



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ACATLÁN

“RECUPERACION DE PAVIMENTOS CON CEMENTO EN OBRA”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO CIVIL

PRESENTA

ADRIAN HERRERA ACEVEDO

ASESOR: ING. CELSO BARRERA CHAVEZ

MARZO 2007.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE.

INTRODUCCION.....	1
--------------------------	----------

CAPITULO I.- CONCEPTOS GENERALES.

<i>I.1.- Pavimento.....</i>	<i>2</i>
<i>I.2.- Funciones y características de los pavimentos.....</i>	<i>4</i>
<i>I.2.1.- Funciones de los pavimentos.....</i>	<i>4</i>
<i>I.2.2.- Características funcionales o superficiales.....</i>	<i>5</i>
<i>I.2.3.- Características estructurales.....</i>	<i>5</i>
<i>I.3.- Tipos de pavimento.....</i>	<i>6</i>
<i>I.3.1.- Pavimentos flexibles.....</i>	<i>6</i>
<i>I.3.2.- Pavimentos rígidos.....</i>	<i>6</i>
<i>I.4.- Estructura de un pavimento.....</i>	<i>7</i>
<i>I.4.1.- Carpeta.....</i>	<i>7</i>
<i>I.4.2.- Base.....</i>	<i>7</i>
<i>I.4.3.- Subbase.....</i>	<i>9</i>
<i>I.5.- Criterios de diseño.....</i>	<i>11</i>
<i>I.6.- Tipos de deterioros.....</i>	<i>13</i>
<i>I.6.1.- Deterioros en pavimentos flexibles.....</i>	<i>14</i>
<i>I.6.1.1.- Deterioros de la superficie.....</i>	<i>14</i>
<i>I.6.1.2.- Deterioros de la estructura.....</i>	<i>16</i>
<i>I.6.1.3.- Deterioros por defectos constructivos.....</i>	<i>20</i>
<i>I.6.2.- Deterioros en pavimentos rígidos.....</i>	<i>20</i>
<i>I.6.2.1.- Fallas en el proceso constructivo.....</i>	<i>20</i>
<i>I.6.2.2.- Agrietamientos.....</i>	<i>24</i>

CAPITULO II.- ANTECEDENTES HISTORICOS.....	27
---------------------------------------------------	-----------

CAPITULO III.- METODO DE RECUPERACION DE PAVIMENTOS CON CEMENTO.

<i>III.1.- Estudios previos.....</i>	<i>29</i>
<i>III.1.1.- Evaluación del pavimento.....</i>	<i>30</i>
<i>III.1.2.- Drenaje.....</i>	<i>32</i>
<i>III.1.3.- Tránsito de proyecto.....</i>	<i>32</i>
<i>III.1.4.- Servicios existentes.....</i>	<i>32</i>

<i>III.1.5.- Toma de muestras representativas.....</i>	<i>33</i>
<i>III.1.6.- Caracterización de los materiales del pavimento.....</i>	<i>33</i>
<i>III.2.- Materiales.....</i>	<i>34</i>
<i>III.2.1.- Características mecánicas.....</i>	<i>34</i>
<i>III.2.2.- Plazo de manejabilidad.....</i>	<i>35</i>
<i>III.2.3.- Estabilidad inmediata.....</i>	<i>36</i>
<i>III.2.4.- Dependencia de las resistencias mecánicas frente al grado de compactación alcanzado.....</i>	<i>36</i>
<i>III.2.5.- Fisuración por retracción térmica.....</i>	<i>37</i>
<i>III.2.6.- Materiales nuevos.....</i>	<i>38</i>
<i>III.3.- Normas.....</i>	<i>39</i>
<i>III.4.- Dimensionamiento de la rehabilitación del pavimento.....</i>	<i>40</i>
<i>III.5.- Ejecución de la obra.....</i>	<i>41</i>
<i>III.5.1.- Preparación de la superficie.....</i>	<i>42</i>
<i>III.5.2.- Extensión del cemento o conglomerante.....</i>	<i>42</i>
<i>III.5.3.- Escarificado y mezclado.....</i>	<i>43</i>
<i>III.5.4.- Ejecución de juntas transversales.....</i>	<i>44</i>
<i>III.5.5.- Compactación.....</i>	<i>45</i>
<i>III.5.6.- Afinamiento.....</i>	<i>45</i>
<i>III.5.7.- Curado y Protección del material recuperado.....</i>	<i>46</i>
<i>III.6.- Control de calidad.....</i>	<i>47</i>
<i>III.6.1.- Durante la ejecución de la obra.....</i>	<i>47</i>
<i>III.6.2.- Sobre la capa terminada.....</i>	<i>49</i>
<i>III.7.- Otros métodos.....</i>	<i>50</i>
<i>III.7.1.- Reciclado en sitio en caliente.....</i>	<i>50</i>
<i>III.7.2.- Reciclado en plantas en frío.....</i>	<i>51</i>
<i>III.7.3.- Reciclado en plantas en caliente.....</i>	<i>52</i>

CAPITULO IV.- MAQUINARIA Y EQUIPO.

<i>IV.1.- Distribuidores de conglomerante.....</i>	<i>53</i>
<i>IV.1.1.- Los que distribuyen el cemento en forma de polvo.....</i>	<i>54</i>
<i>IV.1.2.- Los que lo hacen en forma de lechada.....</i>	<i>55</i>
<i>IV.2.- Maquinaria recuperadora y estabilizadora de pavimentos.....</i>	<i>57</i>
<i>IV.2.1.- Recuperadora en frío de Wirtgen WR 2000.....</i>	<i>57</i>
<i>IV.2.2.- Recuperadora en frío de Wirtgen WR 2500 S.....</i>	<i>59</i>

<i>IV.2.3.- Recuperadoras Caterpillar.....</i>	<i>62</i>
<i>IV.3.- Equipo para la elaboración de juntas en fresco.....</i>	<i>62</i>
<i>IV.3.1.- Equipos del orden de un tercio del espesor de la capa.....</i>	<i>63</i>
<i>IV.3.2.- Equipos para la totalidad de la capa.....</i>	<i>64</i>
<i>IV.3.2.1.- Equipo CRAFT.....</i>	<i>64</i>
<i>IV.3.2.2.- Equipo OLIVIA.....</i>	<i>66</i>
<i>IV.3.2.3.- Juntas activas.....</i>	<i>69</i>
<i>IV.4.- Equipo de compactación y afinamiento.....</i>	<i>70</i>

CAPITULO V.- VENTAJAS DEL METODO.

<i>V.1.- Caso de recuperación de pavimentos con cemento en obra.....</i>	<i>71</i>
--------------------------------------------------------------------------	-----------

CONCLUSIONES.....	78
--------------------------	-----------

FUENTES DE INFORMACION.....	80
------------------------------------	-----------

INTRODUCCION.

En el presente trabajo de investigación se describe de manera detallada la técnica de recuperación de pavimentos con cemento Pórtland en obra, mencionando los conceptos generales que se deben tener en cuenta de un pavimento, desde su definición, clasificación; composición hasta los diferentes deterioros que suelen presentar los pavimentos. Posteriormente, se mencionan todos los estudios necesarios para poder llevar a cabo, si fuera necesario, el trabajo de recuperación con cemento Pórtland, así como el proceso de ejecución de la obra. Además de mostrar la maquinaria y equipos modernos necesarios para realizar el trabajo de recuperación del pavimento. Por último, se presenta un ejemplo que además de ser real se llevo a cabo en nuestro país México, mencionando algunas de las ventajas obtenidas con esta técnica de recuperación, que resulta ser una buena opción en lo que respecta a la conservación y mantenimiento de caminos.

Hoy en día en nuestro país no existen manuales actualizados que hagan referencia a este tema, por lo que la empresa CEMEX se encuentra realizando una guía más completa para tener una actualización de esta técnica y a su vez contemplar casos Mexicanos.

CAPITULO I.-CONCEPTOS GENERALES.

Si bien el transporte automotriz ha venido a facilitar la vida del hombre y a influir de manera notable en el desarrollo de sus actividades económicas y sociales, también ha llegado a constituir una de las importantes causas de accidentes mortales generando miles de muertes cada año.

Debido a que el pavimento es la estructura principal de una vía de comunicación como pueden ser las carreteras o vialidades en zonas urbanas, es importante mantenerlo en óptimas condiciones para poder contar con la mejor seguridad en su operación.

I.1.- PAVIMENTO.

Puede definirse como pavimento *un sistema formado por capas de material terreo, que funciona obedeciendo determinadas leyes físicas, reaccionando en forma de respuestas cuando es activado por funciones de excitación y que tiene como función permitir el tránsito de vehículos en buenas condiciones de servicio (seguridad, comodidad, eficiencia, etc.).* Las leyes físicas consideradas indicaran la forma en que se relacionen los esfuerzos, deformaciones unitarias, tiempo y temperatura (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000).

Al actuar sobre el sistema las funciones de excitación, como las cargas aplicadas p , por ejemplo, los vehículos, el sistema genera respuestas mecánicas inmediatas, derivadas de las leyes físicas involucradas y que se identifican como estados de esfuerzos (σ), de deformaciones unitarias (ξ) y de deflexiones (δ), a los cuales están asociados determinados efectos, conocidos como deterioros, que son funciones del tiempo, cargas y repeticiones, y que se caracterizan por ser acumulativos, progresivos, permanentes e interactuantes, identificados como agrietamientos, deformaciones, desintegración y reducción de la resistencia al derrapamiento, además del fenómeno de bombeo y escalonamiento entre juntas, en el caso de pavimentos rígidos (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000).

La presencia repetida de los estados de respuesta tiene un efecto progresivo en los deterioros, produciéndose la degradación gradual del pavimento, hasta alcanzar determinados valores críticos, límite o terminales, que constituyen un estado de falla del pavimento, momento en el cual el pavimento ha llegado al final de su vida útil al dejar de ser capaz de cumplir con su función (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000).

El pavimento como sistema esta caracterizado por las propiedades, espesores y disposición de los materiales, así como por la calidad en la construcción, en la cual tiene gran importancia las especificaciones, la supervisión de la obra y el control de calidad ejercido.

Los pavimentos están constituidos por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales y de varios centímetros de espesor, de diferentes materiales térreos, adecuadamente compactados. Estas capas se apoyan en la capa subrasante, constituida por el terreno natural o por material seleccionado y han de soportar las cargas del tránsito durante un periodo de varios años, sin deterioros que afecten a la seguridad o a la comodidad de los usuarios o a la propia integridad del pavimento (Fig. 1) (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000).

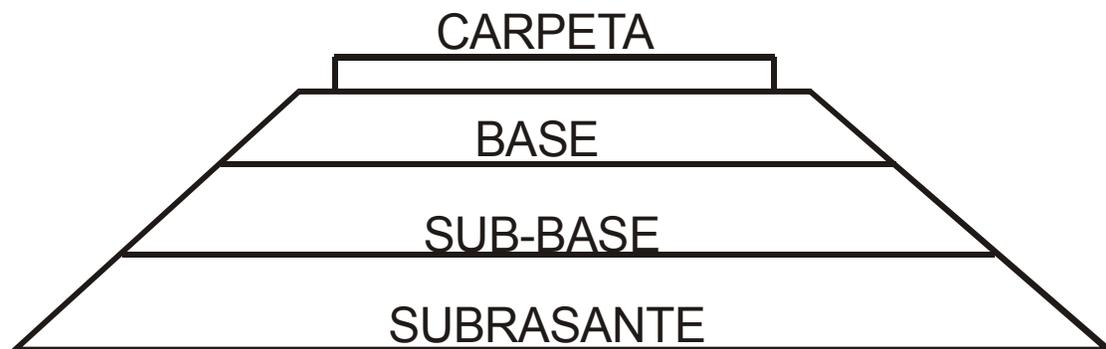


Fig. 1.- Esquema general de un pavimento.

I.2.- FUNCIONES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS PAVIMENTOS.

I.2.1.- FUNCIONES DE LOS PAVIMENTOS.

Con relación a las funciones que deben desempeñar los pavimentos se encuentran las siguientes:

- Proporcionar una superficie de rodamiento segura, cómoda y de características permanentes bajo las cargas repetidas del tránsito a lo largo de un periodo de tiempo, denominado ciclo de vida o vida de diseño, durante el cual solamente deberá necesitar algunas acciones esporádicas de conservación, sean locales o de poca magnitud en importancia y costo (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000).
- Resistir las solicitaciones del tránsito previsto durante la vida de diseño y distribuir las presiones verticales ejercidas por las cargas, de forma que a la capa subrasante sólo llegue una pequeña fracción de ellas, que sean compatibles con su capacidad de soporte. Además de que las deformaciones que se produzcan tanto en la capa subrasante como en las diferentes capas del pavimento deberán ser admisibles, tomando en cuenta la repetición de cargas y la resistencia a la fatiga de los materiales (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000).
- Construir una estructura resistente a los factores climatológicos, en especial de la temperatura y del agua, presentando una rápida eliminación del agua superficial, por sus efectos adversos en el comportamiento de los materiales del pavimento y de los suelos de cimentación (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000).

De acuerdo a las características que deben de poseer los pavimentos podemos dividirlos en características *funcionales* o *superficiales* (que afectan especialmente a los usuarios) y características *estructurales*.

I.2.2.- CARACTERISTICAS FUNCIONALES O SUPERFICIALES.

Entre las características *funcionales o superficiales* pueden citarse:

1. La resistencia al derrapamiento obtenida a través de una adecuada textura superficial, adaptada a las velocidades previstas de circulación y cuya influencia en la seguridad vial es decisiva (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000).
2. La regularidad superficial del pavimento, tanto transversal como longitudinal, que afecta a la comodidad de los usuarios en mayor o menor medida en función de las longitudes de onda de las deformaciones y de la velocidad de circulación. Esta característica esta ligada directamente a la facilidad de eliminar el agua superficial, que también afecta a la seguridad del usuario (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000).
3. Las propiedades de reflexión luminosa, son importantes para la conducción nocturna y para el diseño adecuado de las instalaciones de iluminación; de igual forma es importante el color del pavimento para efectos de contraste con el señalamiento del piso (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000).
4. El desagüe superficial, en presencia de agua, debe ser rápido para limitar el espesor de la película de agua, salpicaduras, etc., mediante pendientes adecuadas que conduzcan el agua hacia los dispositivos de drenaje (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000).

I.2.3.- CARACTERISTICAS ESTRUCTURALES.

Por su parte, las características *estructurales* son de especial interés para la conservación y operación de los pavimentos, por lo tanto están relacionadas con las características de los materiales que se emplean en las diferentes capas del pavimento, en particular con las mecánicas, y con los espesores de estas capas. Un análisis mecánico da una idea de los efectos de las cargas del tránsito, en cuánto a estados de esfuerzo, deformaciones unitarias y deflexiones. Si se conocen las leyes de fatiga de los materiales, es posible estimar el número de aplicaciones de cargas que pueden soportar las distintas capas o su durabilidad y, por tanto, la del pavimento en su conjunto (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000).

I.3.- TIPOS DE PAVIMENTO.

Actualmente se cuenta con una gran variedad de pavimentos que, siguiendo los criterios tradicionales, suele clasificarse en dos grandes grupos que son los *flexibles* y los *rígidos*.

I.3.1.- PAVIMENTOS FLEXIBLES.

Están formados por una serie de capas constituidas por materiales con una resistencia a la deformación que inicialmente va decreciendo con la profundidad, de modo análogo a la disminución de las presiones transmitidas desde la superficie y cuentan con una capa de rodamiento constituida por mezcla asfáltica (Fig.1), por lo que también se les denomina pavimentos asfálticos (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000).

Dentro de este grupo se consideran aquellos pavimentos flexibles que por cuestiones de aumento en las intensidades y número de aplicaciones de carga, sus capas han sido tratadas o estabilizadas con cemento Pórtland los cuales podríamos denominar como pavimentos *semirrígidos* (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000). Estos pavimentos suelen incluirse formalmente al grupo de los flexibles, debido a que cuentan con una carpeta asfáltica, como superficie de rodamiento, pero su comportamiento estructural es muy diferente, por tener capas inferiores de igual o mayor rigidez que las superiores.

I.3.2.- PAVIMENTOS RÍGIDOS.

Los pavimentos rígidos constan de una losa de concreto hidráulico (Fig.2). Por su mayor rigidez distribuyen las cargas verticales sobre un área grande y con presiones muy reducidas. Salvo en los bordes de las losas y juntas sin pasajuntas, las deflexiones o deformaciones elásticas son casi inapreciables (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000).

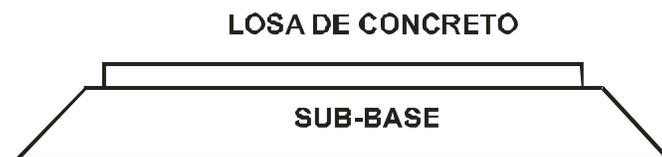


Fig. 2.- Pavimento rígido.

Existen otros tipos de pavimento que se pueden considerar como pavimentos mixtos o compuestos, estos están constituidos por una capa de concreto hidráulico, cubierta por una carpeta asfáltica. Se emplean en calles y su justificación se basa entre otras razones en la presencia de redes y servicios bajo la vialidad, que han de protegerse de la acción del tránsito o que su posición impide efectuar excavaciones de mayor profundidad para alojar una estructura de pavimento flexible convencional (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000).

I.4.- ESTRUCTURA DE UN PAVIMENTO.

La estructura de los pavimentos flexibles y semirrigidos están constituidos por varias capas denominadas de arriba hacia abajo como *carpeta*, *base* y *subbase*, respectivamente.

I.4.1.- CARPETA

La carpeta es la parte que soporta directamente las solicitaciones del tránsito y aporta las características funcionales, mencionadas anteriormente. Estructuralmente, absorbe los esfuerzos horizontales y parte de los verticales. En condiciones de alta intensidad de tránsito, pueden llegar a alcanzar espesores importantes (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000).

I.4.2.- BASE

La base es la capa situada debajo de la carpeta. Su función es la de absorber la mayor parte de los esfuerzos verticales y su rigidez o su resistencia a la deformación bajo las solicitaciones repetidas del tránsito suele corresponder a la intensidad del tránsito pesado. Para tránsito medio y ligero se emplean las bases granulares, pero para tránsito pesado se emplean ya materiales granulares tratados con un cementante, normalmente bases de mezcla asfáltica o bases de grava-cemento (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000).

El material (cribado, parcialmente triturado, totalmente triturado o mezclado) que se emplea en la construcción de bases para pavimentos asfálticos deberá cumplir con las siguientes características de granulometría que se muestran en la tabla 1 y se muestran en la figura 3, y con los requisitos de calidad que se muestran en la tabla 2, de acuerdo con la norma N-CMT-4-02-002/04 (Materiales para Bases.Hidráulicas).

Malla		Porcentaje que pasa	
Abertura mm	Designación	$\Sigma L \leq 10^6$	$\Sigma L > 10^6$
37.5	1 1/2"	100	100
25	1"	70 - 100	70 - 100
19	3/4"	60 - 100	60 - 86
9.5	3/8"	40 - 100	40 - 65
4.75	No.4	30 - 80	30 - 50
2	No.10	21 - 60	21 - 36
0.85	No.20	13 - 44	13 - 25
0.425	No.40	8 - 31	8 - 17
0.25	No.60	5 - 23	5 - 12
0.15	No.100	3 - 17	3 - 9
0.075	No.200	0 - 10	0 - 5

Tabla 1.- Requisitos de granulometría de los materiales para base de pavimentos asfálticos.

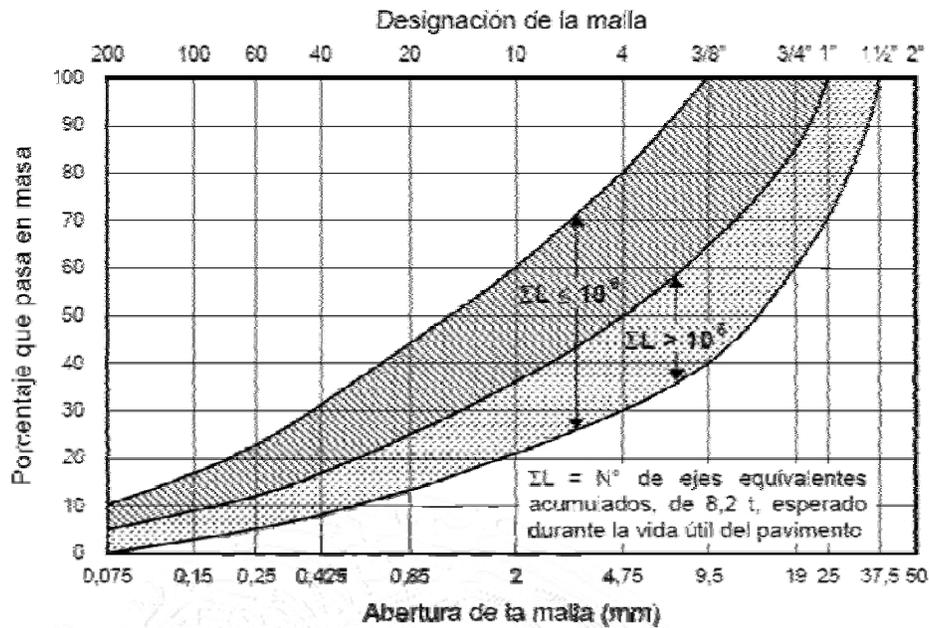


Fig. 3.- Zonas granulométricas recomendables de los materiales para base de pavimentos asfálticos.

CARACTERISTICA	VALOR %	
	$\Sigma L \leq 10^6$	$\Sigma L > 10^6$
Limite liquido, máximo	25	25
Índice plástico, máximo	6	6
Equivalente de arena, mínimo	40	50
Valor Soporte de California (CBR), mínimo	80	100
Desgaste Los Ángeles, máximo	35	30
Partículas alargadas y lajeadas, máximo	40	35
Grado de compactación, mínimo	100	100

Tabla 2.- Requisitos de calidad de los materiales para bases de pavimentos asfálticos (ΣL , numero de ejes equivalentes de 8.2 t, esperado durante la vida útil del pavimento).

Cuando $\Sigma L > 1 \times 10^7$ el material deberá de ser 100 % trituración de roca sana, en cambio si los valores varían desde $1 \times 10^5 < \Sigma L < 1 \times 10^7$ el material tendrá como mínimo 75% de material producto de trituración de roca sana y por último si $\Sigma L < 1 \times 10^5$ el material tendrá un valor como mínimo de 50% de material triturado.

1.4.3.- SUBBASE.

La subbase es la capa situada debajo de la base y sobre la capa subrasante. Esta capa puede no ser necesaria cuando la capa subrasante es de elevada capacidad de soporte. Su función es la de proporcionar a la base un cimiento uniforme y construir una adecuada plataforma de trabajo para su colocación y compactación (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000).

Es deseable que cumpla con una función drenante, para lo cual es imprescindible que los materiales utilizados carezcan de finos y en todo caso suele ser una capa de transición necesaria. Se emplean normalmente subbases granulares constituidas por materiales cribados o de trituración parcial, suelos tratados con cemento, etc. (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000).

El material (natural, cribado, parcialmente triturado, totalmente triturado o mezclado) que se emplea en la construcción de subbases para pavimentos asfálticos deberá cumplir con las siguientes características granulométricas que se muestran en la tabla 3 y se muestran en la figura 4, y con los requisitos de calidad que se muestran en la tabla 4, de acuerdo con la norma N-CMT-4-02-001/04 (Materiales para Subbases).

Malla		Porcentaje que pasa	
Abertura mm	Designación	$\Sigma L \leq 10^6$	$\Sigma L > 10^6$
50	2"	100	100
37.5	1 1/2"	72 - 100	72 - 100
25	1"	58 - 100	58 - 100
19	3/4"	52 - 100	52 - 100
9.5	3/8"	40 - 100	40 - 100
4.75	No.4	30 - 100	30 - 80
2	No.10	21 - 100	21 - 60
0.85	No.20	13 - 92	13 - 45
0.425	No.40	8 - 75	8 - 33
0.25	No.60	5 - 60	5 - 26
0.15	No.100	3 - 45	3 - 20
0.075	No.200	0 - 25	0 - 15

Tabla 3.- Requisitos de granulometría de los materiales para subbases de pavimentos asfálticos.

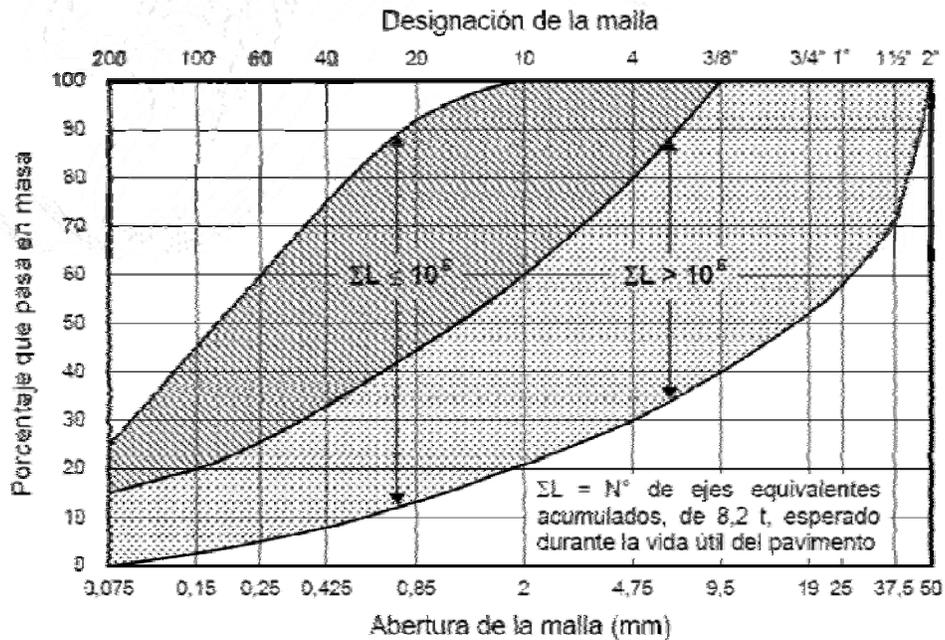


Fig. 4.- Zonas granulométricas recomendables de los materiales para subbases de pavimentos asfálticos.

CARACTERISTICA	VALOR %	
	$\Sigma L \leq 10^6$	$\Sigma L > 10^6$
Limite liquido, máximo	30	25
Índice plástico, máximo	10	6
Equivalente de arena, mínimo	50	60
Valor Soporte de California (CBR), mínimo	30	40
Desgaste Los Ángeles, máximo	50	40
Grado de compactación, mínimo	100	100

Tabla 4.- Requisitos de calidad de los materiales para subbases de pavimentos asfálticos (ΣL , numero de ejes equivalentes de 8.2 t, esperado durante la vida útil del pavimento).

I.5.- CRITERIOS DE DISEÑO.

Para el diseño o dimensionamiento de pavimentos existen varios métodos desarrollados por diferentes organismos, cuya aplicación se basa principalmente en los siguientes criterios:

1) TRANSITO.

Interesan las cargas más pesadas por eje (simple, tandem o triple) esperadas en el carril de proyecto (que generalmente es el mas solicitado y que determina la estructura del pavimento de la vialidad), durante el periodo de proyecto adoptado. Sin embargo, en los casos de vialidades con carriles múltiples podrá realizarse un diseño con estructuras y espesores diferenciados. La repetición de cargas y la acumulación de sus efectos sobre el pavimento, como la fatiga son fundamentales para el cálculo. Además se tendrán en cuenta las máximas presiones de contacto, las sollicitaciones tangenciales en tramos especiales (curvas, zonas de frenado y aceleración, etc.), las velocidades de aplicación (en particular, las lentas en rampas y zonas de estacionamiento de vehículos pesados), la canalización del tránsito, etc. El tránsito generalmente se establece como numero de ejes acumulados de 8.2 ton (18000 lb.), en el periodo de diseño (ΣL), donde los diversos tipos de vehículos se convierten a rueda de diseño (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000).

2) CAPA SUBRASANTE.

Como parámetro fundamental se emplea la capacidad de soporte o resistencia a la deformación por esfuerzo cortante bajo las cargas de tránsito. Debe tenerse en cuenta la sensibilidad del suelo a la humedad, tanto en lo que se refiere a su resistencia como a las eventuales variaciones de volumen (expansión-contracción). Generalmente el parámetro de resistencia utilizado para caracterizar la resistencia de los materiales, es el *Valor Relativo Soporte* (VRS) o *Valor Soporte de California* (CBR), si bien actualmente algunos métodos emplean el *Modulo de Resiliencia* (M_R), siendo común además manejar correlaciones entre VRS o CBR y M_R (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000).

3) CLIMA.

Debe tenerse en cuenta en la selección de los materiales y en determinados elementos colaterales, como el drenaje. En el diseño de la propia estructura del pavimento interesa su comportamiento bajo efectos de temperatura y humedad. Son objeto de consideración las temperaturas extremas diarias y estacionales, así como el régimen de intensidad de las precipitaciones, aspectos que deben tomarse muy en cuenta en los aspectos constructivos (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000).

4) MATERIALES DISPONIBLES.

Son determinantes para la selección de la estructura del pavimento en la forma más adecuada técnica y económicamente. Por una parte se consideran los agregados disponibles en los bancos de materiales de la zona. Además de la calidad requerida, en la que se incluye la deseada homogeneidad, deben verificarse las cantidades disponibles, el suministro y su precio, condicionado en gran medida por la distancia de transporte (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000).

5) DRENAJEY SUBDRENAJE.

El agua es uno de los factores que más contribuye en el deterioro de los pavimentos, debido a lo cual se le deberá conceder importancia al rápido desalojo del agua, evitando su concentración tanto en la superficie como en alguna de las capas que constituyen el pavimento, incluyendo la capa subrasante. Existen varias formas en que el agua puede entrar a la estructura del pavimento y a la capa subrasante, como grietas, baches y juntas, jardinería y camellones, fugas en los sistemas de drenaje y agua potable, posición del nivel freático, ascensión capilar, etc. (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000)

I.6.- TIPOS DE DETERIOROS.

El deterioro es toda aquella condición que presenta la superficie de rodamiento, la cual representa una pérdida de las características de servicio para las que fue diseñado el pavimento (Córdova, 20005).

El origen de los daños se debe principalmente a:

- a) Mala calidad de los materiales del pavimento (Córdova, 20005).
- b) Procedimiento constructivo inadecuado (Córdova, 20005).
- c) Presencia de agua en las capas del camino (Córdova, 20005).
- d) Envejecimiento de la carpeta (Córdova, 20005).

I.6.1.- *DETERIOROS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES.*

Los deterioros que presentan los pavimentos flexibles se clasifican de acuerdo al daño ocasionado, a continuación se presenta una clasificación general de estos.

I.6.1.1.- *DETERIOROS DE LA SUPERFICIE.*

- Desprendimientos de tratamientos superficiales que consiste en pérdida parcial del agregado dejando expuestas áreas aisladas de la capa de apoyo (Fig. 5) y desprendimientos de capas asfálticas que consisten en pérdida en la superficie de los agregados de capas asfálticas con espesores mayores que 5 cm. (Fig. 6) (Córdova, 20005).



Fig. 5.-De tratamientos superficiales



Fig. 6.- De capas asfálticas.

- Pérdida de capa de rodamiento.- Que consiste en el desprendimiento de la ultima capa delgada de tratamiento superficial (Fig. 7), tales como: micro-carpetas (1 a 2 cm.) o capas de rodadura (2 a 3 cm.) (Córdova, 20005).



Fig. 7.- Pérdida de la capa de rodamiento.

- Pérdida de base (calavereo o bacheo superficial).- Consiste en desprendimiento de material de la base en la que se apoya la capa de rodamiento (carpeta) después de la pérdida de esta, generalmente en bases no tratadas (Fig. 8) (Córdova, 20005).

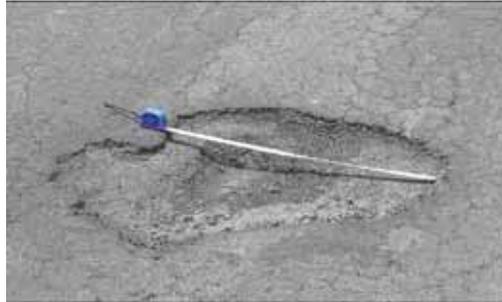


Fig. 8.- Calavereo.

- Exudación de asfalto.- Presencia de asfalto sin agregados (árídos) en la superficie (Fig. 9) (Córdova, 20005).



Fig. 9.- Exudación de asfalto.

- Pulimentó de áridos (Fig. 10).- Presencia de agregados (árídos) que presentan una cara plana en la superficie, generalmente embebidos en el ligante (asfalto) (Córdova, 20005).



Fig. 10.- Pulimento de agregados.

- Exposición de agregados.- Presencia de agregados (Fig. 11) parcialmente expuestos fuera del mortero ligante (asfalto)-arena (Córdoba, 20005).



Fig. 11.- Exposición de agregados.

I.6.1.2.- DETERIOROS DE LA ESTRUCTURA.

- Roderas.- Deformación del perfil transversal por hundimientos a lo largo de las rodadas, con la aparición de cordones laterales a cada lado de la rodera (Fig. 12) (Córdoba, 20005).



Fig. 12.- Rodera.

- Canalizaciones.- Deformación del perfil transversal, tanto por hundimiento a lo largo de las rodadas como por elevación de las áreas vecinas adyacentes a las rodadas, las deformaciones presentan una configuración más amplia que las roderas (Fig. 13) (Córdoba, 20005).



Fig. 13.- Canalizaciones.

- Baches profundos.- Hundimiento local de la calzada, con agrietamiento en malla cerrada y generalmente pérdida parcial de bloques de la carpeta (Fig. 14) (Córdova, 2005).



Fig. 14.- Bache profundo.

- Ondulaciones.- Deformaciones del perfil longitudinal con crestas y valles regularmente espaciados a distancias cortas, generalmente están acompañadas, en los sitios críticos, por grietas semicirculares (Fig. 15) (Córdova, 2005).



Fig. 15.- Ondulaciones.

- Grietas longitudinales.- Rotura longitudinal, sensiblemente paralela al eje del camino con abertura mayor a 3mm (Fig. 16) (Córdova, 20005).



Fig. 16.- Grieta longitudinal.

- Grietas transversales.- Rotura transversal sensiblemente perpendicular al eje del camino, con abertura mayor a 3mm (Fig. 17) (Córdova, 20005).



Fig. 17.- Grieta transversal.

- Fisuras en malla.- Rotura transversal o longitudinal, con abertura menor a 3mm y separación mayor que 15 cm. (Fig. 18) (Córdova, 20005).



Fig. 18.- Fisura en malla.

- Malla cerrada (piel de cocodrilo).- Rotura transversal o longitudinal, con abertura creciente según avanza el deterioro y separación menor que 15 cm., generalmente presenta hundimiento en el área afectada (Fig. 19) (Córdova, 20005).



Fig. 19.- Piel de cocodrilo.

- Agrietamiento por fatiga o envejecimiento.- Daño o deterioro causado en un material por la acumulación repetida de esfuerzos o deformaciones muy inferiores a los que causarían la rotura del mismo con una sola aplicación (Fig. 20). Generalmente los esfuerzos o deformaciones son menores a 1/3 de la resistencia máxima a tensión (rango elástico) (Córdova, 20005).



Fig. 20.- Agrietamiento por fatiga o envejecimiento.

I.6.1.3.- DETERIOROS POR DEFECTOS CONSTRUCTIVOS.

Deterioros que se presentan por defectos en la construcción (Fig. 21) de instalaciones bajo los pavimentos, siguen un patrón bien definido en concordancia con la instalación, se muestra como hundimientos localizados, grietas longitudinales o transversales, etc. (Córdova, 20005).



Fig. 21.- Deterioros por defectos constructivos.

I.6.2.- DETERIOROS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS.

En los pavimentos rígidos (concreto hidráulico) existen dos tipos de fallas o deterioros que son por *fallas en el proceso constructivo y agrietamientos (estructurales y funcionales)* (CEMEX Concretos, 2004).

I.6.2.1.- FALLAS EN EL PROCESO CONSTRUCTIVO.

Las fallas o deterioros en el proceso constructivo que presentan los pavimentos de concreto hidráulico (rígidos) son los siguientes:

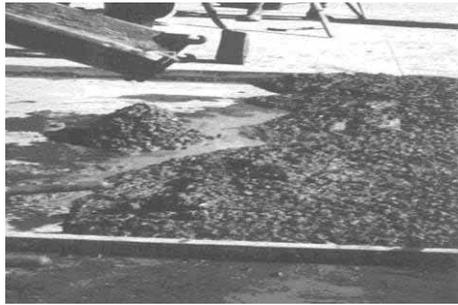
- Base deficientemente compactada (Fig. 22a).
- Equipo inadecuado (Fig. 22b).
- Exceso de agua de lavado (Fig. 22c).
- Vibrado deficiente (Fig. 22d).



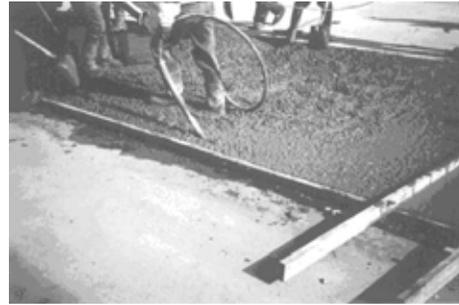
a)



b)



c)



d)

Fig. 22.- a) Base deficientemente compactada. b) Equipo inadecuado. c) Exceso de agua de lavado. d) Vibrado deficiente.

- Capacidad de soporte variable (Fig. 23a).
- Baches no perfilados previos al colado (Fig. 23b).
- Preparación deficiente de la superficie (Fig. 23c).



a)



b)



c)

Fig. 23.- a) Capacidad de soporte variable. b) Bache no perfilado. c) Preparación deficiente de la superficie.

- Limpieza deficiente (Fig. 24a).
- Tránsito a edad temprana del concreto (1 día) (Fig. 24b).



a)



b)

Fig. 24.- a) Limpieza deficiente. b) Tránsito a edad temprana del concreto.

- Corte a destiempo de juntas (Fig. 25a).
- Corte de juntas en concreto fresco (Fig. 25b).
- Discontinuidad del corte en juntas (Fig. 25c)



a)



b)



c)

Fig. 25.- a) Corte a destiempo de juntas. b) Corte de juntas en concreto fresco. c) Discontinuidad del corte en juntas.

- Hundimiento relativo del pavimento por saturación de la base (Fig. 26a).
- Texturizado extemporáneo (Fig. 26b).
- Espesor deficiente de 3" a 4" (Fig. 26c)



a)



b)



c)

Fig. 26.- a) Hundimiento relativo del pavimento por saturación de la base b) Texturizado extemporáneo
c) Espesor deficiente

1.6.2.2.- AGRIETAMIENTOS.

Los agrietamientos que presentan los pavimentos de concreto hidráulico (rígido), pueden ser estructurales y funcionales, a continuación se presentan algunos ejemplos de ellos.

- Agrietamiento en forma de red de gallinero (Fig. 27a).
- Superficie polvosa “Agua excedente” (Fig. 27b).
- Superficie escamosa (agregado expuesto) descaramiento del mortero (Fig. 27c).

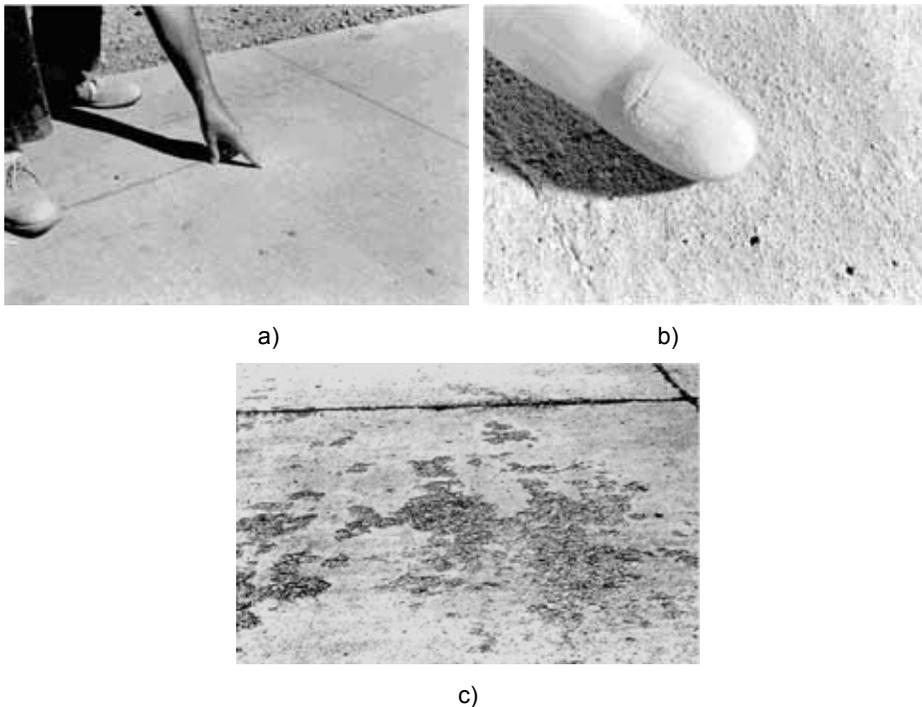


Fig. 27.- a) Agrietamiento en forma de red de gallinero b) Superficie polvosa “Agua excedente. c) Superficie escamosa.

- Desprendimientos (popouts) (Fig. 28a).
- Ampollas (Fig. 28b).



a)



b)

Fig. 28.- a) Desprendimientos. b) Ampollas.

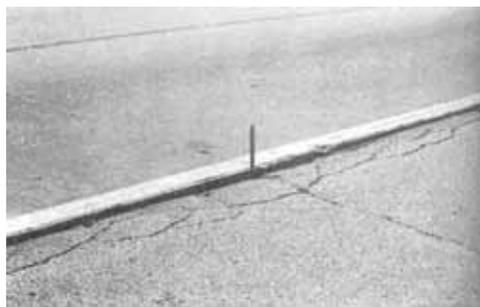
- Levantamientos (Fig. 29a).
- Rompimientos de esquinas (Fig. 29b).
- Desnivel en hombro de camino y acotamiento (Fig. 29c).



a)



b)



c)

Fig. 29.- a) Levantamientos. b) Rompimientos de esquinas. c) Desnivel en hombro de camino y acotamiento.

- Agrietamientos longitudinales (Fig. 30a).
- Falla en junta longitudinal (Fig. 30b).
- Aumento de volumen en losa (Swell) (Fig. 30c).



a)



b)



c)

Fig. 30.- a) Agrietamientos longitudinales. b) Falla en junta longitudinal. c) Aumento de volumen en losa (Swell).

CAPITULO II.- ANTECEDENTES HISTORICOS.

Uno de los primeros precedentes a nivel mundial del uso de técnicas de recuperación o reciclado, se dio después de la Segunda Guerra Mundial. Cuando para reparar las carreteras afectadas por la misma se puso en practica en el Reino Unido un procedimiento conocido como “Retread Process” o proceso de recauchutado (Jofré, 2003-1).

El cual consistía en escarificar el pavimento, añadir en caso de ser necesario una pequeña cantidad de agregados pétreos (áridos), y mezclar en el lugar el material escarificado con el aportado con ayuda de una motoniveladora. A continuación se regaba con una emulsión asfáltica de bajo contenido de ligante, e inmediatamente se procedía al mezclado. El primer día solo se compactaba muy ligeramente el material mezclado, puesto que tenía mucha agua, y al día siguiente se terminaba la compactación (Jofré, 2003-1).

Se trataba de un procedimiento muy simple pero que, ejecutado correctamente, proporcionaba resultados satisfactorios. El cual se siguió utilizando de forma no muy generalizada, debido a que los equipos no podían garantizar una mezcla adecuada ni tampoco una compactación eficaz en espesores superiores a 15 cm., cifra que en la actualidad se considera como limite inferior para poder obtener una capa recuperada con una correcta capacidad de soporte (Jofré, 2003-1).

A mediados de los años 80 fue cuando la recuperación en obra con adición de cemento Pórtland para el acondicionamiento de carreteras se desarrolló con un éxito notable, debido principalmente a tres factores:

1. Un mejor conocimiento de las características mecánicas de los materiales tratados con cemento Pórtland (Jofré, 2003-1).
2. El empleo de nuevos equipos de mayor potencia, rendimiento y profundidad de trabajo, que proporciona una mayor calidad del producto final y por otra parte se traduce en una reducción de costos (Jofré, 2003-1).
3. La creciente conciencia ecológica, que ha impulsado esta técnica por los benéficos al medioambiente (Jofré, 2003-1).

En la actualidad la recuperación con cemento Pórtland es una técnica muy utilizada en un importante número de países repartidos en el mundo. Entre los países líderes se encuentran Australia, Estados Unidos, Francia, Sudáfrica y España, en México se ha desarrollado un importante interés en los últimos años por esta técnica de recuperación, la cual se ha utilizado en obras importantes de recuperación de carreteras como por ejemplo en la carretera México-Querétaro en el tramo Tepozotlán-Palmillas en sus dos cuerpos A y B; o en la carretera León-Lagos de Moreno-Aguascalientes (Fig. 31). Sus aplicaciones no solo se limitan a pavimentos de carreteras, sino también en vías urbanas, así como su empleo en algunos aeropuertos.



Fig. 31.- Recuperación con cemento Pórtland en obra de la carretera León-Lagos de Moreno-Aguascalientes.

Como resultado de esta amplia experiencia, la técnica de recuperación o reciclado con cemento Pórtland en obra, empleado en un principio en vías de baja intensidad de tránsito, se aplica ya en carreteras con un importante volumen de vehículos pesados.

Como consecuencia de este desarrollo, varias administraciones internacionales han publicado o tienen muy avanzada la elaboración de prescripciones o guías técnicas para el proyecto o ejecución de reciclados con cemento Pórtland en obra; entre los países que se encuentran realizando estas guías están Japón, España, Alemania, Francia, Inglaterra, el estado de Nueva Gales en Australia y en el caso de México, CEMEX se encuentra elaborando una guía técnica.

CAPITULO III.- MÉTODO DE RECUPERACIÓN DE PAVIMENTOS CON CEMENTO

El proceso de recuperación o reciclado de pavimentos consiste en desintegrar en el lugar y en frío la carpeta y parte o toda la base para eliminar el agrietamiento por fatiga y las deformaciones permanentes, mezclar el material recuperado con cemento Pórtland o emulsión asfáltica y recomprimir para mejorar las características de resistencia de la base nueva y sobre esta colocar una carpeta que funcione estructuralmente o solo como superficie de rodamiento (Capistran y cols., 2006).

El proceso de recuperación o reciclado es recomendado aplicarlo a pavimentos que presenten las siguientes características:

- Carpetas con agrietamiento por fatiga debido a la falta de soporte de la base.
- Pavimentos con deformaciones debido a deficiencias en la carpeta y base.
- Pavimentos con base de comportamiento deficiente por exceso de arcilla.
- Pavimentos con espesores robustos debidos a sobrecarpetas.

III.1.- ESTUDIOS PREVIOS.

En la técnica de recuperación de pavimentos que se realiza en el lugar de obra se aprovecha el pavimento existente como depósito de materiales pétreos. Por ello, para poder llevar a cabo el trabajo de recuperación es necesario conocer previamente las características de los materiales existentes, el espesor de las capas de dicho pavimento y el nivel de deterioro de la superficie.

Antes de efectuar un trabajo de reciclado o recuperación es necesario realizar una serie de estudios previos con objeto de verificar la factibilidad del trabajo, de definir el tipo de recuperación y de determinar las características del material recuperado.

La factibilidad de un trabajo de recuperación debe ser establecida mediante el conocimiento de la estructura del pavimento y de las características de los materiales que lo componen. Para ello se debe proceder a una evaluación del pavimento y a la obtención de otros datos como son el de tránsito, clima y drenaje.

III.1.1.- EVALUACIÓN DEL PAVIMENTO.

El objetivo de esto es el de reunir el mayor número de elementos que permitan identificar el estado actual del pavimento, así como la naturaleza y espesores de las capas que lo componen. Los datos que se deben obtener son los siguientes:

- 1) Información histórica.- Comprende la información referente a la construcción del camino o vialidad, materiales empleados en la construcción, trabajos anteriores que se le hayan realizado al camino, entorno geográfico y clima.
- 2) Inventario físico.- Características de la superficie de rodamiento, obras inducidas, obras complementarias, estructuras existentes, etc. (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000)
- 3) Estructura del pavimento existente a lo largo del tramo a recuperar mediante sondeos y pruebas de laboratorio.
- 4) Índice de Servicio Actual (ISA).- Este índice nos da una idea cualitativa de las condiciones de la superficie de rodamiento de un camino. Se obtiene con 5 personas a bordo de un vehículo en buenas condiciones, transitando a la velocidad de operación del camino en estudio; cada persona anota la calificación (de 0 a 5) que le asigna al tramo en estudio, en función de la comodidad que siente durante el viaje. La calificación final o ISA será el promedio aritmético de las calificaciones de cada evaluador, por tramos de un kilómetro y por sentido de circulación (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000). A continuación en la tabla 5 se muestra la escala de calificación del ISA.

ISA	ESTADO
1	MUY MALO
2	MALO
3	REGULAR
4	BUENO
5	MUY BUENO

Tabla 5.- Esquema de calificaciones del ISA.

5) Inventario de deterioros.- Recopilación visual de los deterioros que se encuentren en el pavimento existente, determinando tipo, grado y extensión de los mismos; como pueden ser pérdida de agregado fino, deformaciones transversales y longitudinales, agrietamientos, baches, etc. Con la ayuda de este inventario podemos tener una idea general del nivel de deterioro que muestra el pavimento; este levantamiento de daños debe realizarse por tramos, a manera de ejemplo a continuación en la tabla 6 se muestra un catálogo o inventario de deterioros.

CATALOGO DE DETERIOROS		
TIPO DE DETERIORO	DE KM 66+000 A KM 67+000	DE KM 67+000 A KM 68+000
PERDIDA DE AGREGADO GRUESO	N.P	1
PERDIDA DE AGREGADO FINO	2	2
EXUDACION DE ASFALTO	N.P	N.P
PULIMIENTO DE AGREGADOS	N.P	N.P
CALAVEREO	N.P	N.P
SUPERFICIE ONDULADA	2	2
INESTABILIDAD DE ACOTAMIENTOS	1	N.P
DEFORMACIONES TRASNVERSALES	2	1
DEFORMACIONES LONGITUDINALES	1	1
RODERAS	1	1
AGRIETAMIENTOS LONGITUDINALES	2	1
AGRIETAMIENTOS TRASNVERSALES	2	2
AGRIETAMIENTOS DE MAPA	2	2
AGRIETAMIENTOS PIEL DE COCODRILO	2	2
AGRIETAMIENTOS DE REFLEXION	1	1
BACHES REPARADOS	1	1
BACHES SIN REPARAR	N.P	N.P

Tabla 6.- Catálogo de deterioros de la carretera: Toluca-Palmillas del tramo: Atlacomulco-Lim.Edos.Mex/Qro.

- 6) Evaluación superficial.- Información obtenida por la inspección visual y las calificaciones logradas por el ISA y su evaluación general (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000).
- 7) Evaluación estructural.- Resultados obtenidos de los análisis de la capacidad estructural determinando la vida remanente y el refuerzo estructural (en caso de ser necesario) por los distintos tipos de prueba existentes como son la viga Benkelman (para medición de deflexiones), el método del Instituto Norteamericano del Asfalto, el método de Ingeniería de la UNAM (Edición 1980 y Edición 1999 el cual se apoya en el programa de computo DISPAV 5, versión 2.0) y el Dynaflect (para obtener módulos elásticos).

III.1.2.- *DRENAJE.*

Como en toda obra de recuperación es necesario detectar y corregir los problemas de drenaje que pudieran existir en la superficie, en cunetas, obras de desagüe superficial, drenes subterráneos, etc. En caso de ser necesario se reemplazarán por obras nuevas aquellas que estén demasiado dañadas o presenten insuficiencia en su capacidad estructural o hidráulica (Jofré, 2003-1).

III.1.3.- *TRANSITO DE PROYECTO.*

Para el dimensionamiento del pavimento es necesario conocer el tránsito diario promedio anual (TDPA) por sentido de circulación de los vehículos pesados durante el primer año después de haberse llevado a cabo el trabajo de recuperación y en el futuro (Jofré, 2003-1). Requieren de una especial atención las vías de baja intensidad de tránsito, con un uso intensivo estacional (camiones agrícolas, forestales, etc.).

III.1.4.- *SERVICIOS EXISTENTES.*

Debe obtenerse información de los servicios existentes, especialmente en el caso de reciclados de vías urbanas, a fin de evitar que se produzcan deterioros en los mismos, sobre todo si están a profundidad reducida y llevan muchos años instalados, por ejemplo las instalaciones de teléfono, de gas, de agua potable, etc. (Jofré, 2003-1).

III.1.5.- TOMA DE MUESTRAS REPRESENTATIVAS.

La toma de muestras de materiales se llevara a cabo en lugares precisos, para ello se recurre a sondeos o bien a calas en todo el ancho de la calzada, que permiten definir la naturaleza de los materiales existentes y la geometría del pavimento. La frecuencia depende del tipo e importancia de la obra. En general suelen ser suficientes dos sondeos y una cala por kilómetro (Jofré, 2003-1).

III.1.6 – CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES DEL PAVIMENTO.

Las muestras extraídas se analizan en el laboratorio con el fin de identificar la naturaleza y humedad del material de la capa superficial, la naturaleza y humedad de los materiales que componen las distintas capas del pavimento existente, y la eventual presencia de productos susceptibles de perturbar o impedir el fraguado del cemento como pueden ser las materias orgánicas, sulfuros (piritas), sulfatos (yesos) o cloruros (Jofré, 2003-1).

Para poder identificar los materiales se realizan las siguientes determinaciones:

- Granulometría; la curva de composición granulométrica permite juzgar la necesidad o no de un corrector granulométrico. Por otra parte, el tamaño máximo de las partículas del material pétreo condiciona la elección de los equipos para realizar el trabajo de recuperación.
- Estudio de finos; para determinar la cantidad y la actividad de la partículas arcillosas.

Para determinar la humedad de los materiales se debe determinar la humedad natural en el lugar del material a reciclar y la humedad óptima de compactación, una vez incorporado el cemento, mediante la prueba ASSHTO modificada.

La información obtenida por medio de los estudios previos nos permite juzgar si es factible realizar o no el trabajo de recuperación, en caso afirmativo se procede a dividir el camino en zonas homogéneas en cuanto a su comportamiento, estado y necesidades de refuerzo (Jofré, 2003-1).

III.2.- MATERIALES.

Como se ha mencionado anteriormente el pavimento existente se aprovecha como depósito de materiales pétreos, por ello, es importante conocer las características de estos materiales una vez ya reciclados, dentro de las cuales se encuentran sus características mecánicas.

III.2.1.- CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS.

Es indispensable conocer las características mecánicas de los materiales reciclados para poder establecer el porcentaje adecuado de cemento Pórtland y efectuar el dimensionamiento de la nueva estructura del pavimento, es decir, para determinar el espesor que ha de ser recuperado, así como el de la capa o capas de mezcla asfáltica (de ser necesarias) a disponer por encima del mismo (Jofré, 2003-1).

Debido a la gran heterogeneidad de los materiales que pueden encontrarse en las distintas obras, las características de las mezclas obtenidas como consecuencia del reciclado con cemento Pórtland tienen valores de rigidez y resistencia muy semejantes a los de una grava-cemento o incluso a las de un suelo-cemento (Jofré, 2003-1).

Por lo que, las mezclas obtenidas de un reciclado con cemento Pórtland se caracterizan por tener una mayor rigidez en comparación con la de los materiales de partida. Esto se traduce en un incremento muy notable de la capacidad de soporte con respecto a la del pavimento inicial y una importante disminución tanto de las deflexiones como de las tensiones transmitidas a la superficie (Jofré, 2003-1).

El comportamiento de los materiales recuperados con cemento Pórtland realmente obtenido in situ puede explicarse por numerosos factores, entre los que se encuentran los siguientes:

- El contenido de cemento Pórtland (Jofré, 2003-1).
- Los materiales que se reciclan: materiales de menor o mayor calidad, presencia de arcilla, espesor de mezcla asfáltica (Jofré, 2003-1).
- La eficacia del proceso de disgregación del pavimento y de mezcla con el conglomerante (Jofré, 2003-1).
- La densidad alcanzada en la compactación (Jofré, 2003-1).
- La humedad de la mezcla (Jofré, 2003-1).
- Edad del material (Jofré, 2003-1).

En cualquier caso, *las resistencias mecánicas se incrementan notablemente con el contenido de cemento Pórtland*, al igual que en el resto de los factores (Jofré, 2003-1).

III.2.2.- PLAZO DE MANEJABILIDAD.

Además de las características mecánicas mencionadas, los materiales reciclados con cemento Pórtland tienen otras propiedades muy similares a las de las gravas-cemento entre las que se encuentra el plazo de manejabilidad.

Como en cualquier mezcla con cemento Pórtland, la compactación de los materiales reciclados ha de finalizarse dentro del llamado plazo de manejabilidad. A medida que se va desarrollando el proceso de hidratación del conglomerante, empiezan a formarse un cierto número de enlaces cristalinos entre los materiales, los cuales pueden ser destruidos, sin posibilidad de regenerarse, por los esfuerzos originados por la compactación. En consecuencia, esta debe completarse antes de que se haya formado un número demasiado elevado de enlaces cuya rotura perjudicaría de forma apreciable el comportamiento posterior del material. El intervalo máximo dentro del cual deben efectuarse las operaciones de compactación es lo que se denomina *plazo de manejabilidad* (Jofré, 2003-1).

Existen diversos métodos para determinar el plazo de manejabilidad. El más sencillo consiste en realizar ensayos de compactación diferida, determinando el descenso de densidad que se produce en las probetas a medida que se va dejando transcurrir entre el mezclado del material y su compactación (Jofré, 2003-1).

Se considera que se ha alcanzado el plazo de manejabilidad cuando dicha disminución es igual a un 2% de la densidad inicial. Los ensayos deben realizarse a la temperatura prevista en obra durante las horas más calurosas (Jofré, 2003-1).

III.2.3.- *ESTABILIDAD INMEDIATA.*

Otra de las propiedades de los materiales reciclados con cemento Pórtland es la estabilidad inmediata, que es una de las más apreciadas sobre todo pensando en obras de recuperación bajo tránsito, en su posibilidad de apertura inmediata a la circulación. Ello es debido a la estabilidad que normalmente adquiere su esqueleto mineral una vez compactado, con lo que las deformaciones originadas por los vehículos no son suficientes para romper los enlaces entre los materiales. Con ello no se interrumpe el proceso de ganancia de resistencia mecánica, responsable del comportamiento a largo plazo del material (Jofré, 2003-1).

Para obtener una adecuada estabilidad inmediata suele ser suficiente que el material contenga una cierta porción de elementos de trituración (material triturado del reciclado), lo cual queda garantizado en los pavimentos recuperados por su proceso de ejecución.

III.2.4.- *DEPENDENCIA DE LAS RESISTENCIAS MECÁNICAS FRENTE AL GRADO DE COMPACTACIÓN ALCANZADO.*

Un pequeño descenso en el grado de compactación obtenido (por ejemplo de un 5%) se traduce en una gran disminución de las resistencias mecánicas, que puede llegar a ser del orden de un 25%. En consecuencia, en la recuperación de pavimentos con cemento Pórtland la compactación debe llevarse a cabo de forma cuidadosa, debiendo alcanzar en cualquier momento el grado de compactación recomendado en las especificaciones. Hay que tener en cuenta que en este tipo de obras los materiales suelen ser más difíciles de compactar y que los espesores de tratamiento pueden ser superiores a 25 o 30 cm. en el caso de tránsitos importantes (Jofré, 2003-1).

III.2.5.- FISURACION POR RETRACCIÓN TÉRMICA.

Debido a la rigidez de los materiales reciclados con cemento Pórtland, con módulos de elasticidad elevados, y a su coeficiente de dilatación térmica (aproximadamente de $10^{-7}/^{\circ}\text{C}$), las tensiones que se originan en los mismos como consecuencia del efecto combinado de las variaciones de temperatura diarias y estacionales y de las cargas de tránsito pueden llegar a rebasar las de rotura. En consecuencia, la fisuración de estos materiales es un hecho inherente a su naturaleza, al igual que la de los pavimentos semirrígidos convencionales y no debe ser atribuida en general a fallos de ejecución (Jofré, 2003-1).

Las características de las fisuras como distancia entre las mismas, abertura, momento de aparición, dependen de un gran número de factores entre los que se encuentran el tipo de cemento, la dosificación, naturaleza y granulometría de los elementos obtenidos de la disgregación. Las condiciones climáticas durante la ejecución y el curado influyen también considerablemente en el proceso. A estos factores hay que añadir la variabilidad de materiales que suele ser frecuente encontrar en los pavimentos recuperados (Jofré, 2003-1).

En una capa recuperada el porcentaje de cemento Pórtland se ajusta de tal manera que se obtengan características resistentes similares al menos a las de un suelo-cemento o próximas a las de una grava-cemento; un material de este tipo suele presentar una fisuración espontánea fina y a distancias cortas. Sin embargo, las heterogeneidades del pavimento existente pueden dar lugar a unas dispersiones importantes en las resistencias in situ, que con frecuencia, alcanzan valores bastante más elevados. Este hecho, unido a los espesores importantes de reciclado y al relativamente pequeño espesor de la capa de rodadura, pueden traducirse en la aparición de fisuras transversales de retracción con separaciones relativamente largas (superiores a 6 m) y en la reflexión de las mismas en la superficie. Dichas fisuras, que en obras de la red secundaria no suelen tener importancia, en carreteras para tránsitos más elevados pueden dar lugar a problemas como fatiga acelerada del pavimento por pérdida de continuidad del mismo en las fisuras, deterioro de éstas como consecuencia del paso repetido de los vehículos, penetración de agua en la superficie, etc. Por ello, en estos casos hay que tratar de evitar la aparición de dichas fisuras en la superficie de rodadura (Jofré, 2003-1).

Para alcanzar dicho objetivo y de acuerdo con la experiencia acumulada, el método más eficaz consiste en disminuir al mínimo los movimientos de las fisuras, mediante la reducción de las separaciones entre las mismas, realizando una prefisuración ordenada, con una localización precisa de las fisuras mediante la creación de **juntas** a distancias cortas (en general, entre 2.5 y 3.5 m), antes de iniciar la compactación del material (Jofré, 2003-1).

III.2.6.- MATERIALES NUEVOS.

La adición de materiales nuevos suele limitarse al cemento Pórtland y al agua de mezclado y en algunos casos será preciso incorporar algún corrector granulométrico (Jofré, 2003-1). En lo que se refiere a los cementos, los más adecuados son los que poseen las siguientes características:

- Un contenido elevado de adiciones activas.
- Una resistencia media-baja.
- Un desarrollo lento de resistencias a edades tempranas.

La primera de ellas se traduce en un plazo de manejabilidad más elevado que en el caso de emplearse cementos sin adiciones, mientras que las otras dos dan lugar a un esquema de fisuración más favorable (Jofré, 2003-1).

De acuerdo con el porcentaje de cemento Pórtland se pueden buscar diferentes fines, los propósitos que se buscan son los siguientes:

- Se busca **MEJORAR** las propiedades índice y de resistencia del material recuperado (disminuir la plasticidad y aumentar el CBR), agregando entre 3 y 5 % de cemento Pórtland (Capistran y cols., 2006).
- **ESTABILIZAR** el material recuperado agregando entre el 6% y 10% de cemento Pórtland para formar una base resistente (Capistran y cols., 2006).
- Con 12 a 18 % de cemento Pórtland agregado al material recuperado, se busca **RIGIDIZAR** el material recuperado, formando una base de concreto pobre con $f'c$ del orden de 150 Kg/cm² (Capistran y cols., 2006).

En lo que se refiere a otros materiales, si las pruebas de laboratorio del material a reciclar aconsejan el empleo de un corrector granulométrico, este deberá ser no plástico e incorporarse al pavimento existente en una proporción que permita obtener una curva granulométrica del material reciclado lo más continua posible. Por otra parte, si fuese necesario utilizar materiales granulares para corregir o completar espesores de una capa reciclada o efectuar un ensanche, este deberá cumplir con las especificaciones recomendadas a los materiales para bases o subbases granulares.

III.3.-NORMAS.

Como en todo tipo de obra de mantenimiento, conservación o reconstrucción de caminos ya sean carreteras o vialidades urbanas, es necesario revisar las normas correspondientes a cada uno de los trabajos a realizar, con el fin de lograr trabajos de calidad.

La Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) es quien elabora la normativa que se debe de seguir y el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) es quien publica la normativa, todo trabajo que se realice aun siendo el más pequeño debe realizarse de acuerdo a la normativa; en el caso de un trabajo de recuperación las normas importantes se citaran en forma resumida a continuación:

1. N-CMT-4-02-003/04 (Materiales para Bases Tratadas).- Esta norma se refiere a las características de los materiales, contiene los requisitos de calidad que deben cumplir los materiales que se utilicen en la construcción de bases de pavimentos rígidos o flexibles, que requieren la incorporación de un producto (cal. cemento Pórtland o asfalto) que modifique alguna de sus características físicas, generalmente haciéndolos más rígidos y resistentes, mejorando su comportamiento mecánico e hidráulico.
2. N-CMT 2-02-001/02 (Calidad del Cemento Pórtland).- Esta norma hace referencia a la calidad que debe cumplir el cemento Pórtland.

3. N-CSV-CAR-4-02-001/03 (Recuperación en Frío de Pavimentos Asfálticos).- Esta norma corresponde a trabajos de reconstrucción, y lo que corresponde a la recuperación en frío de pavimentos asfálticos. La norma contiene aspectos que deben considerarse en los trabajos de recuperación incluyendo la desintegración de la carpeta y capas inferiores con la ayuda de una recuperadora así como el remezclado, tendido y compactación del material recuperado; además contiene el equipo a utilizar para llevar a cabo los diferentes trabajos.
4. M-MMP-1-09/06 (Compactación AASHTO).- Esta norma corresponde a los métodos de muestreo y pruebas de materiales, y a la prueba de compactación AASHTO. La norma describe el procedimiento de prueba AASHTO estándar y modificado para determinar con la ayuda de la curva de compactación, la masa volumétrica seca máxima y el contenido de agua óptimo.

Estas normas pueden revisarse de forma más completa y su actualización en la página de Internet www.sct.gob.mx o en <http://normas.imt.mx>

III.4.- DIMENSIONAMIENTO DE LA REHABILITACIÓN DEL PAVIMENTO.

El dimensionamiento consiste en la determinación del espesor a recuperar que determinara la velocidad de avance del equipo recuperador, y el espesor total de mezcla asfáltica de rodadura, que en general será en caliente, salvo para tránsito ligero que suelen utilizarse mezclas en frío y carpetas a base de riegos. La técnica de recuperación con cemento Pórtland en obra es particularmente útil cuando el pavimento a recuperar esta muy degradado, con deflexiones elevadas (Jofré, 2003-1).

La capacidad de soporte inicial de un pavimento suele tener una influencia muy reducida en la que se obtiene tras el reciclado del mismo con cemento Pórtland. Por ello, el dimensionamiento de un pavimento reciclado con cemento Pórtland debe realizarse como el de uno nuevo.

En principio, se recomienda una profundidad de tratamiento de 20 - 30 cm., en correspondencia con la categoría de tránsito pesado. Un espesor mínimo de 20 cm. sólo debería adoptarse en caminos de tránsito ligero. Ya que por debajo de dicho valor de proyecto, los espesores reales de capas recicladas pueden dar lugar en muchos puntos susceptibles a un rápido deterioro del pavimento (Jofré, 2003-1).

Los espesores y tipos de mezcla asfáltica a emplearse en las distintas capas por encima de la reciclada se fijaran según la normativa vigente. En función de la categoría de tránsito pesado o ligero, pueden variar entre una carpeta a base de riegos y una carpeta de unos 12 cm. de espesor (Jofré, 2003-1).

Si las características del pavimento existente no permiten efectuar un reciclado del mismo en todo el espesor requerido, puede adoptarse alguna de las medidas siguientes:

- a) Aporte de nuevos materiales granulares hasta completar el espesor requerido (Jofré, 2003-1).
- b) Incremento del espesor de la carpeta de mezcla asfáltica (Jofré, 2003-1).
- c) Una combinación de ambas (Jofré, 2003-1).

En cualquier caso no es conveniente ir a reciclados con cemento Pórtland en los que no se pueda garantizar un espesor real de material tratado igual o superior a 15 cm. en cualquier punto (Jofré, 2003-1).

III.5.- EJECUCION DE LA OBRA.

Es muy importante efectuar una adecuada planificación de los trabajos de recuperación; así, de acuerdo con el equipo disponible, el conglomerante a emplear y las condiciones climáticas en la región de la obra habrá que definir el número de pasadas o carriles de trabajo para terminar la sección completa y la longitud de las mismas con el fin de evitar juntas frías entre los diferentes carriles. Si la obra lo justifica se pondrá considerar la utilización de dos maquinas recicladoras (Jofré, 2003-1).

Además, hay que prever todas las operaciones auxiliares que obligan a detener el proceso de recuperación, como son la carga de cemento en los equipos dosificadores, la sustitución de picas, etc., y que pueden suponer una disminución importante de los rendimientos teóricos. Otro factor a tomar en cuenta ya que tiene una gran influencia en la organización de los trabajos es el tipo de tránsito al que se le dará paso alternativo (Jofré, 2003-1).

La ejecución de una obra de *recuperación con cemento Pórtland en obra* se desarrolla; en general, de acuerdo con el siguiente proceso:

III.5.1.- *PREPARACION DE LA SUPERFICIE.*

Consiste en limpiar la superficie existente (Fig. 32) para eliminar aquellos materiales que puedan afectar el trabajo de reciclado como trozos de arcilla o materia orgánica. En caso de ser necesario una corrección granulométrica; esta se llevara a cabo mediante el aporte de materiales nuevos sea de trituración o cribado (Jofré, 2003-1).



Fig. 32.- Preparación de la superficie.

III.5.2.- *EXTENSION DEL CEMENTO O CONGLOMERANTE.*

Normalmente se utilizan equipos mecánicos de extendido. La extensión manual del cemento, por ejemplo formando previamente una cuadrícula de sacos con la separación requerida, únicamente es admisible en obras muy pequeñas y de tránsito reducido (Jofré, 2003-1).

En caso de utilizarse dosificadores de cemento en polvo, es preferible emplear equipos con el vertido regulado por la velocidad de avance. La dosificación prevista de cemento debe extenderse lo más uniformemente posible sobre la superficie a reciclar, para reducir al mínimo las pérdidas de cemento provocadas por el viento, sobre todo evitar las molestias que ello origina en la obra, es conveniente que haya una buena sincronización entre los equipos de extensión del conglomerante y de fresado del pavimento, de forma que la longitud de cemento por delante de este último sea lo más corta posible. Dependiendo del sistema de ejecución, el cemento se extenderá antes o después de escarificar y disgregar el pavimento.

Si, como es habitual, la recicladora realiza conjuntamente las operaciones de escarificado y mezclado, el cemento deberá extenderse previamente o incorporarse como lechada en el mismo proceso en la proporción correspondiente (Jofré, 2003-1). En la siguiente figura 33 se muestran algunos de los métodos de dosificación de conglomerante.



a)



b)

Fig. 33.- a) Esparcido del cemento en forma manual mediante la colocación de sacos de 50 Kg. b) esparcido a través de la manguera de la pipa de cemento

III.5.3.- ESCARIFICADO Y MEZCLADO.

A fin de asegurar una buena homogeneidad en el material reciclado y una profundidad uniforme de mezclado, debe utilizarse una recicladora con la potencia adecuada (Fig. 34). Por otra parte, cuando el reciclado se realiza por carriles, estos deben solaparse suficientemente (del orden de unos 20 cm.), para no dejar materiales sin mezclar en los bordes de las mismas (Jofré, 2003-1).

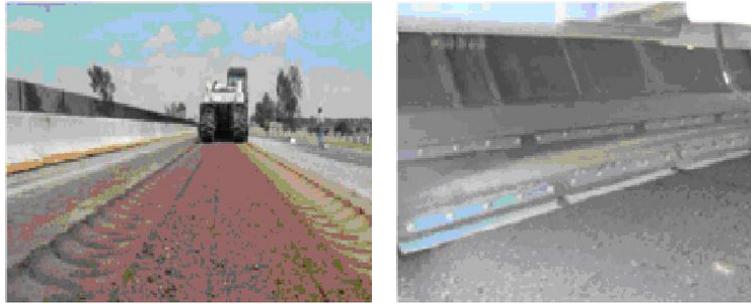


Fig. 34. Máquina recicladora o recuperadora.

El ritmo de avance de la recicladora esta condicionado, como es lógico, por la profundidad del tratamiento y la dureza de los materiales existentes. El rendimiento medio también esta condicionado por otros factores, como las paradas para el suministro de cemento o la reposición de picas. Son habituales valores entre 4000 y 8000 m²/día (Jofré, 2003-1).

III.5.4.- EJECUCION DE JUNTAS TRANSVERSALES.

Hoy en día existen diversos métodos para poder lograr la fabricación de juntas en fresco (transversales), de los cuales puede hacerse la siguiente división:

- Corte del orden de 1/3 del espesor de la capa mediante placa vibratoria con cuchilla triangular (Jofré, 2003-2), por ejemplo, se encuentran los cortes de 1/3 del espesor que se hacen con disco de diamante o cortes de juntas con una "quilla", de igual forma a una profundidad de 1/3 del espesor (Fig. 35).



Fig. 35.- Elaboración de juntas transversales con una "quilla".

- Corte en todo el espesor de la capa (o una parte importante de la misma) con equipos y sistemas específicos como CRAFT, Olivia o Juntas Activas (Jofré, 2003-2).

En lo que respecta a las juntas longitudinales, estas son elaboradas junto con el proceso constructivo de trabajar por carriles.

III.5.5.- COMPACTACION.

Una compactación energética es fundamental para obtener la resistencia necesaria y un buen comportamiento del pavimento recuperado, por lo que debe alcanzarse la mayor densidad posible (Jofré, 2003-1). Ello requiere el uso de equipos potentes (por ejemplo rodillo pata de cabra, Fig. 36), sobre todo teniendo en cuenta los fuertes espesores usuales en las capas recuperadas con cemento Pórtland. La composición del equipo de compactación, así como el número de pasadas necesario, han de definirse mediante un tramo de ensayo.



Fig. 36.- Compactación por medio de un rodillo pata de cabra.

III.5.6.- AFINAMIENTO.

A la salida de la recuperadora el volumen de los materiales tratados es superior al inicial, tanto por el cemento y el agua aportados como por la expansión que se produce al disgregar unas capas normalmente muy densificadas durante un buen número de años por el tránsito. Por este motivo debe procederse a un afinamiento del material, lo que además ayuda a mejorar la regularidad superficial.

Esta operación debe llevarse a cabo antes de finalizar la compactación (Fig. 37), y por tanto siempre dentro del plazo de manejabilidad del material reciclado. Es muy importante que el afinamiento se lleve a cabo en todo el ancho de la banda, y nunca rellenando los puntos bajos con materiales procedentes de la eliminación de puntos altos (Jofré, 2003-1).



Fig. 37.- Afinamiento con motoniveladora.

III.5.7.- CURADO Y PROTECCION DEL MATERIAL RECUPERADO.

Una vez terminada la compactación, y con el menor desfase posible, se debe proceder al curado de la capa reciclada (por ejemplo, riego de sello; Fig. 38) con el objetivo de proteger al material de la intemperie, de la evaporación del agua y del tránsito (Jofré, 2003-1). Y en caso de ser necesario se llevara a cabo la elaboración de la capa o capas superiores de mezcla asfáltica.



Fig. 38.- Colocación de riego de sello como protección del material recuperado.

Según el sistema de reciclado y los equipos empleados, las distintas operaciones anteriores pueden agruparse. En caso de que conjuntamente con el reciclado haya que efectuar un ensanche de la calzada, previamente hay que excavar una zanja a la profundidad adecuada a uno o los dos lados de la misma, que deberá ser rellenada preferentemente con un material de características semejantes al existente en el pavimento a reciclar.

Con esto queda terminado el trabajo de recuperación del pavimento existente y queda listo para la apertura al tránsito (Fig. 39).



Fig. 39.- Apertura al tránsito una vez terminado todo el trabajo.

III.6.- CONTROL DE CALIDAD.

El control de calidad es imprescindible para garantizar la obtención de un resultado satisfactorio. Este control se desarrolla en dos etapas; *una para controlar la ejecución de las obras mientras estas se llevan a cabo, y otra para comprobar que el resultado final cumple con todas las exigencias* (Jofré, 2003-1).

En el caso de obras importantes, es necesario realizar previamente un tramo de prueba a fin de ajustar los parámetros de funcionamiento de los equipos de reciclado (sobre todo la velocidad de avance) y las condiciones de compactación (características de los compactadores y número de pasadas).

III.6.1.- DURANTE LA EJECUCION DE LA OBRA.

Se debe realizar un control en el lugar de procedencia de los materiales y un control de producción (Jofré, 2003-1); en síntesis los puntos a controlar son los siguientes:

- Materiales de aportación: cemento, agua y pétreos.- El control de los materiales de aportación como lo son cemento, agua y pétreos, se llevara a acabo de acuerdo a las normas que correspondan tanto para la calidad de los mismos como para su almacenamiento, como son la norma N-CMT-2-02-001/02 (Calidad del Cemento Pórtland) y a la norma N-CMT-4-02-003/04 (Materiales para Bases Tratadas) la cual hace referencia a los requisitos de calidad que deben cumplir los materiales tratados con cemento Pórtland, provenientes de un banco. Lo que corresponde a la dosificación del cemento se recomienda sea en forma de lechada debido a que se obtiene una mejor homogeneización del material y un mejor control de la misma

- Granulometría del material recuperado.- La obtención de la curva granulométrica de los materiales recuperados con cemento Pórtland se determina mediante el procedimiento contenido en el manual M-MMP-4-01-003, la cual deberá de cumplir con los requisitos de granulometría establecidos en la Norma N-CMT-4-02-003/04 (Materiales para Bases Tratadas).

- Homogeneidad de la mezcla.- El control de la homogeneidad de la mezcla durante la ejecución de la obra se logra con el uso del equipo de recuperación, el cual debe de tener la potencia adecuada así como la velocidad de avance del mismo sea la correcta; también ayuda que la adición de cemento sea en forma de lechada.

- Compactación.- Para poder lograr una buena compactación es necesario la utilización de equipos potentes, para realizar el control de la compactación durante el proceso de ejecución de la obra se llevara a cabo la obtención de muestras y pruebas de compactación, una vez tendido y compactado el material, de acuerdo con el manual M-MMP-1-09-/06 (Compactación AASHTO) para determinar el grado de compactación.

- Profundidad del tratamiento.- La profundidad del tratamiento se controla con la ayuda de un equipo de topografía y, al igual que en el caso de la compactación, con la obtención de muestras para poder determinar la profundidad real del tratamiento.

- Aspecto superficial y geometría.- El control del aspecto de la capa superficial, sobre la capa tratada y de la geometría se realizara con la ayuda de equipo topográfico, y verificar los valores del índice de perfil (IP) y el coeficiente de fricción (M_u)

III.6.2.- *SOBRE LA CAPA TERMINADA.*

Se establecen lotes de una dimensión máxima no superior, en general, a 3 000 m² o a la superficie construida en un día; a los que se aplican unos criterios de aceptación o rechazo (Jofré, 2003-1). Se estudian los siguientes puntos:

- Espesor del material recuperado.
- Resistencias mecánicas.
- Nivelación.
- Anchura de reciclado.
- Regularidad superficial.
- Deflexiones a corto y largo plazo.
- Control de grietas reflejadas en el pavimento.

III.7.- **OTROS METODOS.**

Hoy en día existen otros métodos de recuperación o reciclado de pavimentos, a continuación se describen brevemente algunos de ellos.

III.7.1.- *RECICLADO EN SITIO EN CALIENTE.*

Se realiza con máquinas de producción continua que precalientan, fresan, disgregan e incorporan el agente rejuvenecedor, permitiendo la incorporación de mezcla asfáltica virgen simultáneamente y tendido de la mezcla (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C., 2000).

Las actividades principales son:

- a) Muestreo previo y análisis del material a recuperar, determinando el rejuvenecimiento y mezcla virgen a añadir.
- b) Diseño de la mezcla reciclada.
- c) Ataque con la maquina de recuperación continua, que consiste en un tren de equipos autopropulsados que realiza las siguientes operaciones:
 - Pre calentamiento de la carpeta asfáltica, utilizando diversas fuentes de calor, como rayos infrarrojos, quemadores a base de gas butano o aire caliente.
 - Fresado de la carpeta pre calentada, disgregado e incorporación del agente rejuvenecedor.
 - Mezclado y homogeneización del material y colocación mediante equipo esparcidor en caso de ser necesario, el equipo esparcidor permite la recepción de mezcla virgen fabricada en planta, que se revuelve con la recuperadora; los equipos mas modernos permiten la colocación de la mezcla virgen encima de la mezcla reciclada.
- d) Compactación de la mezcla por medios convencionales.

Dentro de las consideraciones que se deben de tener en cuenta en este tipo de recuperación se encuentran las siguientes:

- Las altas temperaturas en la operación de pre calentamiento, pueden provocar la ignición del material fresado, por lo que es necesario el control de la fuente de calor. Por este motivo, los espesores a reciclar se limitan de 6 a 8 cm.
- Este procedimiento de recuperación es aconsejable en rehabilitaciones de renovación y regularización de la carpeta asfáltica.
- La calidad del reciclado depende principalmente de la calidad de la materia prima a reciclar, es decir del material existente en la vialidad a recuperar.

III.7.2.- *RECICLADO EN PLANTAS EN FRIO.*

El proceso de este método de recuperación requiere de las siguientes actividades:

- a) Muestreo del material a fresar, determinación del agregado virgen y emulsión rejuvenecedora a utilizar.
- b) Diseño de la mezcla en frío.
- c) Fresado del material en frío y traslado a la planta de fabricación,
- d) Triturado y/o cribado del material fresado.
- e) Fabricación en planta mezcladora.
- f) Traslado a obra, tendido y compactación por medios convencionales.

Dentro de las consideraciones que se deben tener en cuenta en este tipo de recuperación se encuentran las siguientes:

- Los procesos de diseño y fabricación en planta, permitan la fabricación de mezclas en frío de alta calidad.
- Permite utilizarse tanto en rehabilitaciones de renovación y regularización de la carpeta asfáltica, como en refuerzos incrementando el espesor de la mezcla reciclada o colocando una sobrecarpeta.

III.7.3.- *RECICLADO EN PLANTAS EN CALIENTE.*

El proceso de este método de recuperación requiere de las siguientes actividades:

- a) Muestreo de los tramos a recuperar para determinar el agregado y el asfalto y/o rejuvenecedor a añadir.
- b) Diseño de la mezcla.
- c) Fresado del material en frío y traslado a la planta de fabricación,
- d) Triturado y/o cribado del material fresado.
- e) Análisis del material fresado para ratificar el diseño.
- f) Proceso de fabricación en plantas de tambor-secador-mezclador o doble tambor.
- g) Traslado a la obra, tendido y compactación por medios convencionales.

Dentro de las consideraciones que se deben tener en este tipo de recuperación se encuentran las siguientes:

- Las altas temperaturas en los secadores pueden provocar la ignición del material fresado con pérdida de características y alta contaminación, las plantas recomendadas disponen de los dispositivos adecuados para proteger de los quemadores la mezcla a recuperar de manera que la homogeneización del producto final se produce a temperaturas adecuadas para cada uno de los componentes.
- Los procesos de reciclado en planta fija, permitan la fabricación de mezclas de alta calidad.
- Este procedimiento se utiliza en rehabilitaciones para renovación y regularización de la carpeta asfáltica y en refuerzos, colocando una sobrecarpeta.

CAPITULO IV.- MAQUINARIA Y EQUIPO.

La recuperación con cemento Pórtland en obra es una técnica en la que se puede utilizar una gran variedad de equipos. A cada una de las operaciones le corresponde uno o varios tipos de maquinaria, muchos de los equipos son habituales en la construcción de carreteras.

Una de las razones que más ha favorecido a la utilización de esta técnica ha sido el gran avance que han presentado los equipos específicos para este tipo de obras; los distribuidores de conglomerante, las recuperadoras o recicladoras, así como los equipos para la formación de juntas en fresco.

IV.1.- DISTRIBUIDORES DE CONGLOMERANTE.

La distribución manual del conglomerante, formando previamente una cuadrícula de sacos a distancia requerida (Fig. 40), como se ha mencionado anteriormente solo es admisible en obras de pequeña magnitud.



Fig. 40.- Distribución del conglomerante en forma manual colocando sacos de 50 Kg.

En los restantes casos debe procederse a una extensión mecanizada del mismo, para lo cual existen dos tipos diferentes de equipos *los que distribuyen el cemento en forma de polvo y los que lo hacen en forma de lechada* (Jofré, 2003-2).

IV.1.1- LOS QUE DISTRIBUYEN EL CEMENTO EN FORMA DE POLVO.

Los equipos que efectúan la dosificación en polvo (Fig. 41) suelen consistir en camiones-silo o tanques remolcados equipados con tolvas acopladas en la parte posterior con compuerta regulable. Deben protegerse con faldones para limitar la emisión de polvo. La distribución se realiza mediante un rotor distribuidor ligado o no a la velocidad de avance del vehículo. Los dispositivos de dosificación son en general de tipo volumétrico. Algunos equipos están provistos de controles electrónicos que indican la dosificación teórica establecida, la velocidad de avance y la distancia recorrida (Jofré, 2003-2).



Fig. 41.- Dosificadores de cemento en polvo (carros dispersadores de un eje).

Hay que mencionar que algunas recuperadoras llevan integrado un silo para el cemento junto con un distribuidor que lo incorpora directamente delante del rotor de disgregación.

IV.1.2.- LOS QUE LO HACEN EN FORMA DE LECHADA.

Los equipos que dosifican el cemento en forma de lechada están constituidos fundamentalmente por un silo para el cemento, un dispositivo que incorpora el agua, un mezclador que mantiene el cemento en suspensión, una bomba que impulsa la suspensión hasta el rotor de fresado de la recuperadora y los equipos electrónicos adecuados, capaces de dosificar el porcentaje indicado de lechada respecto al peso del material tratado (de acuerdo a la velocidad de avance, densidad del material, dosificación de cemento y profundidad de trabajo) (Jofré, 2003-2).

Un ejemplo de ellos es la “dosificadora de cemento” WM 1000 (de *Wirtgen*) adquirida por CEMEX; este equipo está diseñado en forma de contenedor para montar sobre un remolque de 5 ejes para grandes cargas (Fig. 42). Dispone de dos depósitos de generosas dimensiones, uno con capacidad de 25 t para el cemento y otro con capacidad de 11,000 litros para el agua. En el interior del depósito de cemento hay un tornillo sin fin que transporta al cemento a un recipiente localizado en la parte superior de la zona trasera de la dosificadora, donde se pesa el cemento y cae a un tanque donde se mezcla con el agua, de ahí con una manguera adosada a dicho tanque, se lleva la lechada a las espreas que tiene la maquina recuperadora (www.wirtgen.com).



Fig. 42.- Máquina dosificadora de cemento WM 100.

En la parte lateral trasera del equipo dosificador se tiene una pantalla y los controles para la dosificación del cemento, agua, lechada y velocidad de operación del equipo, así mismo en esta parte lateral hay una compuerta lateral (Fig. 43) por donde previo a la operación del equipo, una pipa carga el cemento a la dosificadora (esta operación dura entre 30 y 45 min.).

Cada carga de 25 t de cemento alcanza para aproximadamente 360 m² (120 m de longitud en una franja de 3 m de ancho).



Fig. 43.- Carga de cemento con la pipa.

Esta segunda opción tiene la ventaja de evitar pérdidas de conglomerante por el viento (Fig. 44) y ser una solución mucho más respetuosa con el medio ambiente. Además proporciona una dosificación más exacta y reduce el tiempo de espera de las dosis de cemento, por tener el equipo capacidad para una dosis completa.



Fig. 44.- Pérdidas de conglomerante durante el mezclado del material en seco.

No obstante, si la humedad del material del pavimento a recuperar esta próxima a la de compactación, la aportada por la lechada puede ser perjudicial, requiriéndose entonces un oreo previo del material a reciclar; y en obras de pequeño volumen puede suponer un aumento en el costo por un mayor uso del equipo (Jofré, 2003-2).

IV.2.- MAQUINARIA RECUPERADORA Y ESTABILIZADORA DE PAVIMENTOS.

En lo que se refiere a los equipos para realizar la recuperación (la disgregación del pavimento y su mezclado con el cemento Pórtland y el agua), hoy en día se cuenta con un gran número de ellos, de diferentes tipos y marcas.

El elemento fundamental de estos equipos es el rotor (Fig. 45) provisto de picas o de paletas que realizan la disgregación del suelo o del pavimento y efectúan el mezclado de los elementos con el cemento Pórtland y el agua. Los rotores empleados para la recuperación de pavimentos llevan montadas unas picas con punta de widia, las picas se disponen helicoidalmente en el rotor, a fin de asegurar una mayor homogeneidad tanto en la disgregación como en el mezclado (Jofré, 2003-2).

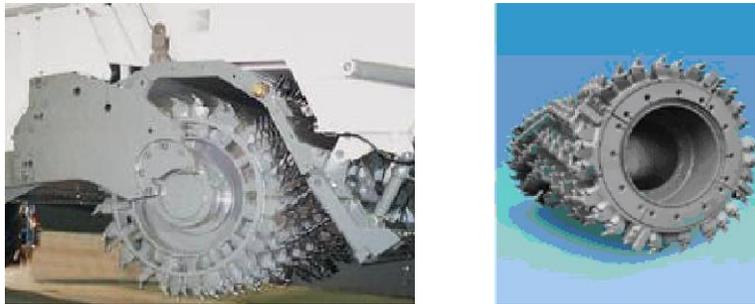


Fig. 45. Rotor de una recuperadora.

A continuación se muestran algunos de los equipos utilizados en la recuperación de pavimentos.

IV.2.1.- RECUPERADORA EN FRÍO DE WIRTGEN WR 2000.

La marca Wirtgen de origen alemán cuenta con una gran variedad de recuperadoras de pavimentos entre las que se encuentran la WR 2000 (Fig. 46), con una anchura de 2.55 m y una altura de 3 m, lo cual facilita su traslado de un lugar a otro; con ancho máximo de trabajo de 2 m y una profundidad de trabajo de 0 - 0.50 m, con un peso de 21.300 t y una potencia de 295 kW o 395 hp (www.wirtgen.com).

La elevada eficacia de la WR 2000 se consigue por medio de un directo accionamiento mecánico del tambor de fresado desde el motor diesel a través de una correa de accionamiento. El resultado de esto, es un elevado grado de eficacia, dado que la fuerza motriz se transmite directamente al tambor de fresado, evitando pérdidas por fricción causadas por desviaciones desfavorables. Un dispositivo automático tensor de la correa se encarga continuamente de una transmisión óptima de la fuerza motriz (www.wirtgen.com).



Fig. 46.- Recuperadora WR 2000.

El tambor de la WR 2000 está equipado con un sistema de portapicas (bases de las puntas de ataque) recambiables HT3 Plus (Fig. 48). El rotor para fresar y mezclar accionado mecánicamente permite dos direcciones de trabajo: el fresado en sentido del avance y el fresado en sentido opuesto al avance. Para fresar el suelo se descende el rotor para fresar y mezclar en la caja del tambor que se encuentra montada fijamente en el chasis. De esta forma, al trabajar a una profundidad mayor, automáticamente se forma una cámara de mezclado más grande (www.wirtgen.com).

La máquina es llevada a su posición de transporte o de trabajo a través de las cuatro columnas de elevación de la recuperadora. La tracción hidráulica en todas las ruedas es suave y permite la maniobra en lugares muy estrechos. Este sistema de dirección se ajusta a la dirección de trabajo seleccionada, de manera que las ruedas delanteras o traseras sirven de eje de dirección (www.wirtgen.com).

Por su enorme profundidad de trabajo de 500 mm, la WR 2000 es también una máquina perfectamente adecuada para la estabilización de suelos de poca consistencia. Para obtener resultados óptimos de trabajo, es posible ajustar en cuatro etapas el número de revoluciones del rotor de fresado y de mezclado. Durante la estabilización del suelo, al fresar el suelo y al añadir un estabilizador (cemento, emulsión, cal, etc.), la WR 2000 produce una mezcla homogénea del material, que posteriormente se puede compactar mejor (www.wirtgen.com).

IV.2.2.- RECUPERADORA EN FRÍO DE WIRTGEN WR 2500 S.

La recuperadora WR 2500 S (adquirida por CEMEX) (Fig. 47), la cual tiene un alto desempeño en todo el espesor del material recuperado, tanto puede ser utilizada en recuperaciones como en estabilizaciones, además puede ser equipado con un dispositivo para emulsión y/o un alto volumen de agua (500 litros), cuenta con un ancho máximo de trabajo de 2.4 - 3.05 m y una profundidad de trabajo de 0 - 0.50 m, con un peso de 31.500 t y una potencia de 500 kW o 670 hp (www.wirtgen.com).



Fig. 47.- Recuperadora WR 2500 S.

La recuperadora WR 2500 S, cuenta con tracción en sus cuatro ruedas lo cual hace posible superar las pendientes más difíciles. El sistema de accionamiento garantiza una tracción permanente, incluso al trabajar a gran profundidad y si los suelos presentan condiciones difíciles. También el accionamiento del rodillo de fresado, semejante al de la WR 2000, es apropiado por la transmisión directa y mecánica de la potencia a través de 12 correas robustas del motor al engranaje del rodillo, la enorme potencia del motor se aprovecha para fresar, en vez de producir pérdidas por fricción originadas por un diseño que ocasiona reenvíos desfavorables (www.wirtgen.com).

Al igual que la WR 2000 la maquina recuperadora WR 2500 S cuenta con un tambor equipado con un sistema de portapicas recambiables HT3 Plus (Fig. 48). Las picas están dispuestas de tal forma que exista suficiente espacio para poder mezclar los materiales, incluso en caso de trabajar a gran profundidad (www.wirtgen.com).

La disposición optimizada garantiza, además, el funcionamiento suave de la máquina, protegiendo los elementos de accionamiento y contribuyendo a una larga vida útil. Las picas están metidas en portapicas, que se pueden cambiar fácil y rápidamente en la obra (www.wirtgen.com).

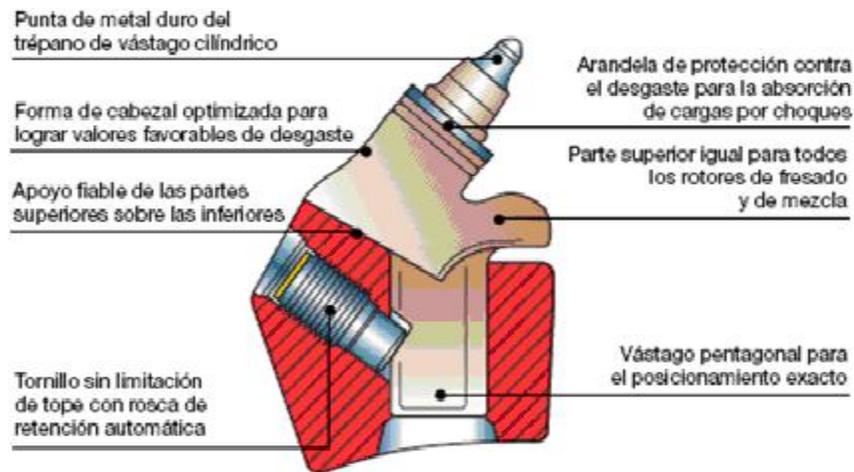


Fig. 48.- Sistema de portapicas de Wirtgen HT3 Plus.

Una característica esencial de la recicladora WR 2500 S consiste en el empleo de un solo rotor para la estabilización, la pulverización y el reciclaje en frío, sin necesidad de reequipar la máquina para la realización de dos tareas diferentes. El rotor robusto de fresado y de mezclado dispone de una gran masa, que produce el efecto de volante y que compensa las cargas de impacto al recoger trozos grandes de roca, impidiendo que afecten el engranaje del rotor. El tambor está montado sobre cojinetes en un lado y en el otro sobre un rodamiento de rodillos a rótula lubricado con aceite. Además de contar con dirección frontal y trasera (www.wirtgen.com).

El volumen del material reciclado varía según las profundidades del trabajo realizado: cuanto más profundo, mayor es el volumen de la mezcla. La recuperadora WR 2500 S dispone de una carcasa de capacidad variable para el tratamiento continuo y homogéneo de los materiales y para obtener una alta calidad de la mezcla sin perder en ningún momento la fuerza de tracción necesaria. El escudo alisador con regulación hidráulica extiende la capa de material reciclado (www.wirtgen.com).

La recuperadora WR 2500 S ofrece la posibilidad de adición simultánea de diferentes áridos, dado que es posible incorporar varias instalaciones de inyección. Es posible, además, transportar desde una mezcladora de suspensión acoplada (WM 1000) (Fig. 49), una suspensión premezclada de cemento y agua a la cámara de mezclado de la recicladora. Además de estos dos tipos de recuperadoras Wirtgen cuenta con otras recuperadoras como son la WR 2500 SK y la WR 2400 (www.wirtgen.com).



Fig. 49.- “Dosificadora de cemento” WM 1000 acoplada a la recuperadora WR 2500 S.

CEMEX a probado la recuperadora WR 2500 S junto con la “dosificadora de cemento” WM 1000, en algunos trabajos de recuperación de pavimentos con cemento en obra, obteniendo un ahorro en el tiempo de proceso del 50% en comparación con el método tradicional, los casos en los que se ha utilizado han sido en la carretera: León-Lagos de Moreno-Aguascalientes en el tramo: 88+700 al km 104+000, otro es el de la carretera: México-Querétaro en el tramo: Tepozotlán-Palmillas, del kilómetro 132+800 al kilómetro 148+000 en sus dos cuerpos A y B; y a finales de agosto del 2006 en la autopista: Cuernavaca-Acapulco en los siguientes tramos: del kilómetro 155+400 al kilómetro 182+000, del kilómetro 257+700 al kilómetro 267+200, del kilómetro 278+000 al kilómetro 288+420 y el ultimo tramo del kilómetro 297+300 al kilómetro 308+900.

IV.2.3.- RECUPERADORAS CATERPILLAR.

Entre otros tipos de recuperadoras que se encuentran en el mercado, están los de *CATERPILLAR*, la cual cuenta con dos modelos de recuperadoras de pavimento como son: la RM-300 (Fig. 50) con una ancho máximo de trabajo de 3m, una profundidad de trabajo de 0 - 0.45 m, con un peso de 23.473 t y potencia de 350 hp o 261 kW. Y la RM-500 con un ancho máximo de trabajo de 3 m; una profundidad de trabajo de 0 - 0.41, con un peso de 27.165 t y con potencia de 540 hp o 403 kW; que resultan ser una buena opción (www.cat.com).



Fig. 50.- Recuperadora RM-300.

IV.3.-EQUIPO PARA LA ELABORACION DE JUNTAS EN FRESCO.

En el caso de pavimentos recuperados con cemento Pórtland sometidos a una circulación intensa, hay que tratar de evitar la aparición de las fisuras por retracción en la superficie de rodadura. El método más eficaz para ello es la creación en fresco de juntas a distancias cortas de 2.5 - 3.5 m (Fig. 51). Por lo tanto en los pavimentos recuperados, la ejecución de juntas en fresco antes de iniciar la compactación es una operación necesaria en el caso de tránsito medio-alto, y muy recomendable para todo tipo de tránsitos (CEMEX Concretos, 2005).



Fig. 51.- Juntas creadas en fresco a distancias cortas.

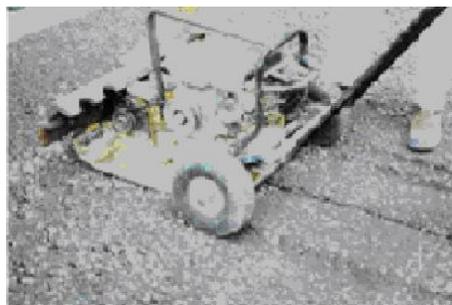
Actualmente existen varias posibilidades para la formación de dichas juntas en fresco, según su profundidad:

1. Del orden de un tercio del espesor de la capa.
 - placa vibrante con cuchilla triangular soldada a su parte inferior.
 - rodillo vibrante con cuchilla anular soldada al mismo.
- La totalidad del espesor de la capa (o una parte importante del mismo).
 - con riego de emulsión (equipo CRAFT).
 - con inclusión de una cinta de plástico (método Olivia).
 - con inclusión de un perfil de plástico (juntas activas).

En los equipos del primer grupo, su desplazamiento suele realizarse manualmente, aunque en algunas obras se ha utilizado una placa vibrante acoplada al brazo de una retroexcavadora. Por el contrario, los del segundo grupo son autopropulsados.

IV.3.1.- EQUIPOS DEL ORDEN DE UN TERCIO DEL ESPESOR DE LA CAPA.

El método más simple, es la realización de cortes interesando únicamente parte del espesor. Se utilizan para ello pequeños rodillos vibrantes provistos de una cuchilla anular, o bien placas vibrantes con una cuchilla triangular soldada a su cara inferior (Fig. 52). Las placas pueden ser propulsadas manualmente, en cuyo caso, disponen de ruedas permitiendo su elevación y facilitando así su traslado entre corte y corte; o bien pueden acoplarse a otros equipos que controlen su desplazamiento (rodillo compactador, pala excavadora, etc.) (CEMEX Concretos, 2005).



a)



b)

Fig. 52.- a) Creación de junta en fresco con cuchilla acoplada a placa vibrante b) "quilla".

La separación de las juntas es del orden de 5m, si la resistencia a 28 días del material es superior a 12 Mpa (120 kg/cm²), o si su espesor es superior a 20 cm., puesto que en ambos casos es de prever que las fisuras espontáneas se produzcan a distancias mayores. Dicha separación debe reducirse a 2.5 m, si el espesor de la capa de mezcla asfáltica es inferior a 14 cm., dado que entonces es previsible que los movimientos de las juntas a 5 m de distancia sean demasiado importantes (CEMEX Concretos, 2005).

Los equipos desplazados manualmente, y en particular las cuchillas acopladas a placas vibrantes, suelen dar resultados satisfactorios siempre que para la recuperación no se utilice maquinaria que precompacte el material, dado que resulta muy difícil introducir la cuchilla en el mismo. El acoplamiento de la placa a una retroexcavadora o rodillo, o bien el empleo de cuchillas anulares o discos incorporados a rodillos pueden ayudar a resolver este problema (CEMEX Concretos, 2005).

IV.3.2.- EQUIPOS PARA TOTALIDAD DEL ESPESOR DE LA CAPA.

Siempre se plantea la duda de si las juntas creadas en fresco no volverán a cerrarse tras el paso de los rodillos o de si, aun sin cerrarse, el debilitamiento que provoquen será el suficiente para que se forme una junta en todas ellas. Para evitar estos problemas se han desarrollado algunos equipos que, por su potencia, son capaces de realizar un corte afectando una gran parte o la totalidad del espesor de la capa reciclada (Jofré, 2003-2).

IV.3.2.1.- EQUIPO **CRAFT**.

El equipo denominado **CRAFT** (Creación Automática de Fisuras Transversales) (Fig. 53), el cual, durante la apertura en fresco de la junta en prácticamente todo el espesor de la capa, extiende un riego con emulsión sobre sus labios (CEMEX Concretos, 2005).



Fig. 53.- Equipo **CRAFT**.

El efecto que produce la emulsión cationica de rotura rápida, es doble; por un lado, el agua de la misma retrasa el fraguado, aumenta la relación agua/cemento y debilita la sección favoreciendo la aparición de la fisura; por otro lado, el cemento asfáltico crea una discontinuidad en la capa que permite la localización precisa de la fisura, al tiempo que forma una película protectora que disminuye la sensibilidad al agua del material tratado y su erosionabilidad (CEMEX Concretos, 2005).

El equipo **CRAFT** que se acopla al sistema tractor de una motoniveladora o retroexcavadora, consta de tres partes diferenciadas, cada una de las cuales realiza una misión específica:

- 1) El elemento de corte, que abre el surco e inyecta la emulsión. Consta de una doble cuchilla (Fig. 54), por cuya parte trasera se realiza la alimentación de la emulsión. Esta, a su vez, se vierte en la junta por la parte delantera. Para facilitar la penetración del elemento, este lleva acoplado un vibrador (CEMEX Concretos, 2005).



Fig. 54.- Cuchilla del equipo **CRAFT**.

- 2) Un brazo articulado, que introduce en la capa de material a fisurar el elemento de corte y desplaza este último a velocidad constante en todo el ancho de trabajo (CEMEX Concretos, 2005).
- 3) Un depósito de emulsión, revestido de un aislamiento, que puede ser calentado y regulado para mantenerla a temperatura constante (CEMEX Concretos, 2005).

A través de un circuito hidráulico se proporciona la potencia requerida al brazo articulado, mientras que una bomba realiza el suministro de emulsión al elemento de corte. Todas las operaciones se controlan en forma automática mediante un sistema electrónico programable (CEMEX Concretos, 2005).

La separación entre juntas oscila entre 2.5 - 3.5 m, según el tipo de obra. La duración de un ciclo de trabajo, desde que la máquina inicia el corte de un surco hasta que se coloca sobre el siguiente, es inferior a 30 seg. Por otra parte, el movimiento del brazo articulado no supone un obstáculo para el resto de los equipos (CEMEX Concretos, 2005).

En consecuencia el equipo **CRAFT** puede incorporarse perfectamente a la obra sin causar ningún retraso. En la actualidad existen dos equipos, uno de ellos con un ancho de trabajo de 3.5 m y el otro de 5m (CEMEX Concretos, 2005).

IV.3.2.2.- EQUIPO **OLIVIA**.

El funcionamiento del equipo denominado **OLIVIA** consiste en crear un surco transversal en la capa del material tratado y simultáneamente insertar en el una cinta de plástico (Fig. 55), a fin de evitar así mismo que se adhieran posteriormente las caras verticales de dicho surco. El ancho de la cinta (entre $\frac{1}{3}$ y $\frac{1}{4}$ del espesor total) se elige de forma que sea capaz de producir en la sección prefisurada un debilitamiento de la misma suficiente para provocar en ella la aparición de una junta por el efecto combinado de las cargas de tránsito y de los gradientes térmicos (CEMEX Concretos, 2005).

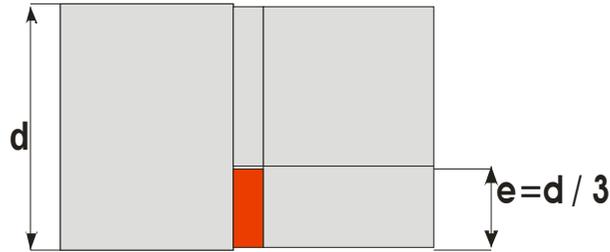


Fig. 55.- Método **OLIVIA** (espesor 40-80 μm y ancho $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{3}$ d).

La cinta de plástico tiene un espesor de 40 a 80 μm (normalmente este último), tratando de resolver el compromiso de que no se produzcan roturas incontroladas de la misma, y que al mismo tiempo sea lo suficientemente flexible como para que se tenga una probabilidad razonable de mantener la transmisión de cargas en todo el espesor del material tratado, como resultado de la deformación de la cinta por los pétreos durante la compactación (CEMEX Concretos, 2005).

El equipo va montado en el chasis de una carretilla elevadora de carga frontal, y consta de los siguientes elementos:

- a) Una viga fija, unida al vehículo portante (CEMEX Concretos, 2005).
- b) Una viga móvil, guiada en su movimiento de traslación con respecto a la viga. Una vez alcanzada su posición de trabajo, se apoya mediante gatos hidráulicos en la capa a fisurar (CEMEX Concretos, 2005).
- c) El dispositivo de fisuración propiamente dicho, el cual se desplaza a lo largo de la viga móvil mediante un sistema de motor hidráulico y cadena de transmisión (CEMEX Concretos, 2005).

Con ello se asegura:

1. La penetración del elemento de corte en la capa a fisurar (CEMEX Concretos, 2005).
2. El desplazamiento del mismo a lo largo de una distancia que se puede ajustar (CEMEX Concretos, 2005).

El elemento de corte consiste esencialmente en una cuchilla estrecha (2 cm.), provista en su parte delantera de una ranura de alimentación de la cinta de plástico. Esta se suministra en rollos, que se montan en el equipo. La salida de la cinta, en posición vertical, se realiza a través de una segunda ranura en la parte del elemento de corte (CEMEX Concretos, 2005).

Un mecanismo interno produce en la cinta los cambios de dirección necesarios. Mientras que el elemento de corte avanza en su movimiento en el interior de la capa, la cinta de plástico se desenrolla y se inserta con su parte ancha en posición vertical en el surco que se va formando. Al final de cada pasada, la cinta se corta automáticamente tanto el desplazamiento de la viga móvil como el del elemento de corte se controlan electrónicamente. Para evitar ser arrastrada por los equipos que se encuentran en la obra, la cinta se coloca a una profundidad de 8 a 10 cm. por debajo de la superficie (CEMEX Concretos, 2005).

Con ello se tiene en cuenta además tanto el descenso de la cota de esta última que se produce tras el paso de los rodillos, como un eventual afine para mejorar la regularidad superficial, en el que se eliminan algunos centímetros de material. Se utilizan cintas de 8 cm. de ancho en el caso de una capa de 25 cm. de espesor final, es decir, aproximadamente de un tercio de este último; en general, las juntas se suelen disponer con una separación del orden de 3 m (CEMEX Concretos, 2005).

El elemento de corte se posiciona automáticamente. Con ayuda de los controles en la cabina, el operador inicia el ciclo de prefisuración, dividido en las siguientes fases:

- Colocación de la viga móvil en su posición de trabajo (elemento de corte levantado) (CEMEX Concretos, 2005).
- Comienzo del ciclo (controlado desde la cabina); descenso de la viga móvil hasta que el elemento de corte penetra la profundidad requerida en la capa tratada; desplazamiento del elemento de corte en el ancho de trabajo; durante el mismo, alimentación automática de la tira de plástico (CEMEX Concretos, 2005).
- El elemento de corte vuelve a su posición inicial, y la máquina avanza a un paso de prefisuración (normalmente igual a 3m) a fin de iniciar el siguiente ciclo (CEMEX Concretos, 2005).

Es evidente que se trata de un método mucho más económico, pero que, por los defectos de regularidad superficial a que da lugar, en el caso de las juntas transversales solo es utilizado en pavimentos con tránsito circulando a velocidad no muy elevada.

IV.3.2.3.- *JUNTAS ACTIVAS*.

El último sistema denominado *JUNTAS ACTIVAS*, consiste en practicar un surco en todo el espesor de la capa, una vez extendida y tras haber sufrido una ligera compactación, a fin de que los bordes del surco se mantengan estables. Se introduce en el mismo un perfil ondulado de plástico rígido; se cierra el surco y se finaliza la puesta en obra de la forma usual (Fig. 56) (CEMEX Concretos, 2005).



Fig. 56.- Método de *JUNTAS ACTIVAS*.

Cada elemento de junta tiene una longitud de 2m y se sitúa en el eje de cada carril, transversalmente al mismo y en posición vertical. El ancho es del orden de los dos tercios del espesor de la capa (Fig. 57) y se coloca apoyando en el fondo de la misma, de forma que quede al menos a 5 cm. de la superficie, para no perturbar el resto de las operaciones de compactación y afine (CEMEX Concretos, 2005).

Los elementos suelen disponerse con una separación entre 2 y 3 m en sentido longitudinal. Su forma ondulada permite obtener una adecuada transmisión de cargas entre los labios de las juntas incluso en materiales como la arena-cemento, que no poseen un esqueleto granular adecuado (CEMEX Concretos, 2005).

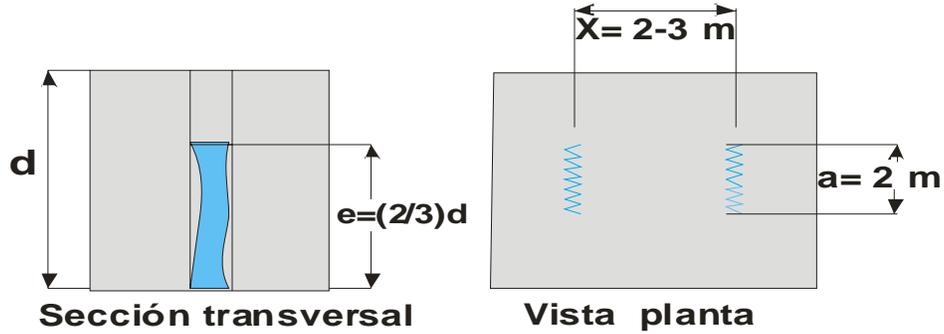


Fig. 57.- Perfil ondulado de plástico rígido.

El sobrecosido que implica esta operación, aun siendo del orden del doble del obtenido con el equipo CRAFT, es también reducido (CEMEX Concretos, 2005). En todos los equipos de prefisuración en fresco, las juntas se realizarán en el material recién extendido, antes de haber finalizado su compactación.

IV.4.- EQUIPO DE COMPACTACION Y AFINAMIENTO.

La composición del equipo para realizar la compactación y afine (Fig. 58), así como el número de pasadas necesario, deberán definirse mediante un tramo de ensayo. En general, es conveniente que el equipo de compactación este compuesto, como mínimo, por un rodillo vibratorio (pata de cabra) y un compactador neumático, y en el caso del afinamiento es suficiente con una motoniveladora (Jofré, 20003-2).

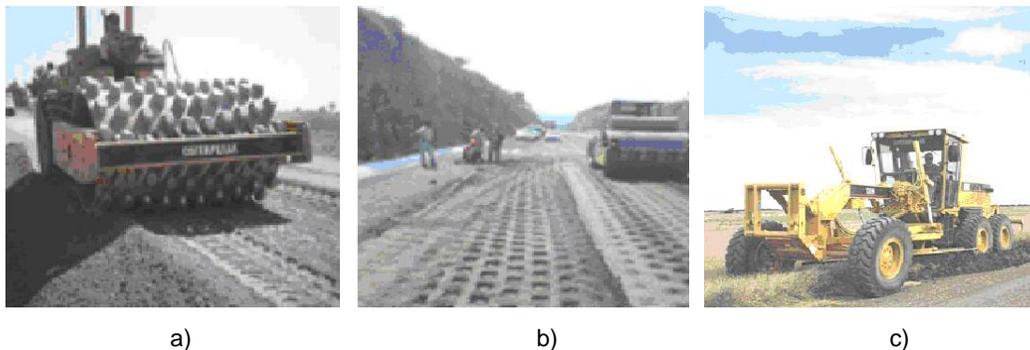


Fig. 58.- Equipo para compactación y afinamiento: a) pata de cabra b) rodillo liso c) motoniveladora.

CAPITULO V.- VENTAJAS DEL METODO.

Hoy en día se cuenta con varios ejemplos sobre esta técnica de recuperación con cemento Pórtland en obra en países europeos como España, Francia, Alemania, el caso de Estados Unidos, entre otros, pero es importante analizar un ejemplo real y sobretodo en nuestro país México, por este motivo a continuación se presentara a manera de ejemplo la rehabilitación de la autopista México-Querétaro.

V.1.- CASO DE RECUPERACION DE PAVIMENTOS CON CEMENTO PÓRTLAND EN OBRA.

Se presenta el resumen del proyecto de rehabilitación de la autopista: México-Querétaro en su tramo: Tepozotlán – Palmillas, del kilómetro 132+800 al kilómetro 148+000 (Fig. 59) en sus dos cuerpos A y B; en el cual se realizo la recuperación del pavimento con cemento Pórtland.



Fig. 59.- Tramo Tepozotlan-Palmillas.

El proyecto de recuperación consintió en formar 40 cm. de base estabilizada con 9% de cemento Pórtland, elaborada con material recuperado del pavimento existente y material de banco; posterior a esto la construcción de 10 cm. de carpeta de concreto asfáltico (Sánchez, 2005-2).

El equipo empleado (Fig. 60) es el siguiente:

- Recuperadora de pavimentos *WR 2500 S* de CEMEX.
- Máquina dosificadora de cemento *WM 1000*.
- Pipa para agua.
- Camiones para transportar cemento.
- Cortadora de juntas.
- Compactador pata de cabra.
- Compactador neumático.
- Motoniveladora para afine.



a)



b)



c)

Fig. 60.- Equipo empleado para la recuperación a) tren de trabajo b) pipa para agua c) Recuperadora *WR 2500 S* y dosificadora *WM1000*

Los trabajos de recuperación se iniciaron en febrero del 2005, en el kilómetro 148+000 (caseta Palmillas) en el sentido Querétaro- México (cpo A) avanzando hacia México. Se termino en octubre del mismo año, hasta el kilómetro 132+800, de los cuerpos A y B (Sánchez, 2005-1).

Se desvió el tránsito vehicular del cuerpo A hacia el cuerpo B, para trabajar en los aproximadamente 15 m de corona del cuerpo A, que aloja tres carriles de circulación y acotamiento externo e interno. Estos trabajos se realizaron en una longitud de 5 km, después se pasaría el tránsito al cuerpo recién rehabilitado para trabajar en 5 km del cuerpo B, y de esta forma alternada por subtramos de 5 km se llegó al kilómetro 132+800 (Fig. 61) (Sánchez, 2005-2).



Fig. 61.- Desvió del tránsito.

En los carriles intermedios, de alta velocidad y acotamiento interno se freso la carpeta, sobre esta superficie fresada se colocó 30% de material de base hidráulica procedente del banco los "Fresnos" (Fig. 62), localizado en el km 130+000 D/D 5000 m, formado por basalto (Sánchez, 2005-1).



Fig. 62.- Extracción de material del banco los "Fresnos".

Una vez colocado el material, con la máquina recuperadora de pavimentos (*WR 2500 S*) en un ancho máximo de 3 m, se homogeneizó el material de banco con el material del pavimento que fue cortando la máquina recuperadora (para lograr los 40 cm. de recuperación), al mismo tiempo se fue añadiendo el 9% de cemento Pórtland en forma de lechada, mediante la "dosificadora de cemento" *WM 1000*, la cual al frente es empujada por la recuperadora y a su vez empuja a la pipa de agua que se desplaza enganchada a dicha dosificadora (Fig. 63) (Sánchez, 2005-1).



a)



b)

Fig. 63.- Recuperación del pavimento con cemento (en forma de lechada) en obra a) Maquina WR 2500 S b) Material recuperado con cemento en forma de lechada.

Las juntas transversales se realizaron con la ayuda de una “quilla”, cortando las juntas a una profundidad de $\frac{1}{3}$ del espesor del material recuperado, esviajadas 6:1, separadas 3 m entre cada junta (Fig. 64) (Sánchez, 2005-2).



a)



b)

Fig. 64. Elaboración de las juntas transversales a) juntas transversal en fresco b) “quilla” para elaborar las juntas.

Posterior al corte de las juntas se procedió a hacer una compactación inicial del material con un rodillo pata de cabra (Fig. 65) de 9 t de peso, dando entre 7 y 8 pasadas por cada capa de 40 cm. de espesor, cuidando que entre la homogeneización del material y la compactación no transcurrieran mas de 2 horas (Sánchez, 2005-1).



Fig. 65.- Compactación inicial con rodillo pata de cabra.

Después de la compactación inicial se realizó el trabajo de afinamiento con una motoniveladora (Fig. 66a), para después realizar la compactación final con un rodillo liso vibratorio de 6 t de peso, dando 4 pasadas (Fig. 66b) (Sánchez, 2005-1).



Fig. 66.- a) Afinamiento con una motoniveladora y b) compactación final con rodillo liso vibratorio.

En el carril de baja velocidad y acotamiento exterior se freso la carpeta, se acamellono el material para su posterior uso y se excavo hasta nivel inferior de capa subrasante, después se llevo a cabo la construcción de la capa subrasante con el material fresado, sobre la capa subrasante se coloco material 100% de banco y así formar una base estabilizada con cemento Pórtland, la máquina recuperadora solo homogeneizo el material con el cemento Pórtland, lo cual no se puede considerar propiamente como una recuperación sino como una estabilización.

Posteriormente a los trabajos de afine se le adicionó un riego de impregnación, que entre otros motivos esta el de proteger a la capa recuperada de la intemperie, de la evaporación del agua y del efecto del tránsito; y por último se llevo a cabo la construcción de la carpeta de concreto asfáltico con un espesor de 10 cm., en dos capas de 5 cm. cada una.

Dentro de las ventajas que se pueden observar en los trabajos de recuperación del pavimento existente con esta técnica y con la ayuda del tren de trabajo utilizado que consta de la máquina recuperadora de pavimentos *WR 2500 S* de CEMEX, la máquina dosificadora de cemento *WM 1000*, el compactador pata de cabra, el compactador neumático y la motoniveladora para el afinamiento; se encuentran el poder obtener una disminución importante en el tiempo de ejecución de la obra, al sustituir algunas de las operaciones del proceso como se muestra en la figura 67, logrando obtener como resultado un avance en promedio de 400 a 450 metros lineales/15 m de ancho al día, en los 40 cm. de profundidad del tratamiento, combinando el trabajo de recuperación con el de estabilización, dando como resultado a su vez una reducción en los costos de operación.

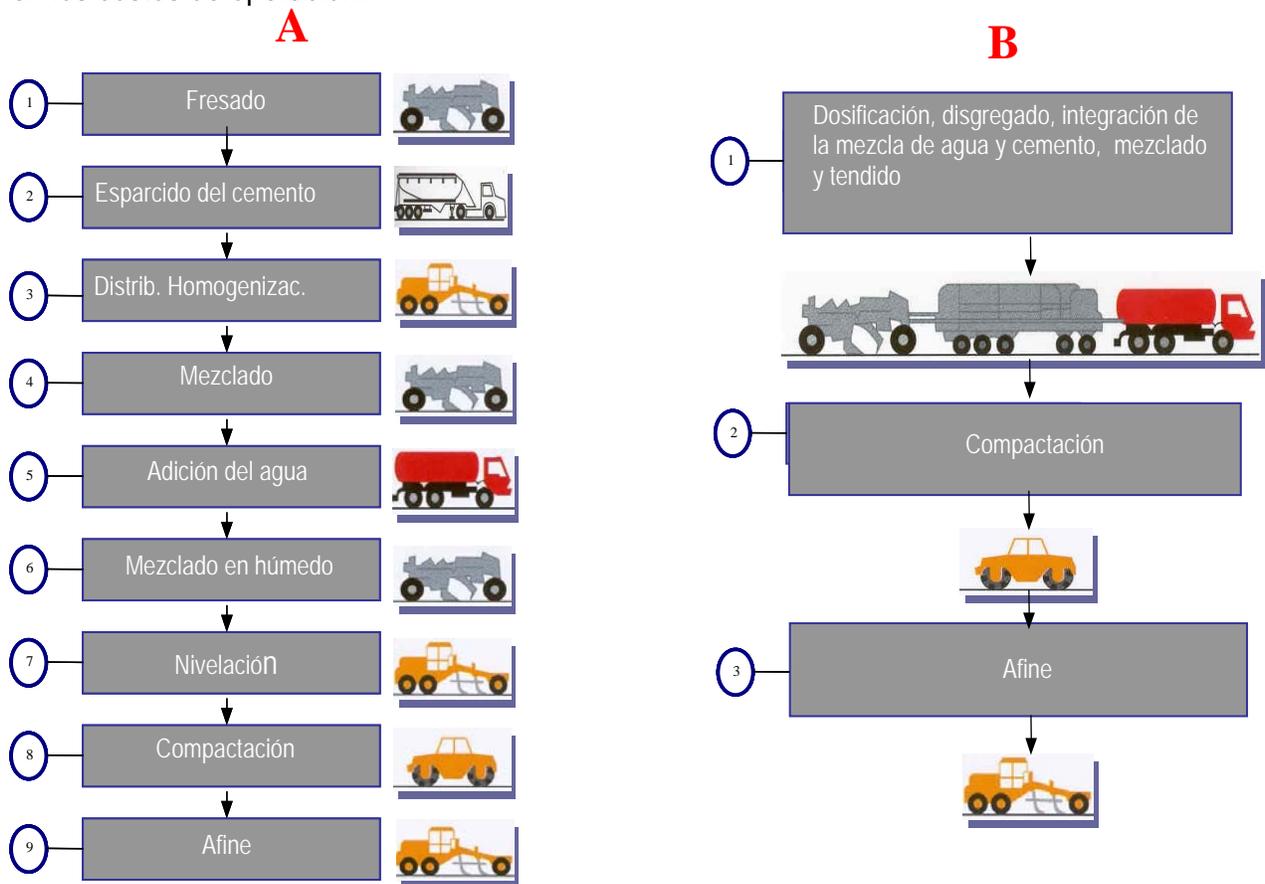


Fig. 67.- Representación esquemática del proceso de ejecución comparando el método tradicional (A) con el propuesto (B).

Otra de las ventajas es la durabilidad del pavimento después de la recuperación, debido a que el periodo de diseño con el cual se realizó el proyecto es del orden de 12 a 15 años dentro de los cuales el pavimento solo requerirá de trabajos de conservación rutinaria (trabajos superficiales como bacheo)

Además se obtuvieron resistencias en la obra de recuperación con el 9% de cemento Pórtland, para un periodo de vida útil de 12 a 15 años, las cuales se mencionan a continuación:

- A los 7 días se obtuvo una resistencia de 100 kg/cm^2 .
- A los 14 días la resistencia que se obtuvo fue de 133 kg/cm^2 .
- Por último a los 28 días la resistencia que se logró alcanzar fue de 135 kg/cm^2 .

Las resistencias obtenidas en la estabilización de material 100% de banco con cemento Pórtland son las siguientes:

- A los 7 días la resistencia fue de 149 kg/cm^2 .
- A los 14 días se obtuvo una resistencia de 169 kg/cm^2 .

CONCLUSIONES.

Cada pavimento tiene sus problemas específicos, por lo que es necesario llevar a cabo una evaluación previa del mismo, para determinar las causas reales de las fallas o defectos que presente el pavimento, sean superficiales o estructurales; así mismo determinar cual es la solución mas viable tanto estructural como económica a dicho problema.

El método de recuperación con cemento Pórtland en obra resulta una alternativa aceptable en la conservación y mantenimiento de vías de comunicación sea una carretera, una vialidad o calle urbana, incluso en aeropuertos; una de razones de esto se debe a que resulta recomendable aplicarlo a pavimentos que presenten agrietamiento por fatiga por deficiencia estructural en la base, que presenten exceso de arcilla y en general aquellos pavimentos que se encuentren muy degradados; otras de las razones por la que resulta ser una alternativa aceptable se debe a las ventajas que se obtienen en comparación con el método tradicional y con algunos otros métodos de recuperación de pavimentos.

Una de las ventajas que presenta la recuperación con cemento Pórtland en obra es el empleo de maquinaria moderna, de mayor potencia y rendimiento, la cual a venido presentando avances importantes los que se ven reflejados en la maquinaria utilizada en la etapa de disgregación y mezclado, en los equipos de dosificación de cemento y en el equipo utilizado en la realización de juntas en fresco; lo cual representa una disminución importante en el tiempo de ejecución y por ende en los costos.

Otra de las ventajas de esta técnica es la mejora de los materiales obtenida del reciclado con cemento Pórtland, la cual se caracteriza por tener una mayor rigidez en comparación con la de los materiales originales. Lo cual se representa con un incremento en la capacidad de soporte inicial y una disminución en las deflexiones.

Podemos enumerar tres aspectos fundamentales que influyen en la aceptación de esta técnica.

1. El aprovechamiento de los materiales pétreos del lugar al reciclarlos y tratarlos con cemento Pórtland, lo cual es de gran beneficio ya que no es necesario explotar, trasladar y almacenar dichos materiales y representa un ahorro en los costos, la adición de materiales queda limitada al cemento y agua; en caso de ser necesario la aportación de un corrector granulométrico.
2. La utilización de equipo y maquinaria moderna da como resultado una reducción de operaciones en el proceso de ejecución de la obra, representando una disminución en los tiempos y en los costos.
3. La seguridad del usuario, debido a que el tiempo en que se ve afectado es mínimo comparado con un proceso tradicional, así mismo el tiempo en que el pavimento estará en buenas condiciones de servicio después de su rehabilitación es mayor.

FUENTES DE INFORMACION.

Ponencia del 1er Simposio Internacional sobre Estabilización de Explanadas y Reciclado In Situ de Firmes con Cemento, Salamanca (España), 1 al 4 de octubre de 2001. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. Asociación Española de la Carretera, Madrid (España), 2001.

Curso de Recuperación de Pavimentos.

Profesor del curso.

Ing. Carlos Jofré Ibáñez.

Auditorio IMCYC.

Ciudad de México, 7 de marzo de 2003.

PANORAMICA DE LA MAQUINARIA MODERNA PARA LA EJECUCION DE OBRAS DE ESTABILIZACION Y RECICLADO IN SITU CON CEMENTO.

Ing. Carlos Jofré Ibáñez.

Auditorio IMCYC.

Ciudad de México, 7 de marzo de 2003.

PAVIMENTOS.

Gordón Hale.

Versión Castellana de Dr. en Ing. Adrián Margarit.

Editorial Blume.

Primera edición 1976.

Num. .Pág. 60.

PAVIMENTOS DE CONCRETO.

Procedimiento para autoconstrucción.

Arq. Gustavo G. Méndez Fragoso.

IMCYC.

México 1992.

Num. Pág. 29.

PAVIMENTOS DE CONCRETO.

Diseño y construcción, juntas, sobre carpetas, apertura rápida al tráfico.

IMCYC y ACPA.

México 1995.

Num. Pág. 50.

RECICLADO DE PAVIMENTOS EN FRIO.

Empleando emulsiones asfálticas cationicas.

Gustavo Rivera E.

Editorial Alfa-Omega.

México 1997.

Num. Pág. 20.

CURSO SOBRE DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS FLEXIBLES.
Asociación Mexicana del Asfalto, A.C.
Marzo 2000.
Num. Pág. 30.

RECUPERACION DE PAVIMENTOS IN SITU CON CEMENTO PORTLAND.
“Métodos de corte para bases estabilizadas”.
Gerencia de infraestructura y vías terrestres CEMEX concretos.
Abril 2005.
Num. Pág. 10.

SEMINARIO INTERNACIONAL TARIFIACCION DE CARRETERAS, FINANCIAMIENTO,
REGULACION Y EQUIDAD.
“Rehabilitación del pavimento de la autopista México-Querétaro”.
Ing. Miguel Sánchez Mejía.
Boletín AMIVTAC.
Publicación bimestral No. 26.
Junio 2005
Pág. 20 y 21.

CURSO REGIONAL “REHABILITACION DE PAVIMENTOS FLEXIBLES”.
Ponente.
Ing. Miguel Sánchez Mejía.
2005.
Num. Pág. 25.

“CONSERVACION, REHABILITACION Y REPARACION DE PAVIMENTOS”.
Técnicas de Conservación y Rehabilitación.
Ings. Juan Carlos Capistran Fernández, Juvenal León Gavia, Cristino Montoya Ceron.
Mayo 2006.
Num. Pág. 20.

CURSO REGIONAL “REHABILITACION DE PAVIMENTOS FLEXIBLES”.
Levantamiento de deterioros.
Ing. José Manuel Córdova Alanis.
2005
Num. Pág. 30.

FALLAS EN LOS CONCRETOS HIDRAULICOS.
CEMEX Concretos.
2004.
Num. Pág. 35.

www.cat.com

www.wirtgen.com

www.sct.gob.mx