas de 1 micrón para lograr una capa de 0.16 cm de espesor. Puesto que la capa de polvo se compone siempre de una mezcla de tamaños de partículas, es obvio que hay muchos niveles de partículas en la capa (las partículas más pequeñas amontonadas sobre las más grandes). Los filtros de la cámara sin una capa de polvo adecuada dejarán pasar las partículas más pequeñas y, por lo tanto, fallarán en el cumplimiento de los requisitos vigentes para las emisiones. (Swanson, 2002)

Los filtros están apoyados en jaulas de alambre, insertadas en cada filtro por arriba, que impiden que los filtros se aplasten bajo la presión. La construcción abierta de las jaulas de alambre permite que el aire pase fácilmente y proporciona un apoyo interno para los filtros. El conjunto de filtro y jaula está apoyado por una lámina de tubos. La lámina de tubos separa la cámara de aire sucio de la de aire limpio, de manera que la única forma que el aire puede entrar a la cámara de aire limpio es a través de los filtros. Las partículas menores a una micra de diámetro generalmente no son bien capturadas por el filtro usado en aplicaciones de mezcla asfáltica. Por lo tanto, el humo, que se compone de partículas del orden de 0.3 micrones de diámetro, normalmente no quedará atrapado en una cámara de filtros. (Swanson, 2002)

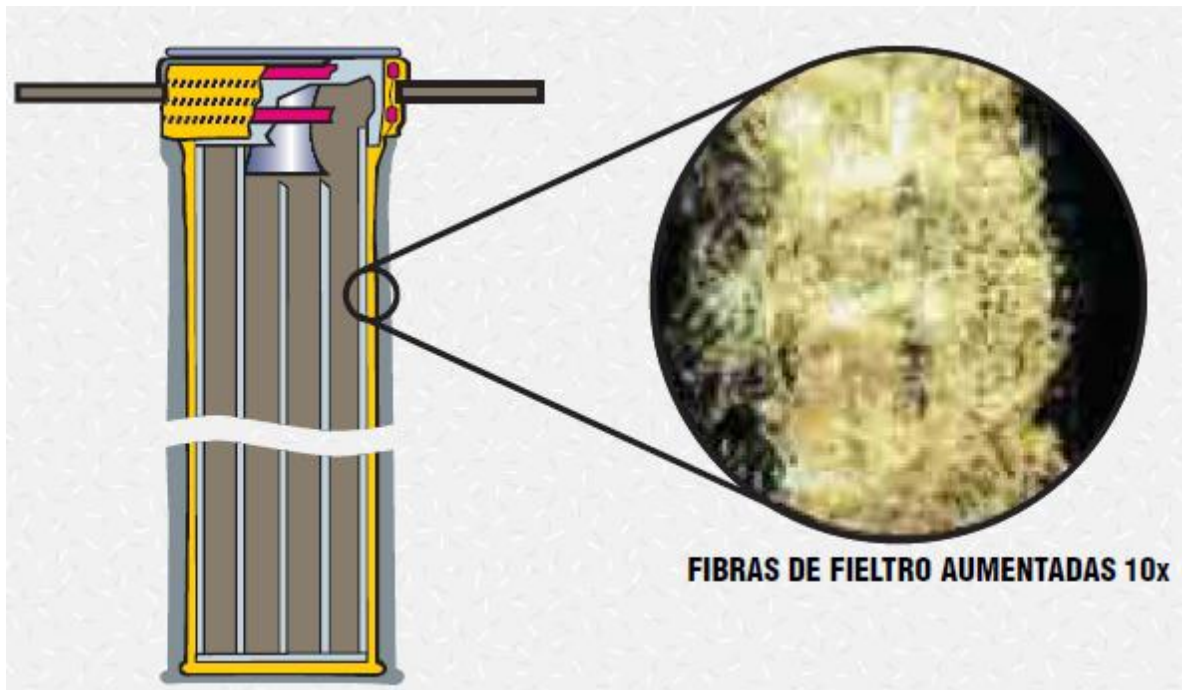
Ilustración 37. Lámina de tubos vacía.



Boletín Técnico T-139 Astec Inc.

**2. Materiales.** El material del filtro es la principal consideración en la selección de material para la cámara de filtros. El material de filtrado estándar en la industria es el fieltro de fibra aramida.

Ilustración 38. Fibras de aramida.



Boletín Técnico T-139 Astec Inc.

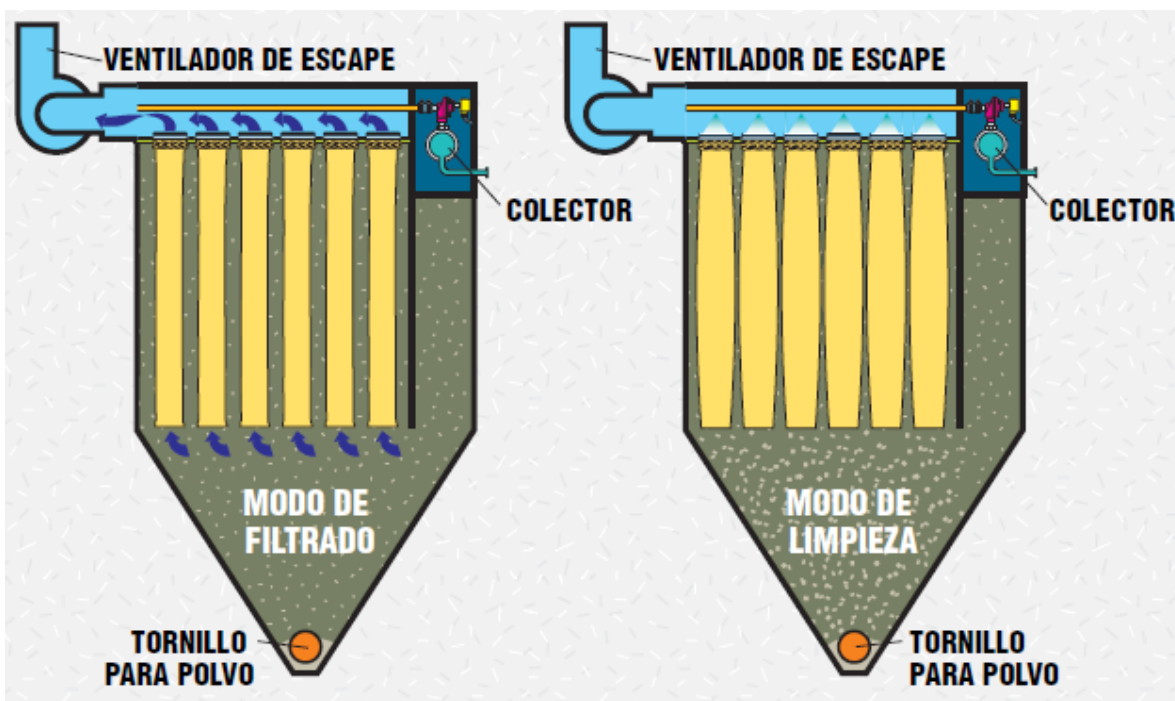
Generalmente se otorga poca consideración al material de la jaula. Las jaulas comúnmente se fabrican de alambre de acero galvanizado. Básicamente, todo lo que la jaula hace es evitar que el filtro se comprima bajo presión. Cualquier jaula que satisfaga esa función es aceptable. Algunas veces, cuando se usan ciertos materiales especiales, puede ser necesario el uso de una jaula de alambre de calibre 20 para limitar la flexión y falla por fatiga del fieltro. Se debe usar un alambre de acero inoxidable cuando se anticipen problemas de deterioro por agentes químicos. La placa y los miembros estructurales que se usan en las cámaras de filtros de plantas de asfalto casi siempre se fabrican de acero galvanizado tipo estructural. Se usa un recubrimiento interno de pintura epóxica para proporcionar una resistencia a la corrosión. Esto puede ser importante puesto que los combustibles, incluso el No. 2 (diesel), a menudo contienen azufre. El azufre en el combustible puede producir la formación de ácido sulfúrico en la cámara de filtros. (Swanson, 2002)

La geometría básica o la forma de la cámara de filtros es muy simple y directa: es una caja. Más allá de eso, las dimensiones específicas se determinan basadas en los factores de rendimiento como las velocidades del gas, los requisitos de eliminación del

polvo, las longitudes y cantidades de filtros, y las dimensiones y pesos de transporte permitidos. (Swanson, 2002)

**3. Sistemas de limpieza.** El sistema de limpieza más usado en cámaras de filtros de plantas asfálticas es el de limpieza por impulsos de aire. También hay unos cuantos sistemas más antiguos de limpieza por inversión de corriente de aire aún en servicio. La ventaja del sistema de limpieza por impulsos de aire comparado con el sistema por inversión de corriente de aire es que no es necesario interrumpir el funcionamiento de los filtros para la limpieza. (Swanson, 2002)

Ilustración 39. Sistema de limpieza por impulsos de aire.



Boletín Técnico T-139 Astec Inc.

Otro sistema, que rara vez se usa en la industria del asfalto, es el sistema agitador. Independientemente del sistema que se utilice, es importante que la capa de polvo en todos los filtros se mantenga lo más uniforme posible. La acción básica del sistema de limpieza por impulsos de aire es dirigir una ráfaga de aire comprimido en cada filtro por su extremo superior abierto. Esta ráfaga o impulso de aire es admitida por la abertura y el cierre sincronizados de una válvula de solenoide. El solenoide admite aire en las tuberías, una de las cuales está colocada sobre cada hilera de filtros. Las tuberías

tienen agujeros pequeños colocados sobre y dirigidos hacia las partes superiores de los filtros. Hay un venturi incorporado en la parte superior de cada jaula. (Swanson, 2002)

El venturi se utiliza para incorporar más aire al aire inyectado, de manera que en la limpieza se use un volumen más grande de aire que el suministrado sólo por el sistema de aire comprimido. Un punto pulido dentro de la parte superior de un venturi indica que el agujero de la tubería para ese filtro no está correctamente posicionado. Si el impulso no se dirige derecho a la abertura del venturi, el filtro no se limpiará correctamente. En cada impulso, se descarga aire de cada una de las tuberías. Generalmente se limpian dos hileras simultáneamente. El impacto y la contracorriente momentánea producidos por el impulso de aire comprimido desprenden parte del polvo de los filtros, permitiendo que éste caiga en la tolva. Debido a que el funcionamiento de los filtros no se interrumpe para la limpieza, el polvo descargado debe caer en sentido opuesto al del chorro de gas emergente. Por esta razón, el sistema de limpieza por impulsos de aire no funciona bien sin la tendencia del polvo fino a adherirse. (Swanson, 2002)

Es importante para un operador de planta saber esto, ya que demasiado esfuerzo para lograr una buena limpieza tiende a dispersar las partículas aglomeradas en partículas individuales, que luego pueden entrar fácilmente en el gas de escape emergente y volver a depositarse en el filtro. (Swanson, 2002)

En general, es mejor limpiar frecuentemente con el menor esfuerzo posible. Si una cámara de filtros no está sobrecargada y no presenta problemas de otro tipo, una presión de aire comprimido de 60 a 70 psi (4.2 a 4.92 kg/cm<sup>2</sup>) será adecuada. Las presiones en la gama de 90 a 100 psi (6.3 a 7 kg/cm<sup>2</sup>) producirán más problemas que soluciones. A pesar de que las altas presiones pueden ayudar al operador a mantener la planta funcionando a una alta capacidad, es muy probable que produzcan la migración del polvo y dañen los filtros al desgastarlos cerca de sus partes superiores. También es posible rasgar las costuras en la parte inferior de los filtros. (Swanson, 2002)

Tanto el exceso de limpieza como la falta de limpieza pueden causar problemas. El operador debe saber que es necesario desarrollar y mantener una capa de polvo en los filtros para proporcionar una buena capacidad de filtrado. (Swanson, 2002)

**4. Sistemas de eliminación de finos.** Los finos descargados de los filtros por el sistema de limpieza caen en la tolva. Luego son retirados de la tolva por uno o más sistemas de transporte. (Swanson, 2002)

Los diseños *Superpave* requieren desechar parte de los finos usados previamente en la mezcla. Por estas razones, los sistemas de eliminación de finos normalmente se combinan con sistemas de retorno o desecho de finos. Estos sistemas se pueden configurar para controlar la cantidad de finos desechados o para controlar la cantidad de finos retornados al proceso. El procedimiento más común, es devolver todos los finos al proceso por medio de un ducto transportador directo sin medición. En los países que han implementado el *Superpave*, es evidente que esta práctica está a punto de desaparecer puesto que las mezclas *Superpave* tienden a tener un contenido relativamente bajo de finos, para estos casos es esencial un medio eficaz de desechar los finos y controlar el retorno de finos al proceso. Otro método de eliminación de finos usado frecuentemente es transportarlos neumáticamente hasta un silo de almacenamiento. Una vez en el silo, el polvo puede retornarse al proceso mediante un control de caudal volumétrico o de masa, o bien se puede desechar. (Swanson, 2002)

Este método satisface los requisitos para el funcionamiento de la cámara de filtros y del *Superpave*. Para la utilización exitosa de la cámara de filtros, no importa mucho qué tipo de sistema de eliminación de polvo se utilice. Sin embargo, para el funcionamiento de la cámara de filtros es importante contar con un medio efectivo para controlar las fugas de aire en los puntos de descarga de polvo. Las esclusas de aire giratorias o las válvulas basculantes dobles son buenas opciones para esta función. Los materiales altamente abrasivos pueden hacer que una esclusa de aire giratoria se convierta en un problema de mantenimiento. Cuando se usa una esclusa de aire giratoria con materiales muy abrasivos (es decir, materiales muy gruesos), se debe tener un cuidado especial para mantener la esclusa de aire en buenas condiciones para evitar fugas excesivas de aire hacia el sistema. La fuga de aire reduce la capacidad de producción de la planta y la temperatura de la cámara de filtros. (Swanson, 2002)

**5. Funcionamiento.** El manejo de la cámara de filtros no debe ser el enfoque principal en las operaciones de una planta asfáltica. La cámara de filtros debe

requerir la menor atención posible, de manera que el personal se pueda concentrar en la producción de la mezcla. Algunas veces, el no entender claramente los factores que afectan el rendimiento de la planta termina produciendo una inversión de esfuerzo excesiva en la cámara de filtros. Durante la puesta en marcha, la cámara de filtros se debe precalentar antes de empezar a alimentar agregado al secador. Esto es cierto incluso cuando se arranca después de una parada intermedia, en cuyo caso el giro del tambor no se reiniciará hasta que la cámara de filtros se haya precalentado. Si no se ejecuta un precalentamiento adecuado, la humedad se condensará en las superficies metálicas de la cámara de filtros y probablemente también en los filtros mismos. Además de formar barro, que rápidamente taponará los filtros, la humedad promoverá el deterioro químico de los filtros, las jaulas y la estructura de la cámara de filtros. Los compuestos químicos hallados típicamente en los gases de escape de una planta asfáltica, aunque en bajas concentraciones, pueden formar ácidos al hacer contacto con el agua. El dióxido de azufre es un buen ejemplo, ya que forma ácido sulfúrico, que ataca al acero y a los filtros. Frecuentemente hay azufre presente en los gases de escape de una planta, ya que la mayoría de los aceites combustibles contienen al menos un pequeño porcentaje de azufre, lo cual hace que el precalentamiento sea esencial. El precalentamiento adecuado puede variar de acuerdo con la situación. El principio básico a seguir es que mientras más fría esté la cámara de filtros antes del arranque, más largo debe ser el período de precalentamiento. Se debe recordar que el propósito del precalentamiento es evitar la condensación en las superficies de la cámara de filtros. Esto significa que no es suficiente dejar que el gas de escape alcance la temperatura normal de funcionamiento. Los filtros y las estructuras de placa necesitan calentarse. Una condición de precalentamiento típica es una temperatura de 177°C en la cámara de filtros durante 20 minutos, al arrancarla por primera vez en el día. El frío o las condiciones ambientales húmedas pueden requerir períodos más largos de precalentamiento. Al volver a arrancar cuando la cámara de filtros todavía está caliente se requerirá menos tiempo de precalentamiento. Un precalentamiento más corto también es aceptable en condiciones secas y calientes, inclusive si se trata del primer arranque. La temperatura de funcionamiento puede variar bastante a medida que varían las condiciones. La gama de temperatura común para la entrada de gas de la cámara de filtros es de 116°C - 121°C. Esta gama proporciona buena eficiencia y generalmente mantiene los filtros secos. Sin embargo, la temperatura ambiente fría, el ritmo de producción, el porcentaje de RAP incluido en la mezcla, el contenido de humedad del

agregado, la granulometría de la mezcla, etc. harán que la temperatura de los gases de escape cambie. El operador debe saber cómo las distintas condiciones afectan la temperatura de funcionamiento y qué hacer al respecto. También debe saber cómo los problemas de la planta pueden afectar a la temperatura de los gases de escape. (Swanson, 2002)

**6. Mantenimiento.** Cuando se aplican y se manejan adecuadamente, las cámaras de filtros requieren un mantenimiento relativamente bajo. El mantenimiento periódico consiste en mantener lubricados los cojinetes de los tornillos transportadores de la tolva. En el caso de los bujes de hierro duro, que son típicos, la lubricación con grasa se debe hacer cuatro veces al día. Las correas del ventilador se deben revisar en busca de desgaste y se debe compensar la tensión (para configuraciones de dos motores de mando) periódicamente. La potencia de los motores se compensa mediante el tensado correcto de las correas. Las correas no deben rechinar al arrancar el ventilador de escape. Las válvulas de solenoide para el sistema de limpieza por impulsos de aire no requieren atención, salvo el eventual reemplazo de las válvulas averiadas. Se debe vaciar el agua del acumulador de aire comprimido diariamente. Es posible que se necesite un vaciado más frecuente durante los períodos fríos o de alta humedad. Los acoplamientos flexibles entre las válvulas de solenoide y las tuberías se deben revisar en busca de deterioro por lo menos dos veces al año. La cámara de aire limpio se debe revisar dos veces al año en busca de corrosión y acumulación de polvo. La tolva se debe revisar diariamente en busca de acumulación de polvo, que puede ser causada por la humedad. Se debe hacer una inspección visual diaria al humo del tubo de descarga. Cualquier emisión visible, que no sea humedad, se debe investigar. (Swanson, 2002)

La siguiente información se debe anotar en un libro de registro de operaciones:

- Presión diferencial
- Temperatura de entrada
- Temperatura de salida

Con un registro de datos, las desviaciones de lo normal se pueden ver rápidamente y se deben investigar con prontitud.

## **XI. CERTIFICACIÓN DE PLANTAS ASFÁLTICAS DE MEZCLA EN CALIENTE**

### **A. Antecedentes**

El asfalto es el ligante más utilizado en los pavimentos de Guatemala, en donde se consumieron 457,380 barriles americanos (19,209,960 galones) en 2009. Debido a la importancia de su utilización, y a la proliferación de Plantas de asfalto en los últimos años –actualmente se cree que existen en el país, poco más de 40 Plantas-, es necesario promover que los procedimientos de fabricación avalen una buena elaboración del producto.

Una forma de hacerlo es a través de la implementación de un procedimiento de certificación, que estaría culminado con la emisión del certificado en donde se haga constar que la Planta que fue sometida al procedimiento, fue inspeccionada y que cumple con los requerimientos de producción previamente definidos.

En junio de 2008 se fundó la *Asociación de Productores de mezcla asfáltica en caliente –ASOASFALTOS-*, asociación que tiene como objeto primordial el desarrollo de actividades de carácter educativo, de investigación y promoción en materia de asfaltos, por lo tanto, promueve y vela por la calidad y el uso de las ventajas de la mezcla asfáltica en caliente.

El procedimiento de Certificación de Plantas de Asfalto que se propone, considera muy importante esta Asociación, y se plantea que sea a través de esta entidad que se realice el procedimiento propuesto debido a la inexistencia de leyes o requerimientos legales que designen a una entidad estatal o municipal para emitir la certificación. Sin embargo, a largo plazo, la certificación que se propone debería ser un requisito legal, emitido por alguna organización del gobierno.

### **B. Objetivo**

El objetivo básico de la certificación es lograr que el Contratista desarrolle los procesos, las inspecciones y los ensayos de laboratorio que aseguren que toda la mezcla cumpla las especificaciones, -fabricando la mezcla uniforme y disminuyendo la

dispersión de los resultados-, en vez de verificar si cumple las especificaciones, después de elaborada. Este concepto da al Contratista más control sobre sus operaciones.

La premisa fundamental del procedimiento de certificación es que el contratista y el productor de la mezcla asfáltica en caliente, son responsables del producto, desde el diseño a la aceptación final.

### **C. Procedimiento para la certificación**

El procedimiento para la certificación de la Planta será realizado por una empresa certificadora o consultor certificador debidamente aprobado por la Asociación.

El contratista o productor que requiera la certificación deberá solicitarla a la Asociación, quien previamente analizará la solicitud del contratista y/o productor, y luego, si procede, solicitará a la empresa certificadora o consultor certificador que realice el procedimiento de certificación.

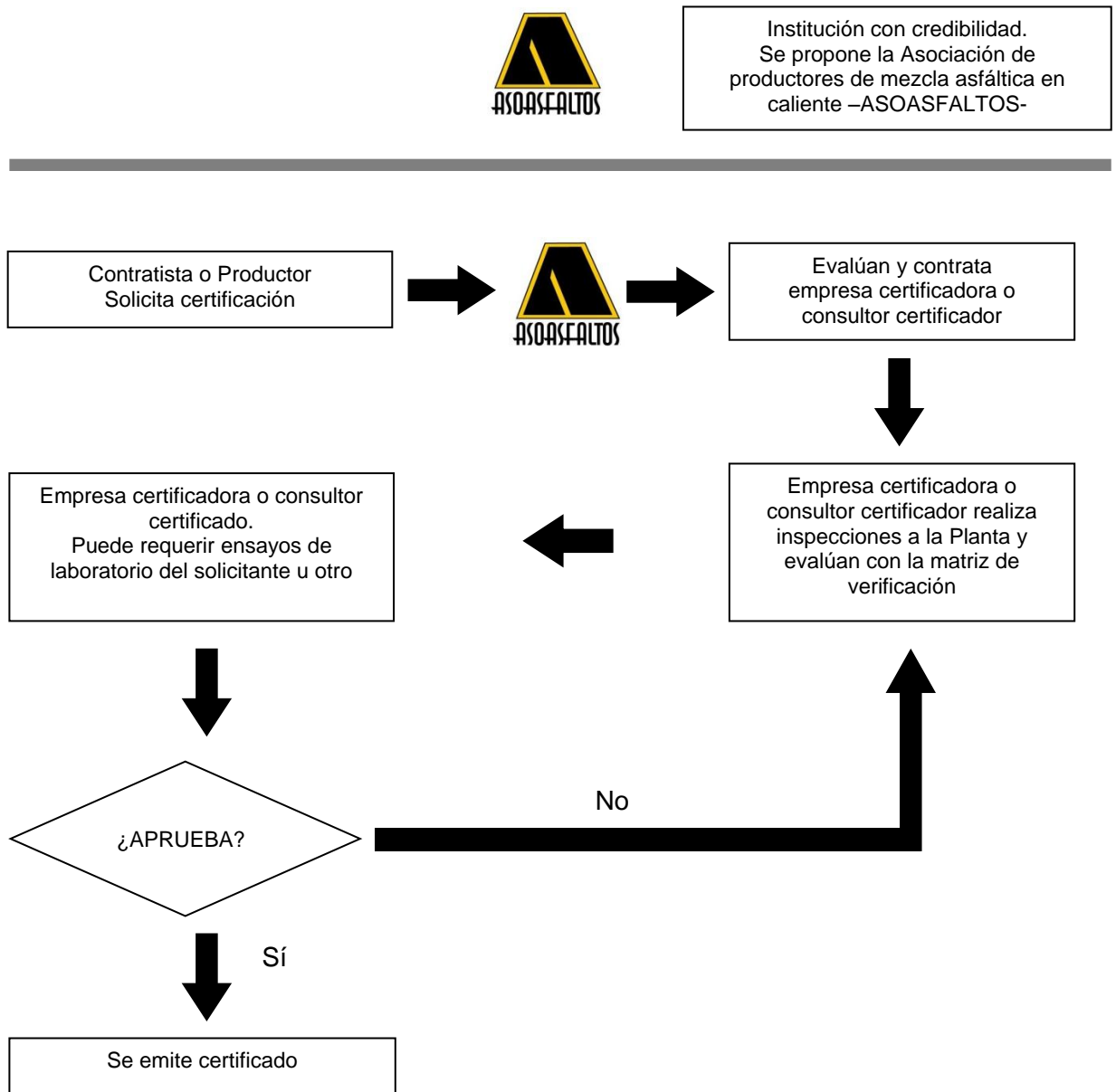
El procedimiento de certificación estará basado en realizar inspecciones a la Planta para comprobar los puntos contenidos en la *matriz de verificación para la certificación de Plantas de Asfalto*.

Esta matriz consiste en una serie de puntos que comprenden el proceso de producción. Básicamente es una lista de verificación con decisiones SI o NO, y con observaciones.

Al final de las inspecciones, la empresa certificadora o consultor certificador hará un informe, con base en la matriz de verificación, en donde recomendará la emisión del certificado o establecerá un tiempo prudencial para implementar sus recomendaciones. Después de transcurrido el tiempo indicado en el informe de certificación, el contratista o productor podrá solicitar de nuevo las inspecciones correspondientes.

Un certificado de conformidad tendrá una duración de un (1) año, será extendido al propietario de la planta y puede ser expuesto en el salón de control de la planta.

Esta certificación será efectiva desde la fecha de su emisión y estará sujeta a verificaciones periódicas. Cualquier planta que sea modificada significativamente, relocalizada o vendida, debe ser certificada nuevamente.



El certificado deberá contener la siguiente información:

- Contenido del texto principal: Esta Planta ha sido inspeccionada y certificada que cumple con los requerimientos de la Asociación de Productores de Asfalto de Guatemala.
- Nombre de la Empresa, lugar y fecha, marca, tipo de Planta, modelo, capacidad de producción, número de certificación, firma del Consultor o Empresa Certificadora y firma del Presidente de Asoasfaltos.

Ilustración 40. Ejemplo de certificado.

<p>ASOCIACIÓN DE PRODUCTORES DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE</p> 		
<p><b>Planta de Asfalto Certificada</b></p>		
<p>Ésta Planta de Asfalto ha sido inspeccionada y está certificada. Esta certificación será efectiva desde la fecha de su emisión hasta un año después.</p>		
<p>_____ Marca</p>	<p>_____ Empresa propietaria</p>	<p>ASOASFALTOS-001-09 _____ No. de Certificación</p>
<p>_____ Tipo</p>	<p>_____ Lugar</p>	<p>_____ Por Empresa Certificadora</p>
<p>_____ Modelo No.</p>	<p>_____ Fecha de expiración</p>	<p>_____ Presidente Junta Directiva</p>
<p>_____ Capacidad</p>		

## D. Limitaciones de la certificación

La certificación no certifica el laboratorio de control de calidad del contratista, ni asegura la calidad de la mezcla de la planta, considerando que la producción es un proceso diario y continuo.

La certificación de la planta tampoco asegura la precisión de los dispositivos de medición de la planta. Esto requiere certificaciones específicas.

## E. La matriz de verificación

La matriz de verificación es el documento base para realizar la evaluación para la certificación. Consta de nueve áreas comunes, cada uno con subtemas específicos, y adicionalmente cuatro áreas, si la planta es de Bachadas y también cuatro áreas, si la planta es de Tambor.

Cada área y subtema están claramente detallados en la matriz.

### 1. Descripción de las áreas a evaluar en la matriz de verificación.

#### 1) Verificación del sistema de control de calidad o manual de

**procedimientos.** Un sistema de calidad es un método planificado y sistemático de medios y acciones, encaminados a asegurar suficiente confianza en que los productos se ajusten a las especificaciones. Es deseable que un contratista o productor de mezcla en caliente posea un sistema de control de calidad, sin embargo, considerando que en el país todavía se inicia en la implementación de estos sistemas, la Matriz de Verificación si incluye la revisión y existencia de un manual de procedimientos.

Como ejemplo, se listan los procesos generales de una Planta de Tambor de doble barril:

- Proceso de diseño de la mezcla
- Proceso de almacenamiento y manejo de agregados

- Proceso de alimentación de agregados
- Proceso de suministro de asfalto
- Proceso de secado de agregados, mezclado y entrega al Silo
- Proceso de almacenaje y despacho
- Proceso de control de emisiones

El certificador comprobará si existe o no, el manual de procedimientos detallando cada proceso.

**2) Verificación de los agregados en los apilamientos.** Se evaluarán los subtemas:

*2.1 Graduación y otros.* Que los agregados se ajusten a la granulometría

*2.2 Uniformidad.* Apreciación de la uniformidad de los agregados según cada apilamiento.

*2.3 Segregación.* Apreciación de la segregación en los depósitos de agregados y las operaciones de carga.

*2.4 Contaminación.* Apreciación de la contaminación de los depósitos de agregados y las operaciones de carga.

*2.5 Geometría del apilamiento.* Apreciación que la geometría del apilamiento sea la adecuada para evitar humedad y segregación.

*2.6 Disponibilidad del material de acuerdo a la fórmula de trabajo.* Verificación que la graduación y dosificación de los materiales sean los adecuados a la fórmula de trabajo específica.

*2.7 Contenido de humedad.* Verificación que el contenido de humedad de los agregados coincida con el introducido a la consola de la planta.

*Nota:* El certificador puede requerir los ensayos de laboratorio de comprobación, al mismo productor si supervisa los ensayos, o a un laboratorio externo.

**3) Verificación de los ensayos de laboratorio de la planta (tipo y frecuencia).** A continuación se detallan los ensayos de laboratorio a verificar,

el límite o rango y la especificación, siendo AASHTO la American Association for Highway and Transportation Officials y ASTM la American Standards of Testing and Materials.

Tabla 9. Verificación de los ensayos de laboratorio de la planta.

<b>A Graduación</b>			
1	Muestreo de los agregados		AASHTO T 2
2	Cuarteo de las muestras de campo		AASHTO T 248
3	Granulometrías de los agregados por la vía seca		AASHTO T 27
4	Cantidad del material pasa tamiz No.200		AASHTO T 11
5	Granulometría del relleno mineral - filler -	Pag. 407-04	AASHTO T 37
6	Peso Unitario y vacíos en los agregados	1360	AASHTO T 19

<b>B Agregado grueso (Retenido en el tamiz 4.75 mm)</b>			
7	Abrasión	< 40	AASHTO T 96
8	Desintegración al sulfato de sodio	< 10	AASHTO T 104
9	Caras fracturadas de los agregados gruesos	> 90	ASTM D 4791
10	Partículas planas o alargadas	< 8	ASTM D 4791

<b>C Agregado fino (100% pasa el tamiz 4.75 mm)</b>			
11	Equivalente de arena	> 35	AASHTO T 176
12	Determinación del límite líquido	< 20	AASHTO T 89
13	Determinación del límite plástico y el índice de plasticidad	< 4	AASHTO T 90
14	Graduación No.2 No.3	-	AASHTO M 29
15	Impurezas orgánicas en arenas	N.E.	AASHTO T 21

<b>D Otros</b>			
16	Gravedad específica y absorción de agregados finos	N.E.	AASHTO T 84
17	Gravedad específica y absorción de agregados gruesos	N.E.	AASHTO T 85
18	Gravedad específica aparente del relleno mineral -filler-	N.E.	AASHTO T 133
19	Adherencia agregados finos - bitumen	0.6-1.6	LVN10-86 CHILE
20	Adherencia agregados gruesos - bitumen	> 70	AASHTO T 182
21	Porcentaje de humedad residual en agregados, antes de mezclar con bitumen	N.E.	

Continuación Tabla 9. Verificación de los ensayos de laboratorio de la planta

<b>E Mezcla asfáltica</b>			
22	Gravedad específica Bulk de la mezcla compactada	N.E.	AASHTO T 166
23	Gravedad específica teórica máxima de la mezcla	N.E.	AASHTO T 209
24	Estabilidad remanente	N.E.	AASHTO T 165
25	Susceptibilidad a la humedad	N.E.	AASHTO T 283
26	Resistencia al flujo plástico de las mezclas utilizando el aparato Marshall	8-18.	AASHTO T 245
27	Extracción cuantitativa de bitumen de mezclas	N.E.	AASHTO T 164
28	Análisis mecánico de agregados extraídos	N.E.	AASHTO T 30
29	Muestreo de mezclas bituminosas	N.E.	AASHTO T 188
30	Determinación del grado de recubrimiento de las mezclas bitumen - agregados	N.E.	AASHTO T 195

<b>F Asfalto</b>			
31	Muestreo de materiales bituminosos	N.E.	AASHTO T 40
32	Viscosidad cinemática de asfaltos	Varias	AASHTO T 201
33	Penetración de materiales bituminosos	Varias	AASHTO T 49
34	Puntos de inflamación y llama usando la copa abierta de Cleveland	Varias	AASHTO T 48
35	Punto de ablandamiento de asfalto en glicol	Varias	AASHTO T 53
36	Ductilidad de materiales bituminosos	Varias	AASHTO T 51
37	Gravedad específica de materiales bituminosos semisólidos	N.E.	AASHTO T 228

*Nota: N.E. no existe, es variable.*

#### **4) Verificación del sistema de alimentación de agregados**

*4.1 Existe homogenización de agregados antes de proceder a la alimentación de las tolvas.* Verificación de la homogeneidad de cada tipo de apilamiento de agregado, antes de la carga en cada contenedor.

*4.2 Contenedores (tolvas) separados para cada tamaño de material.* Comprobación de la separación física entre contenedores.

*4.3 Contenedor (tolva) separado para filler mineral (si es necesario).* Comprobación de la existencia de un contenedor para *filler*, si aplica.

4.4 *Carga de contenedores (tolvas) sin posibilidad de mezcla.* Comprobación de la correcta carga del contenedor.

4.5 *Compuertas con buen funcionamiento.* Verificación de las compuertas de cada contenedor.

4.6 *Sistema de proporcionamiento sincronizado para dos o más contenedores (tolva).* Comprobación del sistema automático de la velocidad de las bandas.

4.7 *Vibradores en contenedores (tolvas) con buen funcionamiento.* Comprobación del funcionamiento de los vibradores de los contenedores.

4.8 *Alimentadores (cold feeders) equipados con sensores "no-flujo" y funcionando.* Comprobación del funcionamiento de las paletas o sensores de flujo (se mueven con el paso de agregado, si no, envían señal a la consola de la planta).

4.9 *Alimentadores (cold feeders) calibrados de acuerdo a la fórmula de trabajo y documentados.* Comprobación del procedimiento de calibración de los contenedores (granulometría de cada contenedor) y la mezcla adecuada de agregados de cada contenedor en la banda colectora, avalados por documentos.

## **5) Verificación del secador**

5.1 *Capacidad de agitar el agregado continuamente.* Comprobación del funcionamiento del tambor secador.

5.2 *Sensor de temperatura -instrumento termométrico- en la descarga funcionando apropiadamente.* Comprobación del funcionamiento del sensor de temperatura.

5.3 *Control automático del quemador con buen funcionamiento.* Comprobación del control automático del quemador.

## **6) Verificación de camiones de volteo**

*6.1 Las palanganas son lisas y están limpias.* Comprobación de las palanganas de los camiones de volteo.

*6.2 La palangana se lava con agente apropiado y se drena bien, antes de la carga.* Comprobación de la operación de limpieza de los camiones de volteo

*6.3 Se usan lonas apropiadas, y son del tamaño adecuado para prevenir la entrada de humedad, la pérdida rápida de temperatura y contaminación.* Comprobación del tipo, tamaño y forma de colocación de las lonas de protección de la palangana del camión.

**7) Verificación del acceso apropiado para los camiones.** Comprobación del camino, ancho, pendiente, drenaje, superficie libre de polvo y área adecuada de maniobras, para los camiones de volteo dentro de la planta.

## **8) Verificación de las básculas para los camiones**

*8.1 Las básculas están calibradas y certificadas.* Comprobación del funcionamiento de las básculas y de la existencia del original del certificado de calibración y su vigencia, emitido por una empresa externa.

*8.2 El equipo automático y de impresión funcionan apropiadamente.* Comprobación del equipo de impresión de registros de pesos.

## **9) Verificación del laboratorio de materiales y equipo para los ensayos**

*9.1 Todo el equipo de laboratorio está funcionando y en buenas condiciones de operación, contando con control estadístico de calibración de equipo.* Comprobación del equipo de laboratorio de materiales existente para el control de calidad, de acuerdo con los definidos en el punto 3.

9.3 *Existen procedimientos por escrito y los formatos respectivos.* Comprobación de la existencia de todos los protocolos de los ensayos por escrito y sus respectivos formatos o registros.

## **10) Verificación del sistema de control de emisiones**

10.1 *La presión diferencial en la cámara de filtros se mantiene dentro del rango recomendado por el fabricante.* Comprobación que la presión diferencial se mantiene en el rango recomendado para confirmar el buen funcionamiento de la cámara y la reducción de emisiones de partículas sólidas.

10.2 *Los filtros y las válvulas de impulsos de aire funcionan correctamente.* Comprobación física que los filtros están en buen estado y las válvulas de aire también.

10.3 *Existe bitácora con el registro de las operaciones de presión diferencial, temperatura de los gases de entrada a la cámara y de salida al exterior y otros.* Comprobación que se llevan registros históricos de los parámetros de la cámara de filtros, que reflejan el buen funcionamiento de la planta.

Si la planta es de bachadas o dosificadora, se consideran las áreas de la 11 a la 15, y si la planta es de tambor o continua, se consideran las áreas de la 16 a la 19.

## **11) Verificación de las tolvas calientes y zarandas**

11.1 *Las zarandas y el deck están en buenas condiciones.* Comprobación física del estado de las zarandas y el deck.

11.2 *El sistema de zarandas es capaz de remover el material sobre tamaño.* Comprobación del funcionamiento del sistema de zarandas.

11.3 *Los dispositivos de muestreo de las tolvas calientes están operando.* Comprobación del funcionamiento de los dispositivos de muestreo de las tolvas calientes.

11.4 *Los conductos de sobreflujo de los bienes calientes son funcionales y evitan derrames sobre las otras tolvas.* Comprobación del funcionamiento de los chutes.

11.5 *Las compuertas de las tolvas cierran herméticamente para prevenir fugas.* Comprobación del funcionamiento de las compuertas de las tolvas.

11.6 *No existen agujeros en los compartimentos de las tolvas.* Comprobación de la hermeticidad de las tolvas.

**12) El filler mineral se introduce apropiadamente en la mezcla (si aplica).**

Comprobación de la adecuada incorporación del *filler*, cuando se utiliza.

**13) Verificación de la tolva de pesaje**

13.1 *Tiene capacidad automática de pesaje de cada tamaño de agregado.* Comprobación que la tolva pesa cada agregado.

13.2 *Las compuertas cierran herméticamente para evitar derrames en el mezclador.* Comprobación física de las compuertas de la tolva.

13.3 *Las balanzas de agregados y asfalto están calibradas y la certificación está a la vista.* Comprobación del original del certificado de calibración y vigencia, emitido por una empresa externa.

**14) Verificación del mezclador**

14.1 *No ocurren fugas en la caja del mezclador durante la operación.* Comprobación física de la hermeticidad del mezclador.

14.2 *La condición y separación de las hojas del mezclador a las partes fijas y móviles son adecuadas para asegurar la mezcla completa y el cubrimiento de los agregados.* Comprobación física de la condición de las paletas del mezclador.

14.3 *El dispositivo de tiempo está colocado y ajustado al tiempo deseado de mezcla.* Comprobación del funcionamiento del dispositivo de tiempo de mezclado.

14.4 *Las bachadas están siendo mezcladas a la capacidad del mezclador.* Comprobación del volumen correcto de mezclado.

14.5 *El tiempo de mezclado requerido es obtenido después de que el asfalto ha sido descargado dentro del mezclador.* Confirmación del tiempo de mezclado considerado a partir de la inyección de asfalto.

14.6 *Existe control de la temperatura, apariencia y muestreo de la mezcla.* Comprobación del control continuo de la temperatura, apariencia y muestreo de la mezcla, a través de un laboratorista, y el monitoreo vinculado con la operación de la planta.

### **15) Equipo de reciclaje (si aplica)**

15.1 *La planta está equipada (o cuenta con equipo auxiliar) para pesar y proporcionar automáticamente el material recuperado, de acuerdo a la fórmula de trabajo.* Comprobación del funcionamiento del equipo de pesaje y proporcionamiento del material recuperado (RAP).

15.2 *La planta tiene dispositivos de pesaje para el material recuperado, verificados y calibrados para cumplir las tolerancias de las especificaciones.* Comprobación del original del certificado de calibración y vigencia, emitido por una empresa externa.

### **16) Verificaciones de la planta**

16.1 *La zaranda vibratoria funciona bien.* Comprobación del funcionamiento de la zaranda de entrada a la banda de carga.

16.2 *La balanza de la banda de carga está calibrada.* Comprobación del original del certificado de calibración y vigencia, emitido por una empresa externa.

16.3 *Se controla, mide y registra la eficiencia del quemador.* Comprobación del control y medición del quemador, para evitar contaminación de la mezcla con combustible y otros.

16.4 *Se determina el rango de la temperatura de mezclado de acuerdo a la viscosidad del tipo de asfalto utilizado.* Comprobación de la definición del rango de temperatura de mezclado de acuerdo a la viscosidad del asfalto utilizado, de preferencia con el ensayo de viscosidad rotacional.

16.5 *El porcentaje de humedad de los agregados ha sido determinado y se ha ingresado en el sistema de control.* Comprobación del monitoreo de la humedad existente en los agregados y su ingreso a la consola de la planta.

16.6 *Las tasas de alimentación de agregados y asfalto están vinculadas automáticamente.* Comprobación del funcionamiento automático entre el peso de agregados y el volumen de asfalto inyectado a la cámara de mezclado.

## **17) Verificación del sistema de abastecimiento de asfalto**

17.1 *Hay un adecuado sistema de almacenamiento y calentamiento del cemento asfáltico.* Comprobación de los controles para la temperatura de descarga y procedimientos de trasegado.

17.2 *En los tanques de almacenamiento no existan fugas de aceite térmico del serpentín.* Comprobación física de la hermeticidad de los serpentines, para evitar la contaminación del asfalto.

17.3 *Hay una adecuada circulación del cemento asfáltico y de los aditivos anti-desvestimiento.* Comprobación física de la circulación del asfalto y los aditivos.

17.4 *El aditivo anti-desvestimiento se agrega en la dosificación correcta en los tanques, cuando ha sido requerido por la fórmula de trabajo. El medidor de flujo total está instalado y operando apropiadamente.* Comprobación del equipo de medición de flujo del aditivo.

17.5 *El termómetro está en la línea de alimentación y operando apropiadamente. La temperatura del asfalto está a la temperatura requerida.* Comprobación física del funcionamiento del medidor de temperatura del asfalto y que la misma esté en el rango.

17.6 *No hay fugas en el sistema, en el área de trabajo.* Inspección detallada de fugas en el sistema.

17.7 *Las básculas o medidores de flujo del asfalto están calibradas y son precisas.* Comprobación del funcionamiento de los medidores de flujo del asfalto.

17.8 *Verificación de las certificaciones de los medidores de asfalto y aditivos.* Comprobación de la certificación original de los medidores de flujo.

17.9 *Los datos de gravedad específica del cemento asfáltico han sido determinados e ingresados a la consola.* Comprobación que existen los ensayos de gravedad específica del asfalto que está en uso.

## **18) Verificación del funcionamiento del proporcionamiento y mezcla automático**

18.1 *Existe control de la temperatura, apariencia y muestreo de la mezcla en la salida de la cámara de mezclado.* Comprobación del control continuo de la temperatura, apariencia y muestreo de la mezcla, a través de un laboratorista, y el monitoreo vinculado con la operación de la planta.

## **19) Equipo de reciclaje (si aplica)**

19.1 *La Planta está equipada (o cuenta con equipo auxiliar) para pesar y proporcionar automáticamente el material recuperado, de acuerdo a la fórmula de trabajo.* Comprobación del funcionamiento del equipo de pesaje y proporcionamiento del material recuperado (RAP).

19.2 *La Planta tiene dispositivos de pesaje para el material recuperado, verificados y calibrados para cumplir las tolerancias de las especificaciones.* Comprobación del original del certificado de calibración y vigencia, emitido por una empresa externa.

## XII. MATRIZ DE VERIFICACIÓN

No.	ÁREA	Sí	NO	Especificación	Norma	Observaciones																																																																																																
1	Verificación del sistema de control de calidad o Manual de procedimientos					Si existe el manual de procedimientos por escrito y debidamente ordenados																																																																																																
2	Verificación de los agregados en los apilamientos																																																																																																					
2.1	Graduación y otros					<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Tamaño del Tamiz</th> <th colspan="5">Porcentaje en Masa que Pasa el Tamiz designado (AASHTO T 27 y T 11)</th> </tr> <tr> <th>A (50.8 mm)</th> <th>B (38.1 mm)</th> <th>C (25.4 mm)</th> <th>D (19 mm)</th> <th>E (12.5 mm)</th> <th>F (9.5 mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2"</td> <td>100</td> <td>1 1/2"</td> <td>1"</td> <td>3/4"</td> <td>1/2"</td> <td>3/8"</td> </tr> <tr> <td>63.00 mm</td> <td>100</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>50.00 mm</td> <td>90-100</td> <td>100</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>38.10 mm</td> <td>-</td> <td>90-100</td> <td>100</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>25.00 mm</td> <td>60-80</td> <td>-</td> <td>90-100</td> <td>100</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>19.00 mm</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>56-80</td> <td>90-100</td> <td>100</td> <td></td> </tr> <tr> <td>12.50 mm</td> <td>35-65</td> <td>-</td> <td>56-80</td> <td>-</td> <td>90-100</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>9.50 mm</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>56-80</td> <td>-</td> <td>90-100</td> </tr> <tr> <td>4.75 mm</td> <td>17-47</td> <td>23-63</td> <td>29-59</td> <td>35-65</td> <td>44-74</td> <td>55-85</td> </tr> <tr> <td>2.36 mm</td> <td>10-36</td> <td>15-41</td> <td>19-45</td> <td>23-49</td> <td>28-58</td> <td>32-67</td> </tr> <tr> <td>0.30 mm</td> <td>3-15</td> <td>4-16</td> <td>5-17</td> <td>5-21</td> <td>5-21</td> <td>7-23</td> </tr> <tr> <td>0.075 mm</td> <td>0-5</td> <td>0-6</td> <td>1-7</td> <td>2-8</td> <td>2-10</td> <td>2-10</td> </tr> </tbody> </table> <p>Cemento asfáltico, porcentaje en peso a 12 del total de la mezcla*</p> <p style="text-align: center;">3 a 8      3 a 9      4 a 10      4 a 11      5</p>	Tamaño del Tamiz	Porcentaje en Masa que Pasa el Tamiz designado (AASHTO T 27 y T 11)					A (50.8 mm)	B (38.1 mm)	C (25.4 mm)	D (19 mm)	E (12.5 mm)	F (9.5 mm)	2"	100	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	63.00 mm	100						50.00 mm	90-100	100					38.10 mm	-	90-100	100				25.00 mm	60-80	-	90-100	100			19.00 mm	-	-	56-80	90-100	100		12.50 mm	35-65	-	56-80	-	90-100	100	9.50 mm	-	-	-	56-80	-	90-100	4.75 mm	17-47	23-63	29-59	35-65	44-74	55-85	2.36 mm	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67	0.30 mm	3-15	4-16	5-17	5-21	5-21	7-23	0.075 mm	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10
Tamaño del Tamiz	Porcentaje en Masa que Pasa el Tamiz designado (AASHTO T 27 y T 11)																																																																																																					
	A (50.8 mm)	B (38.1 mm)	C (25.4 mm)	D (19 mm)	E (12.5 mm)	F (9.5 mm)																																																																																																
2"	100	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"																																																																																																
63.00 mm	100																																																																																																					
50.00 mm	90-100	100																																																																																																				
38.10 mm	-	90-100	100																																																																																																			
25.00 mm	60-80	-	90-100	100																																																																																																		
19.00 mm	-	-	56-80	90-100	100																																																																																																	
12.50 mm	35-65	-	56-80	-	90-100	100																																																																																																
9.50 mm	-	-	-	56-80	-	90-100																																																																																																
4.75 mm	17-47	23-63	29-59	35-65	44-74	55-85																																																																																																
2.36 mm	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67																																																																																																
0.30 mm	3-15	4-16	5-17	5-21	5-21	7-23																																																																																																
0.075 mm	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10																																																																																																
2.2	Uniformidad					visual y si necesario, granulometría																																																																																																
2.3	Segregación					visual																																																																																																
2.4	Contaminación					visual, sujeto a ensayos																																																																																																
2.5	Geometría del apilamiento					visual																																																																																																
2.6	Disponibilidad del material de acuerdo a la fórmula de trabajo																																																																																																					
2.7	Contenido de humedad					Prueba AASHTO																																																																																																
3	Verificación de los ensayos de laboratorio de planta (tipo y frecuencia)					NOMENCLATURA LIBRO DE ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS Y PUENTES, DGC 2001																																																																																																
A	Graduación																																																																																																					
1	Muestreo de los agregados				AASHTO T 2																																																																																																	
2	Cuartero de las muestras de campo				AASHTO T 248																																																																																																	
3	Granulometrías de los agregados por la vía seca				AASHTO T 27																																																																																																	
4	Cantidad del material pasa tamiz No.200				AASHTO T 11																																																																																																	
5	Granulometría del relleno mineral - filler -			Pag. 407-04	AASHTO T 37																																																																																																	

No.	ÁREA	SÍ	NO	Especificación	Norma	Observaciones
6	Peso Unitario y vacíos en los agregados			1360	AASHTO T 19	
<b>B</b>	<b>Agregado grueso (Retenido en el tamiz 4.75 mm)</b>					
7	Abrasión			< 40	AASHTO T 96	
8	Desintegración al sulfato de sodio			< 10	AASHTO T 104	
9	Caras fracturadas de los agregados gruesos			> 90	ASTM D 4791	
10	Partículas planas o alargadas			< 8	ASTM D 4791	
<b>C</b>	<b>Agregado fino (100% pasa el tamiz 4.75 mm)</b>					
11	Equivalente de arena			> 35	AASHTO T 176	
12	Determinación del límite líquido			< 20	AASHTO T 89	
13	Determinación del límite plástico y el índice de plasticidad			< 4	AASHTO T 90	
14	Graduación No.2 No.3			-	AASHTO M 29	
15	Impurezas orgánicas en arenas			N.E.	AASHTO T 21	
<b>D</b>	<b>Otros</b>					
16	Gravedad específica y absorción de agregados finos			N.E.	AASHTO T 84	
17	Gravedad específica y absorción de agregados gruesos			N.E.	AASHTO T 85	
18	Gravedad específica aparente del relleno mineral -filler-			N.E.	AASHTO T 133	
19	Adherencia agregados finos - bitumen			0.6-1.6	LNV 10-86 CHILE	
20	Adherencia agregados gruesos - bitumen			> 70	AASHTO T 182	
21	Porcentaje de humedad residual en agregados, antes de mezclar con bitumen			N.E.		
<b>E</b>	<b>Mezcla asfáltica</b>					
22	Gravedad específica Bulk de la mezcla compactada			N.E.	AASHTO T 166	
23	Gravedad específica teórica máxima de la mezcla			N.E.	AASHTO T 209	
24	Estabilidad remanente			N.E.	AASHTO T 165	
25	Susceptibilidad a la humedad			N.E.	AASHTO T 283	
26	Resistencia al flujo plástico de las mezclas utilizando el aparato Marshall			8 - 18.	AASHTO T 245	
27	Extracción cuantitativa de bitumen de mezclas			N.E.	AASHTO T 164	
28	Análisis mecánico de agregados extraídos			N.E.	AASHTO T 30	
29	Muestreo de mezclas bituminosas			N.E.	AASHTO T 188	
30	Determinación del grado de recubrimiento de las mezclas bitumen-agregados			N.E.	AASHTO T 195	
<b>F</b>	<b>Asfalto</b>					
31	Muestreo de materiales bituminosos			N.E.	AASHTO T 40	

No.	ÁREA	SÍ	NO	Especificación	Norma	Observaciones
32	Viscosidad cinemática de asfaltos			Varias	AASHTO T 201	
33	Penetración de materiales bituminosos			Varias	AASHTO T 49	
34	Puntos de inflamación y llama usando la copa abierta de Cleveland			Varias	AASHTO T 48	
35	Punto de ablandamiento de asfalto en glicol			Varias	AASHTO T 53	
36	Ductilidad de materiales bituminosos			Varias	AASHTO T 51	
37	Gravedad específica de materiales bituminosos semisólidos			N.E	AASHTO T 228	
<b>4</b>	<b>Verificación del sistema de alimentación de agregados (cold feeders)</b>					
4.1	Existe homogenización de agregados antes de proceder a la alimentación de los bins					
4.2	Contenedores (bins) separados para cada tamaño de material					
4.3	Contenedor (bin) separado para filler mineral (si es necesario)					
4.4	Carga de contenedores (bins) sin posibilidad de mezcla					
4.5	Compuertas con buen funcionamiento					
4.6	Sistema de posicionamiento sincronizado para dos o más contenedores (bins)					
4.7	Vibradores en contenedores (bins) con buen funcionamiento					
4.8	Alimentadores (cold feeders) equipados con sensores "no-flujo" y funcionando					
4.9	Alimentadores (cold feeders) calibrados de acuerdo a la fórmula de trabajo y documentados					
<b>5</b>	<b>Verificación del secador (dryer)</b>					
5.1	Capacidad de agitar el agregado continuamente					
5.2	Sensor de temperatura - instrumento termométrico - en la descarga funcionando apropiadamente					
5.3	Control automático del quemador con buen funcionamiento					
<b>6</b>	<b>Verificación de camiones de volteo</b>					
6.1	Las palanganas son lisas y están limpias					
6.2	La palangana se lava con agente apropiado y se dreña bien, antes de la carga					
6.3	Se usan lonas apropiadas, y son del tamaño adecuado para prevenir la entrada de humedad, la pérdida rápida de temperatura y contaminación.					

No.	ÁREA	SÍ	NO	Especificación	Norma	Observaciones
7	Verificación del acceso apropiado para los camiones					
8	Verificación de las básculas para camiones					
8.1	Las básculas están calibradas y certificadas					
8.2	El equipo automático y de impresión funcionan apropiadamente					
9	Verificación del laboratorio de materiales y equipo para ensayos					
9.1	Todo el equipo de laboratorio está funcionando y en buenas condiciones de operación, contando con control estadístico de calibración de equipo.					
9.2	Existen procedimientos por escrito y los formatos respectivos					
10	Verificación del sistema de control de emisiones					
10.1	La presión diferencial en la cámara de filtros se mantiene dentro del rango recomendado por el fabricante					
10.2	Los filtros y las válvulas de impulsos de aire funcionan correctamente					
10.3	Existe bitácora con el registro de las operaciones de presión diferencial, temperatura de los gases de entrada a la cámara y de salida al exterior y otros					
<b>NOTA: Si la planta es de bachadas o dosificadora, proceder a llenar las casillas No. 11 a 15; si la planta es de tambor o continua, proceder a llenar las casillas No. 15 a 18.</b>						
11	<b>OPERACIONES DE PLANTA DE BACHADAS</b>					
	Verificación de los bins calientes y zarandas					
11.1	Las zarandas y el deck están en buenas condiciones					
11.2	El sistema de zarandas es capaz de remover el material sobre tamaño					
11.3	Los dispositivos de muestreo de los bins calientes están operando					
11.4	Los conductos de sobreflujo de los bins calientes son funcionales y evitan derrames sobre los otros bins					
11.5	Las compuertas de los bins cierran herméticamente para prevenir fugas					
11.6	No existen agujeros en los compartimentos de los bins					
12	El filler mineral se introduce apropiadamente en la mezcla (si aplica)					



No.	ÁREA	SÍ	NO	Especificación	Norma	Observaciones
16.2	La balanza de la banda de carga está calibrada					
16.3	Se controla, mide y registra la eficiencia del quemador					
16.4	Se determina el rango de la temperatura de mezclado de acuerdo a la viscosidad del tipo de asfalto utilizado					
16.5	El porcentaje de humedad de los agregados ha sido determinado y se ha ingresado en el sistema de control					
16.6	Las tasas de alimentación de agregados y asfalto están vinculadas automáticamente					
<b>17</b>	<b>Verificación del sistema de abastecimiento de asfalto</b>					
17.1	Hay un adecuado sistema de almacenamiento y calentamiento del cemento asfáltico					
17.2	En los tanques de almacenamiento no existan fugas de aceite termico del serpentín					
17.3	Hay una adecuada circulación del cemento asfáltico y de los aditivos anti-desvestimiento					
17.4	El aditivo anti-desvestimiento ha sido agregado en la dosificación correcta en los tanques, cuando ha sido requerido por la fórmula de trabajo. El medidor de flujo total está instalado y operando apropiadamente					
17.5	El termómetro está en la línea de alimentación y operando apropiadamente. La temperatura del asfalto está a la temperatura requerida.					
17.6	No hay fugas en el sistema, en el área de trabajo.					
17.7	Las básculas o medidores de flujo del asfalto están calibradas y son precisas					
17.8	Verificación de las certificaciones de los medidores de asfalto y aditivos					
17.9	Los datos de gravedad específica del cemento asfáltico han sido determinados e ingresados a la consola					
<b>18</b>	<b>Verificación del funcionamiento del proporcionamiento y mezcla automático.</b>					

No.	ÁREA	SÍ	NO	Especificación	Norma	Observaciones
18.1	Existe control de la temperatura, apariencia y muestreo de la mezcla en la salida de la cámara de mezclado					
19	<b>Equipo de reciclaje (si aplica)</b>					
19.1	La Planta está equipada (o cuenta con equipo auxiliar) para pesar y proporcionar automáticamente el material recuperado, de acuerdo a la fórmula de trabajo.					
19.2	La Planta tiene dispositivos de pesaje para el material recuperado, verificados y calibrados para cumplir las tolerancias de las especificaciones					

### **XIII. CONCLUSIONES**

El concreto asfáltico ha demostrado ser un buen material para su uso en la carpeta de rodadura, y la vasta experiencia adquirida en todo el mundo por su uso tan popular ha permitido desarrollar continuamente mejoras en los materiales, mezclas, técnicas de diseño y colocación.

En Guatemala se utiliza la clasificación del asfalto por viscosidad, aunque prácticamente no existen equipos independientes de ensayos de laboratorio que verifiquen las especificaciones del ligante. A excepción de un par de empresas productoras, quienes poseen parcialmente equipo de ensayos, generalmente se acepta la certificación del proveedor del asfalto.

En el país existen más de 40 plantas asfálticas de mezcla en caliente y todas ellas pueden dividirse en dos grandes grupos: las plantas dosificadoras o de bachadas y las plantas continuas de tambor.

Las plantas de bachadas producen lotes de mezcla de forma independiente. El agregado llega a la planta y se deposita en las tolvas de alimentación en frío, luego un medio de transporte traslada el agregado hacia el secador. El secador es un tambor rotatorio con una llama en uno de sus extremos que cumple la función de calentar y reducir hasta el nivel mínimo el contenido de humedad en el agregado, este proceso tiende a generar emisiones tanto de finos como de hidrocarburos por lo que se añade en el proceso un sistema de control de emisiones. El agregado seco pasa a la torre de dosificación en la cual una serie de tamices garantiza la correcta granulometría de la mezcla y lo deposita en el molino de mezclado hasta que se alcanza el peso requerido. El proceso de mezclado comienza y la inyección del cemento asfáltico se da unos segundos después. La mezcla producida se deposita en un silo de carga o de almacenamiento y finalmente se cargan los camiones transportadores.

Las plantas continuas de tambor no producen mezcla por lotes, sino que generan un flujo continuo de mezcla en cada instante. Esto se logra uniendo el proceso de mezcla con el proceso de secar y calentar el agregado. Las plantas continuas de tambor se pueden dividir en dos grupos: las plantas de tambor de flujo paralelo y las plantas de

tambor de contraflujo. La diferencia entre estos dos tipos de plantas es el sentido en el que fluye el agregado y la mezcla dentro del tambor con respecto al quemador (que es la llama que seca y calienta el agregado). En las plantas de flujo paralelo el agregado se deposita en el tambor del lado del quemador y fluye hacia el otro extremo a medida que se calienta y se seca.

Las plantas de contraflujo son más eficientes por lo que su fabricación se ha hecho más popular en los últimos años. En éstas el agregado se deposita dentro del tambor del lado opuesto del quemador y fluye hacia él a medida que se calienta y seca el agregado.

Una de las variantes más comunes de las plantas de contraflujo son las plantas con doble barril, en las cuales la inyección del cemento asfáltico se da en un segundo barril externo fijo y que envuelve al barril del secador. La ventaja de estas plantas es que la llama del quemador nunca está en contacto directo con el cemento asfáltico y que constituye la más avanzada tecnológicamente, de las existentes en el país.

Los procesos de producción de mezcla asfáltica en caliente en una planta con doble barril que fueron identificados en este trabajo son: 1) Proceso de diseño de la mezcla, 2) Proceso de almacenamiento y manejo de agregados, 3) Proceso de alimentación de agregados, 4) Proceso de suministro de asfalto, 5) Proceso de secado de agregados, mezclado y entrega al silo, 6) Proceso de almacenaje y despacho, y 7) Proceso de control de emisiones.

Una de las conclusiones importantes de este trabajo es afirmar que en el país existe un grupo de empresarios que se han unido y formado una Asociación de Productores de Asfalto –ASOASFALTOS- con intereses técnicos positivos y la finalidad de mejorar la calidad del concreto asfáltico.

La matriz de verificación constituye una solución práctica para realizar el procedimiento de verificación de los procesos de producción de una planta asfáltica. Se propone como un documento flexible que será sujeto a mejoras, a partir de las experiencias en su implementación.

Las inspecciones para aplicar la matriz de verificación serán realizadas por una empresa consultora o un consultor individual calificado (certificador) y contratado por ASOASFALTOS, a solicitud del productor o contratista, a la Asociación en referencia. Como resultado de la evaluación de la matriz, el certificador emitirá un informe de aprobación, en cuyo caso se emitirá el certificado, o de aplazamiento, estableciendo un plazo para la próxima inspección.

El procedimiento de certificación propuesto es sencillo y apela a la disposición mostrada por el sector de productores y contratistas de asfalto, de reconocer que los procesos de producción de mezcla en caliente de las empresas productoras, se realizan de conformidad con los requerimientos y especificaciones.

El objetivo básico de la certificación es lograr que el Contratista desarrolle los procesos, las inspecciones y los ensayos de laboratorio que aseguren que toda la mezcla cumpla las especificaciones, -fabricando la mezcla uniforme y disminuyendo la dispersión de los resultados-, en vez de verificar si cumple las especificaciones, después de elaborada. Este concepto da al Contratista más control sobre sus operaciones.

La implementación de la certificación de planta asfálticas será un paso hacia adelante en la búsqueda de la calidad y el conocimiento del comportamiento de los materiales en la ingeniería de carreteras.

## XIV. RECOMENDACIONES

La ingeniería civil del país debe buscar conocer el comportamiento visco-elástico del asfalto, a través de la adquisición de los equipos de ensayos que permitan extender el conocimiento del asfalto en los ingenieros nacionales.

Debe implementarse la clasificación de asfalto por desempeño. La antigua concepción de conocer propiedades empíricas del asfalto y únicamente cuando el asfalto se recibe, ya no es válida. Las propiedades del asfalto mezclado en caliente deben estar relacionadas con las condiciones bajo las cuales será usado a lo largo de su vida útil. Esto incluye condiciones climáticas y consideraciones de envejecimiento. La clasificación por desempeño utiliza un conjunto de pruebas, pero especifica que cada cemento asfáltico debe pasar estas pruebas a temperaturas definidas que dependen de las condiciones climáticas del área de uso.

Se recomienda que cada productor o contratista de mezcla asfáltica desarrolle un sistema de gestión de calidad o un manual de procedimientos, para cada uno de los procesos identificados, con la finalidad de tener documentados los diferentes procedimientos y controles. Esta metodología ayudará a mejorar la producción e identificar específicamente los problemas en la producción cuando se presenten.

En la investigación se encontró que el consumo energético aproximado por tonelada de mezcla asfáltica, es el siguiente:

Proceso	Consumo (BTU/Ton)
Almacenamiento de asfalto	11.8
Secado –evaporación de humedad-	103.4
Gases de chimenea	106.3
Pérdidas	77.6
Total	287.1

Estos datos dan la idea que se pierden en el ambiente aproximadamente un 64% del consumo energético, y se recomienda que se estudien algunas formas innovadoras de aprovechar este calor, especialmente el emitido por los gases de la chimenea (37%).

Se recomienda la implementación a corto plazo del procedimiento de certificación de plantas asfálticas porque sus beneficios son notables: el productor identifica claramente los procesos y le da más control sobre sus operaciones, traduciéndose en un mejor producto y ahorros en los recursos, el sector avanza con empresas productoras y contratistas más competitivos, y los usuarios, seguramente recorrerán pavimentos asfálticos contruidos con mezcla de calidad y de mayor vida útil.

Es importante tener presente que la certificación de plantas asfálticas evalúa el equipo, las instalaciones y las prácticas adecuadas para producir mezcla asfáltica en caliente. Sin embargo, la calidad de la mezcla producida y colocada depende de otros factores como el diseño de la mezcla, el control de calidad en los procesos de producción y el control de calidad en la colocación. Para cada una de estas actividades de debe desarrollar normativas específicas.

A pesar de que muchas de las carreteras existentes se encuentran en mal estado son una gran fuente de material que puede ser reutilizado. Para ello es necesario investigar las características del material reciclado disponible y promover la implementación de los sistemas para RAP en las plantas asfálticas de mezcla en caliente.

La presente certificación requiere que todos los ítems que aplican a un tipo particular de planta se cumplan, sin embargo se debe evaluar la posibilidad de emitir distintos grados de certificación con base en una matriz cuyos ítems puedan ser medidos por medio de alguna escala. Con esto, se podrían incluir productores más pequeños o plantas temporales asignándoles un certificado de calidad distinto al de las plantas grandes que les permita producir mezcla destinada a carreteras o calles de menor importancia.

## XV. BIBLIOGRAFÍA

Asphalt Institute. 1989 Edition. *The Asphalt Handbook*. Estados Unidos. 607 págs.

Asphalt Institute. 1997 Edition. *Mix design methods*. Estados Unidos. Asphalt Institute. 141 págs.

Asphalt Institute. 2003 Edition. *Asphalt binder testing manual*. Estados Unidos. Asphalt Institute. 184 págs.

Asphalt Institute. 2003 Edition. *Superpave performance graded asphalt binder specifications and testing*. Estados Unidos. Asphalt Institute. 72 págs.

Brock, Don J. 1994. *Asphalt oxidation*. ASTEC. Tennessee, Estados Unidos. 16 págs.

Brock, Don J. 1994. *Asphalt content*. ASTEC. Tennessee, Estados Unidos. 8 págs.

Brock, Don J. *et al.* 1994. *Segregation: causes and cures*. ASTEC. Tennessee, Estados Unidos. 20 págs.

Brock, Don J. 1994. *Dryer drum mixer*. ASTEC. Tennessee, Estados Unidos. 15 págs.

Brock, Don J. 1994. *Filter chamber*. ASTEC. Tennessee, Estados Unidos. 24 págs.

Brock, Don J. 1994. *Pavement roughness*. ASTEC. Tennessee, Estados Unidos. 41 págs.

Brock, Don J. 1994. *Milling and recycling*. ASTEC. Tennessee, Estados Unidos. 24 págs.

Brock, Don J. 1994. *Truck transport*. ASTEC. Tennessee, Estados Unidos. 20 págs.

Brown, Ray E. *et al.* 2002. *Hot-Mix Asphalt Paving*. US Army Corps of Engineers. Estados Unidos. 219 págs.

Feltman, Wendell. 1996. *Evolution of thermal remediaton*. ASTEC. Tennessee, Estados Unidos. 9 págs.

Padilla, Alejandro. 2004. *Mezclas Asfálticas*. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España. 26 págs.

Roberts, Freddy L. *et al.* 1996. *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*. Second Edition. Lanham. National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation. 585 págs.

Robertson R. E. *et al.* 2001, *Fundamental Properties of Asphalts and Modified Asphalts, Volume I: Interpretive Report*. Federal Highway Administration. Washington, Estados Unidos. 496 págs.

Swanson, Malcom. 2002. *Baghouse applications*. ASTEC. Tennessee, Estados Unidos. 24 págs.