



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA CIVIL, TOPOGRÁFICA Y GEODÉSICA

RECICLADO DE PAVIMENTOS CON CEMENTO PORTLAND

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A:

ARTURO ORTEGA MÉNDEZ

DIRECTOR DE TESIS: ING. HÉCTOR GUZMAN OLGUIN



MÉXICO D.F.

ABRIL 2005.

0343069



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
FING/DCTG/SEAC/UTIT/052/04

Señor
ARTURO ORTEGA MÉNDEZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. HÉCTOR JAVIER GUZMÁN OLGUÍN, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"RECICLADO DE PAVIMENTOS CON CEMENTO PORTLAND"

INTRODUCCIÓN

- I. ESTUDIOS PREVIOS DE MECÁNICA DE SUELOS
- II. CONSIDERACIONES GENERALES DEL PAVIMENTO
- III. RECICLAJE DE PAVIMENTOS CON CEMENTO PORTLAND
- IV. PROCESO DE DISEÑO
- V. ASPECTOS FUNCIONALES Y DETALLES CONSTRUCTIVOS
- VI. AGENTES ESTABILIZADORES
- VII. EQUIPOS PARA LA RECUPERACIÓN EN FRÍO
- VIII. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 3 de Mayo del 2004.
EL DIRECTOR

Vo. Bo.

Vo. Bo.
28-III-05

C. J. S.
28 MARZO 2005

Vo. Bo.
28-Marzo-05

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/AJP/crc

Vo. Bo.
H. Hardea
28. marzo, 2005

Vo. Bo.
28 marzo 2005
Alberto



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA CIVIL,
TOPOGRÁFICA Y GEODÉSICA

OFICIO FING/DCTG/SEAC/UTIT/052/04

ASUNTO: Solicitud de Jurado para
Examen Profesional

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA DE LA UNAM
Presente

El señor ARTURO ORTEGA MÉNDEZ, registrado en esta facultad con el número de cuenta 09551393-5, en la carrera de **INGENIERO CIVIL**, quien ha cubierto los requisitos académicos necesarios para realizar sus trámites de Examen Profesional, le solicita atentamente autorice el siguiente jurado:

| ASIGNACIÓN: | NOMBRE: | R.F.C. |
|----------------|------------------------------------|-------------|
| PRESIDENTE: | M.I. HUMBERTO GARDEA VILLEGAS | GAVH-360730 |
| VOCAL: | ING. HÉCTOR JAVIER GUZMÁN OLGUÍN | GUOH-561018 |
| SECRETARIO: | ING. ERNESTO RENÉ MENDOZA SÁNCHEZ | MESE-490307 |
| 1er. SUPLENTE: | M.I. RICARDO R. PADILLA VELÁZQUEZ | PAVR-540923 |
| 2do. SUPLENTE: | M.I. ALBA BEATRÍZ VÁZQUEZ GONZÁLEZ | VAGA-630702 |

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 10 de marzo del 2005
EL JEFE DE LA DIVISIÓN

ENTERADO

DR. ALBERTO JAIME P.

SR. ARTURO ORTEGA MÉNDEZ

AJR/MTH*crc

EP-4

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Arturo Ortega Méndez

FECHA: 13 Abril 2005

FIRMA: [Firma]

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA CIVIL, TOPOGRÁFICA Y GEODÉSICA

T E S I S

RECICLADO DE PAVIMENTOS CON CEMENTO PORTLAND

ARTURO ORTEGA MÉNDEZ

No. Cta. 095513935

ABRIL 2005

RECICLADO DE PAVIMENTOS CON CEMENTO PÓRTLAND

| Capítulo | Tema | PAG. |
|-------------|--|------|
| | Introducción | |
| I | ESTUDIOS PREVIOS DE MECANICA DE SUELOS | |
| | 1.1 Objetivo de los estudios previos | 1 |
| | 1.2 Clasificación de los suelos y granulometría | 1 |
| | 1.3 Determinación de la resistencia y capacidad de carga del suelo | 3 |
| | 1.4 Límites de plasticidad de Atterberg | 5 |
| | 1.5 Pruebas de compactación Proctor Estándar y Modificado | 6 |
| II | CONSIDERACIONES GENERALES DEL PAVIMENTO | |
| | 2.1 Componentes del pavimento. Elementos que lo constituyen | 14 |
| | 2.2 Tráfico | 15 |
| | 2.3 Deterioro del pavimento | 19 |
| | 2.4 Condiciones ambientales | 21 |
| | 2.5 Mantenimiento del pavimento | 22 |
| | 2.6 Alternativas de rehabilitación | 22 |
| III | RECICLAJE DE PAVIMENTOS CON CEMENTO PÓRTLAND | |
| | 3.1 Definición de reciclado | 23 |
| | 3.2 Tipos de reciclado | 23 |
| | 3.3 Trenes de reciclaje | 24 |
| | 3.4 Beneficios del reciclado en frío | 26 |
| | 3.5 Características de la capa recuperada | 27 |
| IV | PROCESO DE DISEÑO | |
| | 4.1 Investigación y diseño del pavimento | 28 |
| | 4.2 Categorías del reciclaje en frío | 32 |
| | 4.3 Procedimientos de investigación para diferentes categorías de reciclaje | 41 |
| | 4.4 Diseño de mezclas | 42 |
| | 4.5 Enfoques para el diseño de pavimentos | 42 |
| | 4.6 Dimensionamiento de la rehabilitación de un firme existente mediante reciclado in situ con cemento | 43 |
| V | ASPECTOS FUNCIONALES Y DETALLES CONSTRUCTIVOS | |
| | 5.1 Generalidades | 46 |
| | 5.2 Planeación del reciclaje | 46 |
| | 5.3 Acomodo del tráfico | 47 |
| | 5.4 Trabajos preliminares | 48 |
| | 5.5 Juntas y traslapes | 48 |
| | 5.6 La operación de reciclaje | 52 |
| | 5.7 Afine, compactación y riego de protección | 53 |
| | 5.8 Control de calidad | 58 |
| VI | AGENTES ESTABILIZADORES | |
| | 6.1 Tipos de agentes estabilizadores | 59 |
| | 6.2 Estabilización con cemento | 61 |
| | 6.3 Estabilización con emulsión asfáltica y asfalto espumado | 67 |
| | 6.4 Estabilización con cal | 68 |
| | 6.5 Ventajas de la estabilización | 69 |
| | 6.6 Cuadro comparativo | 69 |
| VII | EQUIPOS PARA LA RECUPERACIÓN EN FRÍO | |
| | 7.1 Dispersores de cemento | 70 |
| | 7.2 Equipos recicladores/recuperadores del pavimento | 70 |
| | 7.3 Dosificadoras de cemento en forma de lechada | 74 |
| VIII | CONCLUSIONES | 75 |

Introducción

Los factores que distinguen el desarrollo de cualquier país se miden a partir de la infraestructura con que cuenta, más aún si ésta le permite estar bien comunicado, ampliar sus relaciones comerciales, generar empleo y fomentar el turismo entre otras actividades.

Sin duda alguna, lo anterior nos conduce a estar atentos del estado que guardan nuestra red carretera y de autopistas que solicitan no sólo su proyecto, correcta ejecución, control y operación sino que además demandan su ampliación, conservación y mantenimiento con el objeto de prolongar su vida útil, siendo una de estas alternativas; el reciclado con cemento Portland, que en fechas recientes ha tenido un auge sin precedente a nivel mundial y de los que varios países entre ellos México se reportan casos de éxito.

Dicha técnica permite reutilizar los materiales de ciertas capas del pavimento que gracias a medios mecánicos se escarifican, disgregan, homogenizan y a los que se añade un cierto contenido de conglomerante (en este caso cemento) y agua para su posterior extendido, compactado y curado a fin de lograr con ello una nueva estructura capaz de soportar las cada vez mayores cargas a que está sometida y al aumento del volumen vehicular que circula por las mismas.

Económicamente el reciclado con cemento Portland representa disponer de menores cantidades de material fino y grueso y que además implican un gasto adicional si se considera que provienen de un banco de préstamo muchas veces remoto al sitio de los trabajos, disminución del personal que opera la maquinaria, la automatización del proceso, la apertura rápida al tráfico y el ahorro del tiempo que ello implica.

Es por eso que la presente tesis pretende dejar en claro las consideraciones más importantes que cualquier ingeniero, constructor, proyectista y/o persona interesada con el tema necesite resolver para su adecuada aplicación. No obstante cada uno de los tópicos que incluye esta obra, son materia de un estudio quizá más profundo y detallado.

Experiencia en México

Los primeros trabajos en nuestro país se remontan al uso de métodos tradicionales de aspersión del cemento, con ayuda de camiones silo y extendedoras de dosificación ponderal o volumétrica en los que no se tenía cómo controlar la emisión del polvo generado, desperdiándose el valioso material mientras se corría con los peligros que implicaba operar esta clase de prácticas.

El viento, el tráfico y las condiciones del clima se convierten en factores que limitaban la velocidad de avance, los plazos de entrega del proyecto y una apropiada distribución del aglomerante, por ende un nulo control de calidad. Ante los pobres resultados obtenidos, se suspenden estos procedimientos reanudándose la recuperación con cemento hasta el año 2002 con el proyecto Oaxaca-Tehuantepec cuya longitud abarcó 35 km, con un ancho de 7 m y un espesor de 15 cm. El consumo final de esta obra fue de 50 kg/m³ y un volumen en toneladas de 1,837.50.

En Diciembre de ese mismo año, concluyó la 1ª etapa de la reconstrucción de la carretera Durango-Mazatlán a la que se dotó de un volumen de 1200 ton para abarcar una longitud de 20 km, con un espesor de 40 cm y un ancho de 7 m. Reportándose un consumo de 210 kg/m³.

Para enero del 2003 la zona sureste del país recibe los primeros beneficios, estimándose un volumen de 30,000 ton para una longitud de 30 km, ancho de 8 m y espesor de 40 cm en el tramo Briseñas-Sahuyayo siendo su consumo definitivo de 320 kg/m³ y en Diciembre para el tramo La Tinaja-Paso del toro de 670 ton para la recuperación de 40 km de longitud. El total de obras ejecutadas fue de 22, arrojando un área total de pavimento reciclado de 871,845 m², longitud de 62.27 km y 124.55 km/carril. Se estima para el año 2004 el aumento fue del 11.2% lo que representó un área efectiva de 9,797,723 m² con una longitud de 699.84 km y 1,399.67 km/carril.

Destacándose principalmente los siguientes tramos:

1. Cuernavaca-Acapulco en sus distintos cadenamientos (136+000 – 155+400, 182+000 – 222+300, 288+420 – 297+300, 288+420 – 297+300)
2. Córdoba-Veracruz (27+600 – 45+200 cuerpo A, 32+000 – 44+000 cuerpo B y 83+100 – 98+000 cuerpo A)
3. Y la estación Don-Nogales en varios cortes (Navojoa-Cd.Obregón, Cd.Obregón-Guaymas y Hermosillo-Magdalena I, II y III). Lo que confirma al reciclado como una verdadera alternativa dentro de los procesos de mantenimiento y conservación de pavimentos.

1.1 Objetivo de los estudios previos

Ante la necesidad perenne que representa caracterizar al suelo para muy diversos propósitos, entre ellos el que atañe a esta obra: "Reciclado de pavimentos con cemento Portland"; resulta necesario dejar en claro ciertos aspectos relacionados con todas y cada una de las capas de que están compuestos, así como el de las propiedades mecánicas de los materiales que los integran y las cantidades óptimas de los mismos, en pro de satisfacer los nuevos requerimientos de capacidad de carga, resistencia, durabilidad, etc. por mencionar algunos, que significan el aumento del aforo vehicular, la necesidad de una mayor vida útil y el mantenimiento a causa del deterioro en general, que sufre actualmente el sistema carretero y de autopistas a nivel mundial.

Además, un estudio geotécnico de los suelos nos permitiría identificarlos, ubicarlos y ubicarlos para en consecuencia disponer de ellos optimizando así los recursos de que se dispone.

Precederán a los estudios de laboratorio, los que tengan por objeto definir el tipo más conveniente de estabilización, la manera en que se comporta el suelo en su estado natural y durante el proceso de compactación para finalmente determinar la fórmula de trabajo más conveniente.

Con toda la información obtenida a partir de estos trabajos preliminares estaremos pues en mejores condiciones de seleccionar la alternativa más adecuada a las necesidades que el firme solicita para su correcto reciclado.

1.2 Clasificación de los suelos y granulometría

Comencemos por definir al suelo como todo material constituido a base de minerales, producto del intemperismo del lugar en que actualmente yace y/o la acción de agentes de transporte a lo largo de diversas eras geológicas, con un arreglo definido y con una cierta cantidad de agua, a quien le debe en buena medida su comportamiento mecánico.

Hacia 1942 el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) dividió al suelo para su estudio en dos grandes ramas en función del tamaño de sus partículas, las primeras; mayores a la malla No. 200 (0.074mm) y menores que la malla de 3" (7.62 cm) llamadas gruesas y por otra parte las finas, que por el contrario pasan la malla No. 200. Subdividiendo posteriormente a las de grano grueso en gravas y arenas y a las finas de acuerdo a sus características de plasticidad de las más adelante hablaremos (Atterberg).

A continuación se ilustrarán tres ejemplos de clasificación de suelos, el primero; corresponde a una incipiente clasificación internacional basada sólo en el tamaño de la partícula.

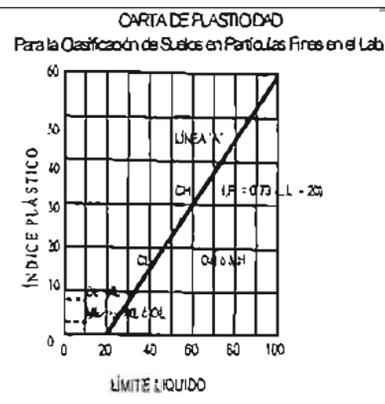
| | | | | | |
|--------------|--------------|------------|------|---------|--------|
| Tamaño en mm | 2 | 0.2 | 0.02 | 0.002 | 0.0002 |
| | Arena Gruesa | Arena Fina | Limo | Arcilla | |

El segundo sistema, debido a Kopecky fue publicado en 1936 y finalmente el SUCS del que ya se hizo mención.

| Material | Característica | Tamaño en mm |
|----------|----------------|------------------|
| Piedra | | > 70 mm |
| Grava | Gruesa | 30 a 70 |
| | Media | 5 a 30 |
| | Fina | 2 a 5 |
| Arena | Gruesa | 1 a 2 |
| | Media | 0.2 a 1 |
| | Fina | 0.1 a 0.2 |
| Polvo | Grueso | 0.05 a 0.1 |
| | Fino | 0.02 a 0.05 |
| Limo | Grueso | 0.006 a 0.02 |
| | Fino | 0.002 a 0.006 |
| Arcilla | Gruesa | 0.0006 a 0.002 |
| | Fina | 0.00002 a 0.0006 |

Tabla 1.1 Clasificación de suelos según Kopecky

| DIVISIÓN MAYOR | | Símbolo | NOMBRES TÍPICOS | CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO | | | |
|---|--|---|--|---|--|---|--|
| SUELO DE PARTICULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200-- | Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4 Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4 PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE 1/2 CM COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA (No. 4) | GW | Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco ó nada de finos | DETERMINESE LOS PORCENTAJES DE GRAVA Y ARENA DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA, DEPENDIENDO DEL PORCENTAJE DE FINOS (Fracción que pasa por la malla No. 200) LOS SUELOS GRUESOS SE CLASIFICAN COMO SIGUE: Menos del 5%: GW ó G; SW, SP; Más de 12%: Casos de frontera, que requieren el uso de símbolos dobles. | Coeficiente de uniformidad C_u mayor de 4 Coeficiente de curvatura C_c entre 1 y 3 $C_u = (D_{60}/D_{10})$ $C_c = [(D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})]$ | | |
| | | | GP | | Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco ó nada de finos | NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW | |
| | | GM | d | | Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo | Límites de Atterberg abajo de la "línea A" ó I.P. menor que 4 | Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles |
| | | | | | UC | Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla | |
| | | SW | d | | | Arenas bien graduadas, arenas con gravas con poco ó nada de finos | $C_u = (D_{60} / D_{10})$ mayor que 6 $C_c = [(D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})]$ entre 1 y 3 |
| | | | | | SP | Arenas mal graduadas, arenas con gravas con poco ó nada de finos | No satisfacen todos los requisitos de graduación para SW |
| | | SM | d | | | Arenas limosas, mezclas de arenas y limo | Límites de Atterberg abajo de la "línea A" ó I.P. menor que 4 |
| | | | | | SC | Arenas arcillosas, mezclas arenas y arcilla | Límites de Atterberg arriba de la "línea A" ó I.P. mayor que 7 |
| | | SUELO DE PARTICULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 - Las partículas de 0.074 mm de diámetro (la malla No. 200) son aproximadamente, las más pequeñas a simple vista | LIMOS Y ARCILLAS Límite-liquido menor de 50 | | | M | Limos inorgánicos, polvo de tiza, limos arenosos ó arcillosos ligeramente plásticos |
| | | | | | OL | | Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres |
| CL | Limos inorgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad | | | | | | |
| LIMOS Y ARCILLAS Límite-liquido mayor de 50 | MH | | Limos inorgánicos, limos masivos ó diastroncos, limos elásticos | | | | |
| | | | CH | Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas | | | |
| | OH | | Arcillas orgánicas ó alta plasticidad limos orgánicos de media plasticidad | | | | |
| SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS | PI | | Turbas y otros suelos altamente orgánicos | | | | |



* Clasificación de frontera - Los suelos que poseen las características de dos grupos se designan con la combinación de los dos símbolos. Por ejemplo GWGC, mezcla de arena y grava bien graduada con cementante arcillosa.

- Todos los tamaños de las mallas en esta carta son los U.S. Standard

* La subdivisión de los grupos GM y SM en subdivisiones d y u. Son para caminos y aeropuertos únicamente, la subdivisión esta basada en los límites de Atterberg. El subgrupo se usa cuando LL es de 26 ó menos y el I.P. es de 6 ó menos. El subgrupo es usado cuando el LL es mayor que 26

Existen otros criterios mucho más simples, como el del AASHTO que agrupa a los suelos considerando a aquellos que tienen propiedades similares en cuanto a capacidad de carga y niveles de servicio se refiere, en grupos que van desde el A1 al A7 de mejores a peores suelos.

(Al grupo A7 corresponde el nivel mínimo sujeto a esfuerzos de compresión sin confinar (UCS) de 250 lb/in² suelos susceptibles de ser mejorados) o bien aquellos, que tienen por objeto dotar de la máxima densidad posible mejorando con ello la capacidad de soporte y la resistencia mecánica a través de su granulometría.

Para la construcción de subbases tratadas con cemento por ejemplo, se emplean materiales granulares que correspondan a los grupos A1, A2 y A3 del sistema AASHTO de clasificación de suelos, éstos contienen no más de un 35% que pasa por la malla No.200 e IP = 10 (o menor).

La granulometría surge entonces de la necesidad de conocer en qué proporción se tienen las distintas cantidades de material de un mismo tamaño contra su propio porcentaje en peso, por eso es que se les acostumbra dibujar distintas gráficas que detallen dicha distribución a partir de cribar o tamizar el material (Así por ejemplo, una curva muy tendida indicará una amplia gama de tamaños -al que llamaremos suelo bien graduado- mismo que evitará posibles segregaciones e incrementará la compactabilidad y resistencia).

Otras clasificaciones del suelo se han desarrollado para satisfacer ciertas necesidades en particular como sucede para terraplenes y capas de firme por parte del "Laboratoire Central des Ponts et Chaussées" (LCPC) de Francia. De hecho en toda Europa existe desde 1999 una norma que establece las siguientes aberturas de uso básico: 0,063 - 0,125 - 0,5 - 1 - 2 - 4 - 8 - 16 - 31,5 - 63 - 125 en mm.

Conviene recordar que una deficiencia en materiales de tamaño intermedio dentro de la distribución granulométrica, aunque pudiera alcanzar una resistencia a la compresión suficiente no es lo más adecuado para proporcionar la trabajabilidad necesaria, sobre todo si se trata de mezclas con cemento Portland. Además, una buena distribución granulométrica favorece el revenimiento. Dado que al agregar tamaños intermedios de partículas en la mezcla se requiere de una menor cantidad de agua al mismo tiempo que su consistencia permanezca constante.

Existen otras opciones para determinar la granulometría del suelo, las hay también por tanteos y por métodos matemáticos, a los que en ciertos casos se les ajusta por mínimos cuadrados.

De manera general podemos entonces clasificar a los suelos de grano grueso de acuerdo a procedimientos granulométricos, en tanto que para los de grano fino se atiende a su límite líquido e índice de plasticidad.

Un suelo reunirá condiciones aceptables como material de construcción a medida que exista una relación conveniente entre los contenidos de material grueso y finos. Por ejemplo para conseguir una granulometría apropiada en la subbase, el tamaño máximo del material normalmente se limitará a 25 mm y de preferencia a sólo 19 mm.

1.3 Determinación de la resistencia y la capacidad de carga del suelo

Al hablar del suelo es común hacer ciertas consideraciones generales para su estudio, la primera de ellas sin duda alguna consiste en idealizarlo como un medio continuo. Los análisis que se realizan de mecánica de suelos parten de suponer un cierto estado de esfuerzos inducidos por una carga normalmente aplicada. Cuando este esfuerzo alcanza su máximo permisible (límite) debemos inferir que se presenta la condición de falla del mismo o dicho en otras palabras el material que se está tratando responde con un comportamiento inelástico.

A lo largo del tiempo, el interés que ha despertado definir si tal condición de falla se debe a esfuerzos cortantes o bien en términos de las deformaciones generadas ha sido motivo de múltiples teorías cada una de ellas con distinto rango de aplicación pero ninguna desdeñable y así mismo, absoluta.

Los primeros trabajos de importancia y en los que se basa el resto se deben a C.A.Coulomb quien logró inferir las características de mayor trascendencia que existen en cualquier tipo de suelo: la cohesión y la fricción interna que más adelante, Terzaghi consideraría en sus investigaciones y a las que añadió la influencia del agua contenida y de cómo ésta, determina no sólo de las condiciones de carga, sino también la forma de evaluar su resistencia.

Hoy en día, es muy común realizar la prueba de compresión triaxial para determinar características de esfuerzo-deformación y de resistencia de los suelos, por las ventajas que ello implica gracias a que es posible variar a voluntad las presiones actuantes en tres direcciones ortogonales. Esto se debe a que el agua que entra en la cámara se dosifica por medio de un compresor (presión hidrostática) y el vástago de que está compuesto, la atraviesa por la parte superior (carga axial) simulando de una forma simple lo que en la realidad le sucede al suelo bajo condiciones de servicio "in situ". Los especímenes del suelo usados en la prueba son cilíndricos y labrados a mano en laboratorio. Las pruebas triaxiales se dividen en dos ramas; las de compresión en cuyo caso la dimensión original axial disminuye y las de expansión, antagónicas a las primeras.

La capacidad de carga (soporte) o resistencia a la deformación por esfuerzo cortante bajo cargas del tráfico quedan fijas en el proyecto; en función del suelo disponible, las características del terreno subyacente (sin perder de vista la posibilidad de estabilizar los materiales), el número de capas de que estará compuesto el pavimento, su dimensionamiento (espesor), la secuencia en la ejecución de las mismas, etc. Los ensayos de laboratorio permiten, a partir de la granulometría y la plasticidad de las muestras tomadas, asignar una capacidad de soporte al suelo. El objetivo será brindar un apoyo uniforme al pavimento a lo largo de toda su vida útil y el confort necesario en la conducción a quienes las transitarán.

Sin embargo, es imprescindible completar esta primera estimación ya sea a través de ensayos mecánicos de laboratorio, de los que el más extendido es el índice CBR (California Bearing Ratio), o bien mediante ensayos de campo, entre los que destaca el penetrometro, la placa de carga, el deflectómetro de impacto, etc. El procedimiento más comúnmente utilizado en México y otros países a priori es la determinación del índice CBR o también conocido como Valor Relativo de Soporte (VRS).

El índice CBR es la carga necesaria para introducir un pistón o vástago de dimensiones normalizadas (19.4 cm² o 3 in²) en el terreno, a una determinada velocidad (0.127 cm/min o 0.05 in/min) y profundidad (primeros 0.25 cm o 0.1 in). Puede realizarse el ensayo con material sin alterar, extraído del yacimiento o bien con probetas compactadas en moldes normalizados, según la aplicación que se vaya a dar a los ensayos. El espécimen de suelo en que se hace la prueba está confinado en un molde de 15.2 cm (6 in) de diámetro y 20.3 cm (8 in) de altura, sobre el que se coloca una placa provista de una perforación central que tiene como fin permitir el paso del pistón encargado de efectuar la penetración. El peso le transmitirá una presión equivalente a la sobrecarga que se especula tendrá el pavimento.

Es interesante hacer ensayos de CBR con probetas de un mismo material y diferente grado de humedad. Sin embargo, no debemos perder de vista que la condición más crítica sólo se presenta cuando el espécimen ha absorbido la mayor cantidad de agua posible, lo cual sólo se consigue después de haberlo sumergido por espacio de cuatro días.

Con los resultados de estos ensayos podemos trazar las curvas de igual energía de compactación sobre un gráfico y después marcar sobre las mismas los CBR obtenidos a partir de los puntos correspondientes, para finalmente unir los de igual valor. De los resultados de una prueba completa para la obtención del CBR se generan la combinación de tres gráficas: 1. Humedad de prueba en % vs CBR corregido % 2. Humedad de prueba en % vs Peso específico seco en kg/m³ y 3. Peso específico seco en kg/m³ vs CBR corregido %.

Estudios hechos a muy diversos especímenes del suelo en subrasantes y bases, han permitido clasificarlos de acuerdo con su comportamiento durante la saturación en tres grandes grupos:

1. Arenas sin cohesión y gravas (GW, GP, SW y SP)
2. Suelos cohesivos (GM, GC, SM, SC, ML, CL y OL) y
3. Suelos de gran expansión (MH, CH y OH)

Siendo éstos últimos, los que representan mayores problemas cuando se trata de reciclado de pavimentos con adición de cemento Portland, pues en caso de existir en cantidades importantes hacen al suelo inservible. Los grupos AASHTO A6 y A7 comprenden a la gran mayoría de ellos.

De un modo general, se considera que un 2% de materia orgánica es el máximo permisible cuando se trata de añadir cemento. "La materia orgánica generalmente se encuentra en la superficie de los suelos hasta profundidades de 1.50 m" [1]. Como resulta difícil detectar el tipo de materia orgánica, se considera que si el Ph < 12.1 no es recomendable la estabilización del suelo con cemento ya que la materia orgánica presente pudiera alterar las propiedades de éste último.

Habrà que tener especial cuidado con los suelos arcillosos dado que pequeñas variaciones en la densidad representan importantes cambios en la capacidad portante.

El objetivo que se persigue es dotar a la estructura de una resistencia suficiente para proteger a la subrasante y por ende estimar los requerimientos del posible reciclado in situ del pavimento.

1.4 Límites de consistencia (Atterberg)

1.4.1 Generalidades

Se define a la plasticidad como: "la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse" [2]

Diversos autores entre los que destaca Atterberg han coincidido en que la plasticidad de un suelo es resultado de la carga eléctrica de sus partículas laminares.

De acuerdo con su teoría cualquier suelo es susceptible de ser analizado de acuerdo con los siguientes parámetros: el límite líquido y el límite plástico, conocidos también como límites de plasticidad y que son función de su contenido de agua

→ → Aumento de la cantidad de Agua → →

| | | | | |
|--------|------------|----------|-------------|---------|
| Sólido | Semisólido | Plástico | Semilíquido | Líquido |
| 1 | 2 | 3 | 4 | |

1. Límite de contracción 2. Límite Plástico [L.P] 3. Límite Líquido [L.L] 4. Límite superior

Como podemos ver en la figura 1.1, el primer límite [LL] corresponde a la frontera entre estados semilíquido y plástico mientras que el segundo [LP] entre los estados plástico y semisólido, y a de la diferencia entre ambos se deduce el índice plástico [IP]. Todos los límites de consistencia se determinan empleando suelo que pasa por la malla No. 40

1.4.2 Límite Líquido

El procedimiento para determinar el límite líquido de un suelo es:

- a. Tomándose 100 g de material que pasa la malla No. 40, se colocan en una cápsula de porcelana y con una espátula se hace una mezcla pastosa, homogénea y de consistencia suave, agregándole una pequeña cantidad de agua durante el mezclado.
- b. Se coloca una poca de esta mezcla en la copa de Casagrande, formando una masa alisada de un espesor de 1 cm en la parte de máxima profundidad.
- c. El suelo colocado en la copa de Casagrande se divide en la parte media en dos porciones, utilizando un ranurador.
- d. Se acciona la copa a razón de dos golpes por segundo, contando el número de golpes necesarios para que la parte inferior del talud de la ranura hecha se cierre precisamente a 1.27 cm (1/2"). Si no se cierra entre los 6 y 35 golpes, se recoge el material y se le añade agua y se vuelve a mezclar.
- e. Cuando se cierra en un número de golpes entre los 6 y los 35, se toman 10 g aproximadamente, de suelo en la zona próxima a la ranura cerrada y se determina el contenido de agua de inmediato. Se repite el ensaye y si se obtiene el mismo número de golpes que el primero o no hay diferencia en más de un golpe, se repite el ensaye hasta que tres ensayos consecutivos den un conveniente serie de números.
- f. Se repiten los pasos primeros 5 pasos, teniendo el suelo otros contenidos de humedad. De este modo se deben tener, por lo menos, dos grupos de dos o tres contenidos de humedad, uno entre los 25 y 35 golpes y otro entre los 6 y los 10 golpes con el fin de que la curva de fluidez no se salga del intervalo en que pueda considerarse recta, según lo indica Casagrande.
- g. Se unen los tres puntos marcados por el intervalo de 6 a 20 golpes con una línea recta y se señala el punto medio. Se repite lo mismo para los dos o tres puntos que cayeron dentro del intervalo de 25 a 35 golpes.
- h. Se conectan los puntos medios con una línea recta que se llama curva de fluidez. El contenido de humedad indicado por la intersección de esta línea a 25 golpes es el límite líquido del suelo.

La ecuación de la curva de fluidez se expresa como:

$$w = Fw \log N + C$$

Donde:

Fw = Índice de fluidez, pendiente de la curva igual a la variación del contenido de agua correspondiente a un ciclo de la escala logarítmica

w = Contenido de agua, como porcentaje del peso seco

N = Número de golpes. Si $N < 10$ aproxímese a medio golpe

C = Constante que representa la orden en la abscisa de un golpe

1.4.3 Límite Plástico

Se determina con el material sobrante del límite líquido y al que se le evapora humedad por mezclado, hasta obtener una mezcla plástica que sea moldeable. Se forma una pequeña bola que deberá rolar en seguida aplicando la presión suficiente a efecto de formar tiritas. Cuando el diámetro de las tiritas resultante esté próximo a los 3.17 mm (1/8") y sin romperse, se colocarán sobre un vidrio, para ser pesadas y secadas dentro de un horno, volviéndose a pesar ya secas. Determinando con ello la humedad correspondiente al límite plástico.

$$LP = \frac{W_h - W_s}{W_s} \times 100$$

Donde:

LP = Humedad correspondiente al límite plástico en %

W_h = Peso de las tiritas húmedas en gramos

W_s = Peso de las tiritas secas en gramos

La formación de las tiritas de suelo, se hace manualmente sobre una hoja de papel totalmente seca, para acelerar la pérdida de humedad del material o sobre una placa de vidrio.

1.4.4 Plasticidad en suelos con cemento

El hecho de adicionar cemento a un suelo reduce su plasticidad, sin embargo si ésta es muy alta podría resultar no suficiente. El emplear suelos de elevada plasticidad trae consigo una serie de problemas durante la mezcla, lo que acarrea disminución en los rendimientos de la operación y entorpece el extendido.

En consecuencia, conviene limitar la plasticidad de la fracción fina del suelo a valores del índice de plasticidad por debajo de 15 y preferentemente 10.

1.5 Pruebas de compactación Proctor o Pórtier

La repetición de permanentes ciclos de carga a que se somete el suelo por acción del tráfico obligan de alguna manera a las partículas que lo conforman a la búsqueda del mejor arreglo posible, de tal suerte que su resistencia irá respondiendo a las exigencias, quizá cada vez mayores de un aforo vehicular esperado.

1.5.1 Prueba Proctor

Empíricamente se dedujo una ley que permilla para cierta energía de compactación (fija de antemano) obtener una relación entre la humedad del suelo y la densidad conseguida a partir de dicha energía. La fórmula que lo describe se enuncia a continuación:

$$E_e = \frac{N \times n \times W \times h}{V}$$

Donde:

- Ee = Energía Específica
- N = Número de golpes por capa
- n = Número de capas del suelo
- W = Peso del pistón
- h = Altura de caída libre del pistón
- V = Volumen del suelo compactado

R.R. Proctor a quien debe su nombre esta prueba descubrió que para un suelo dado: " existe una humedad inicial llamada óptima que produce el máximo peso específico seco " [3]

El ensayo se realiza a partir de un molde cilíndrico hueco de 10.2 cm (4 in) de diámetro y 11.7 cm (4.59 in) de altura compuesto por dos semicilindros, que se mantienen unidos gracias a un collar.

Sobre el molde se empotra una base metálica sujeta por dos pernos de presión o también llamados de mariposa montado sobre una base plana, su capacidad es de 0.94 litros.

El pistón es de 2.5 kg (5.5 lb) y consta de un vástago en cuyo extremo inferior existe un cilindro metálico de 5 cm (2 in) de diámetro que se deja caer desde una altura de 30.5 cm (12 in).

El procedimiento es como sigue:

1. De la muestra de suelo se separan 3 kg previamente secado al sol que pasan por la malla No. 10
2. Los grumos que se hayan retenido se disgregan y tamizan nuevamente por la misma malla
3. Se mezcla todo el material con la cantidad de agua necesaria para iniciar la prueba
4. El material deberá ser amasado hasta conseguir una consistencia plástica (*)
5. Se arma el molde con la base metálica
6. Se le introduce en tres capas de una altura cercana a la tercera parte del total del molde
7. Cada estrato recibirá 30 golpes repartidos uniformemente desde una altura igual al total del vástago
8. Finalizada esta operación, se retira la base metálica y se enrasa al suelo con ayuda de una espátula
9. A continuación, se pesa el molde con el suelo compactado

Es importante señalar que esta prueba reproduce en cierto modo los pesos específicos secos que podrían lograrse en la realidad.

Lógicamente al estar el agua distribuida de manera desigual, para determinar la humedad se tomarán dos porciones, una de la parte superior y otra de la inferior de la masa.

Las muestras que han sido removidas del molde cilíndrico se desmenuzan hasta que pasen por la malla No.4, se añaden 60 cc de agua (2% en peso) y se repite el procedimiento hasta obtener cuando menos dos puntos de densidad creciente y dos de densidad decreciente que sean suficientes como para dibujar la curva peso específico seco vs contenido de agua.

El peso específico húmedo para cada contenido se calcula con la siguiente fórmula:

$$\gamma = \frac{W_h}{V_l}$$

Donde:

- γ = Peso específico húmedo en g/cm³
- W_h = Peso del material húmedo en el molde en g
- V_l = Volumen del molde en cm³

Recordemos que el contenido de humedad se calcula a partir de la fórmula:

$$w = \frac{W_h - W_s}{W_s} \times 100$$

(*) Es decir, que al ser comprimido en la palma de la mano no se queden partículas adheridas a ella, ni la humedezca y pueda tomarse con los dedos sin que se desmorone.

[3] Proctor, R.R. The Design and Construction of rolled Earth Dams. Engineering News Record. Vol. 111.No.9.p.p 245-248 1933

El peso específico seco y su correspondiente humedad se calculan por la siguiente fórmula:

$$\gamma = \frac{h}{1 + w/100}$$

Donde:

w = Contenido de la humedad en porcentaje

Wh = Peso de la muestra húmeda en gramos

Ws = Peso de la muestra seca en gramos

γ = Peso específico seco en g/cm³

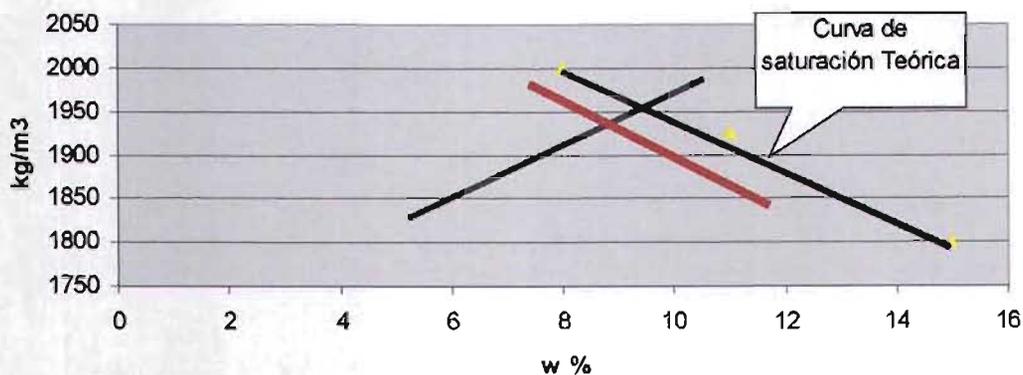
γ = Peso específico húmedo en g/cm³

Este ensayo se encuentra estandarizado por la norma ASTM D-698. Siendo los parámetros obtenidos tanto el peso seco máximo como el contenido de humedad óptimo.

La prueba Proctor está limitada a los suelos que pasen por completo la malla No.4, o que a lo sumo tengan un retenido de 10% que haya pasado totalmente la malla 3/8". En caso contrario deben determinarse la humedad óptima y el peso específico seco máximo por medio de la prueba Porter estándar, así como cuando se trate de arenas de río o producto de trituración, tezontles arenosos y de manera general todo aquel material exento de cementación.

Esta curva representa la humedad para cualquier peso específico necesario para que todos los vacíos que dejan entre sí las partículas sólidas estuvieran llenos de agua.

Prueba Proctor



El peso específico seco correspondiente a la curva de saturación teórica para la humedad dada se calcula con la fórmula:

$$\gamma_{scs} = \frac{100 D_a}{100 + w D_r} \times 100 \text{ (kg / m}^3\text{)}$$

Donde:

γ_{scs} = Peso volumétrico seco de la curva de saturación (kg / m³)

D_a = Densidad absoluta del material que pasa la malla No 400 en g/cm³

D_r = Densidad relativa del material que pasa por la malla No 40

La curva de saturación teórica tiene por objeto comprobar si la prueba Proctor fue correctamente efectuada, ya que la curva de saturación y la curva Proctor nunca deben cortarse dado que es imposible en la práctica llenar totalmente con agua los huecos que dejan las partículas del suelo compactado.

La curva de saturación teórica sirve para determinar si un suelo, en el estado en que se encuentra en el lugar, es susceptible de adquirir mayor humedad o mayor peso volumétrico fácilmente.

Así, una vez hecha la determinación del peso volumétrico y humedad en el lugar se calcula el por ciento de huecos llenos de aire con la siguiente fórmula:

$$V_a = \frac{\gamma_{scs} - \gamma_s}{\gamma_s} \times 100$$

Donde:

V_a = Volumen de huecos llenos de aire %

γ_{scs} = Peso volumétrico seco de suelo compactado correspondiente a la humedad w

γ_s = Peso volumétrico de la curva de saturación teórica correspondiente a la humedad



Como las pruebas realizadas al suelo son muy laboriosas y se requieren de un número representativo de muestras, que implican inversión de un valioso tiempo actualmente estos ensayos se simplifican si para obtener las características de compactación se emplean moldes de 10 cm de diámetro interior y 11.7 cm de altura tal y como los de la prueba Proctor. Que abarcan el total del volumen de la muestra (911 cm³) y que representan cerca del 40% del volumen total del suelo requerido por el molde para ensayos CBR convencionales (>2210 cm³) con los mismos resultados.

Es posible estimar dicho índice a partir del molde y vástago de 33.3 mm de diámetro correspondiente corrigiendo los valores obtenidos por medio de un factor de 1.378. Sobre todo para aquellos casos en que se involucren suelos finos. La compactación se lleva a cabo en tres capas con un tiempo de amasado entre cada una de ellas de 20 a 30 seg.

Para evitar los problemas que pudieran surgir al proporcionar distintas presiones si se opera manualmente se emplea una sobrecarga acoplada a un martillo, que de manera conjunta actúan sobre la masa a compactar.

Estas variantes al ensayo típico permiten una mayor rapidez de ejecución y en consecuencia la posibilidad de transportar un mayor número de muestras susceptibles de ser analizadas en laboratorio. La finalidad de los ensayos de resistencia será determinar el contenido óptimo de cemento a dosificar de manera que los materiales tratados que conforman la subrasante, subbase y base del pavimento mejoren sus propiedades mecánicas.

1.5.2 Prueba Pórtier

Esta prueba tiene como finalidad determinar el peso volumétrico seco máximo de compactación Pórtier y la humedad óptima en los suelos con material mayor de 3/8" y los cuales no se les puede hacer la prueba Proctor. Esta prueba sirva también para determinar la calidad de los suelos en cuanto a valor de soporte se refiere, midiendo la resistencia a la penetración del suelo compactado y sujeto a un determinado periodo de saturación.

Esta prueba se lleva a cabo de la siguiente forma:

La humedad óptima de Porter es la humedad mínima requerida por el suelo para alcanzar su peso volumétrico seco máximo cuando es compactado con una carga unitaria de 140.6 kg/cm². Para obtener la humedad óptima y el peso volumétrico seco máximo se obtiene una muestra de 4 kg de material secado, disgregado y cuarteado. Cuando se ha logrado la disgregación de los grumos se tamiza la muestra por la malla 3/4". Se le incorpora cierta cantidad de agua, cuyo volumen se anota, y una vez lograda la distribución homogénea de la humedad se coloca en tres capas dentro del molde de prueba y a cada una de ellas se les da 25 golpes con la varilla metálica. Al terminar la colocación de la última capa se compacta el material aplicando cargas uniformes procurando alcanzar la presión de 140.6 kg/cm² en un tiempo de 5 minutos.

Si al llegar a la carga máxima no se humedece la base del molde, la humedad de la muestra es inferior a la óptima. A otra porción de 4 kg de material se le adiciona una cantidad de agua igual a la anterior más 80 cc y se repite el proceso. Si al aplicar la carga máxima se observa que se humedece la base del molde, el material muestra una humedad ligeramente mayor que la óptima. Para fines prácticos es conveniente considerar que el espécimen se encuentra con su humedad óptima cuando se inicia el humedecimiento de la base del molde, siendo ésta la más adecuada para su compactación.

Para determinar la altura del espécimen se restan la altura entre la cara superior de éste y el borde del molde, de la altura total y con este dato se calcula el volumen del espécimen. Se pesa el espécimen con el molde de compactación, restándole el peso del molde y se calcula el peso volumétrico.

$$\gamma = \frac{P_h}{V_t}$$

Donde:

γ_h = Peso volumétrico húmedo, en g/cm³ o kg/m³

P_h = Peso del material húmedo compactado dentro del cilindro Porter, en gr o Kg

V_t = Volumen del espécimen en cm³ o m³

Se extrae el material del molde y se pone a secar a una temperatura constante de 100 a 110 °C hasta peso constante. Se deja enfriar el material, se pesa y se calculan la humedad y el peso volumétrico seco máximo.

$$w = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

$$\gamma_s = \frac{\gamma_h}{1 + w/100}$$

1.5.3 Módulo de reacción k

Una tercer medida de la resistencia del suelo es el módulo de reacción k de la subrasante de Westergaard, comúnmente usado como parámetro de diseño en pavimentos de concreto y en losas de pisos industriales soportadas sobre el terreno.

Es una forma para determinar la resistencia que se considera constante. Su valor numérico depende de la textura, compactación, humedad y otros factores que afectan su capacidad..

La determinación de k se hace mediante una placa circular de 30" de diámetro bajo una presión tal que produzca una deformación del suelo de 0.127 cm (0.05"). En general se puede decir que el módulo de reacción k es igual al coeficiente del esfuerzo aplicado por la placa entre la deformación correspondiente producida por este esfuerzo. Mas adelante se hace referencia a esta propiedad tan importante para el diseño de pavimentos.

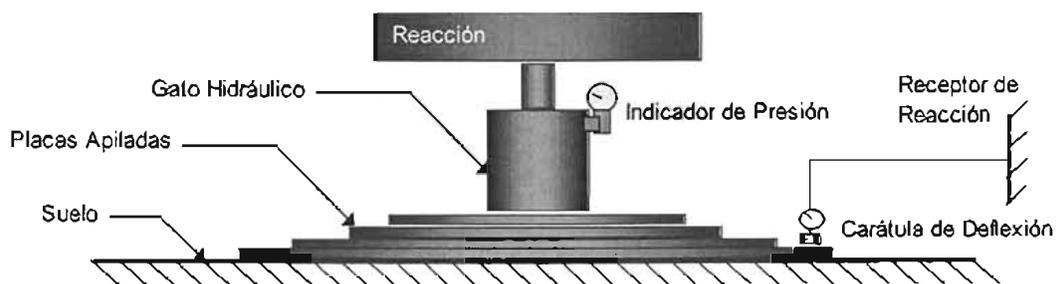
No existe una correlación confiable entre las tres medidas de propiedades de un suelo, (módulo de reacción k de la subrasante, la capacidad de carga y la compresibilidad del suelo) debido a que las propiedades anteriores representan características completamente diferentes del suelo. El valor de K , empleado en el diseño de losas de concreto, refleja las condiciones de respuesta de la subrasante, ante condiciones de deformación temporales (estado elástico) y de pequeña magnitud, usualmente de 1.25mm o menores. Por el contrario, la compresibilidad de un suelo, y la capacidad de carga (valores normalmente usados para predecir y limitar asentamientos diferenciales de la cimentación u otros elementos estructurales) reflejan la condición de deformación total (estado no elástico) de la subrasante, que puede ser de 20 a 40 (o más) veces más grandes que las pequeñas deformaciones en las que se basa el módulo de reacción k .

Sin embargo muchas investigaciones de pavimentos de concreto han demostrado que las deformaciones en el estado elástico y los esfuerzos se pueden predecir de muy buena manera cuando se emplea el módulo de reacción k el que "representa" la respuesta de la subrasante. Por esta razón el control de los esfuerzos de las capas tratadas con cemento -semirrígidas- se basan (en un principio) en la obtención de dicho valor.

A pesar que el módulo de reacción k no refleja el efecto de la compresibilidad del suelo a alguna profundidad de la subrasante, ha sido aceptado como una herramienta en el diseño de pavimentos sujetos a condiciones de carga de llantas y otras cargas concentradas. La presión transmitida al suelo y la magnitud de los asentamientos deberán estimarse para determinar si puede o no ocurrir la falla por esfuerzo cortante.

Generalmente no existen condiciones muy adversas en los suelos, por lo que, los análisis en el diseño requieren solamente la determinación de la resistencia en la subrasante en términos del módulo de reacción k . En campo, el módulo k se determina mediante la prueba conocida como prueba de placa que ilustra la figura 1.4.

La prueba está estandarizada por la norma ASTM D 1196 (Standard Test Method for Nonrepetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements) y consiste en la aplicación de una carga estática sobre una serie de placas de acero apiladas una encima de otra, formando una especie de pirámide, en donde la placa inferior tiene un diámetro de 76 cms (30 pulg). Las placas son cargadas hasta provocar una deflexión en el suelo al centro de la placa de 1.25 mm y el valor del



$$k \text{ (psi/in)} = \text{carga unitaria por placa} / \text{deflexión de la placa}$$

Módulo k se determina dividiendo el esfuerzo aplicado (la carga aplicada, entre el área de la placa) entre la deflexión obtenida, por lo que se expresa en unidades de psi/pulg (libras sobre pulgada cuadrada sobre pulgada) o como comúnmente se llama pci (libras sobre pulgada cúbica) o en sistema métrico, kg/cm^3 .

Sin embargo no siempre se pueden realizar las pruebas de placa en el sitio de los trabajos por diversas razones, en estos casos, el módulo de reacción k puede ser supuesto correlacionándolo con propiedades y pruebas más sencillas de mecánica de suelos, como la prueba de Valor Relativo de Soporte. (ASTM D 1883) o la clasificación del suelo. Para estos casos las tabla que a continuación se presentan pueden ser usadas para tal efecto.

Tabla 1.3 Estimación del módulo de reacción k

| Tipo de suelo | Resistencia | VRS ² | Valor K de Diseño | |
|--|-------------|------------------|-------------------|-------|
| | | | Pci | Mpa/m |
| Limos y arcillas de alta compresibilidad en estado natural ¹ | Baja | 2 o menos | 50 | 13.6 |
| Limos y arcillas de alta compresibilidad ¹ compactados. Limos y arcillas de baja compresibilidad ¹ Limos arenosos y arcillas, limos gruesos y arcillas. Arenas escasamente graduadas. | Promedio | 3 | 100 | 27.1 |
| Gravas, arenas bien graduadas y mezclas de arenas-gravas, relativamente libres de finos. | High | 10 | 200 | 54 |

1.5.3.1 Incremento del módulo de reacción k

En caso de usar una capa superior de mejor calidad sobre la subrasante, el módulo de reacción k se incrementará dependiendo de la calidad del material de base a emplear y del espesor.

En grandes proyectos siempre será más recomendable medir el módulo de reacción k una vez colocado el material de base encima de la subrasante, sin embargo si esto no es posible tal y como se menciona en párrafos anteriores, éste se podrá estimar conociendo otras propiedades del suelo.

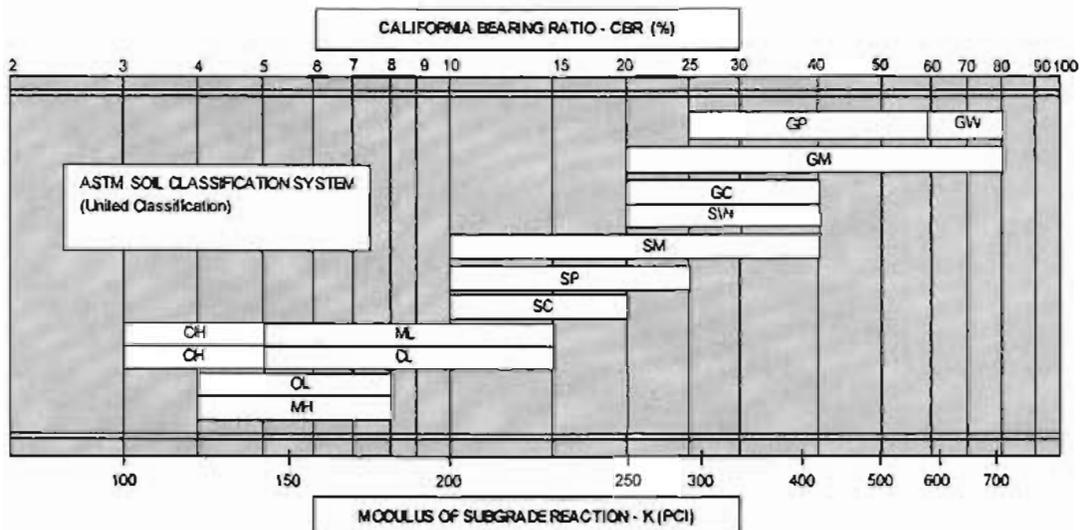


Fig 1.5 Interrelaciones aproximadas entre la clasificación del suelo y el valor medido de la capacidad de carga [4].

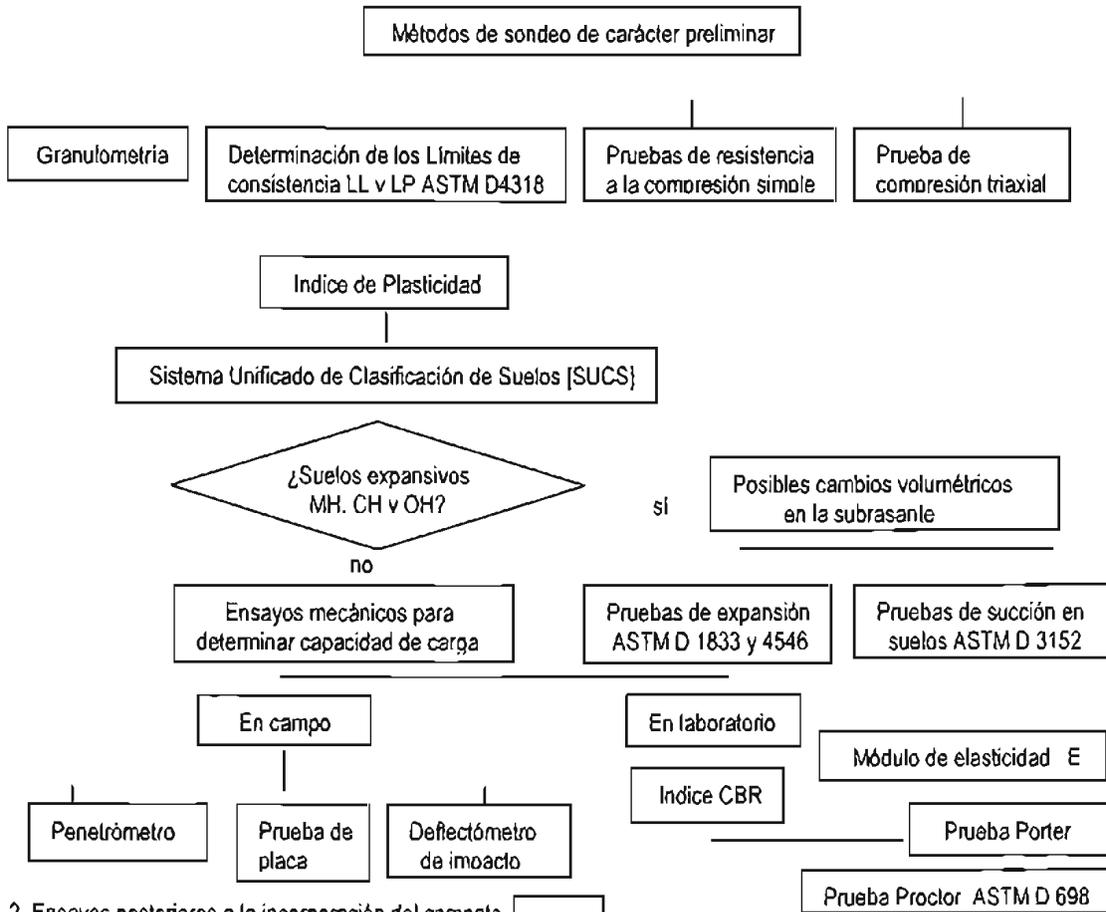
1.5.4 Pruebas de laboratorio

Un correcto diseño, programación y construcción de pavimentos reciclados con cemento Portland solicitan del proyectista, ingeniero civil, proveedores del material, contratistas y todos aquellos relacionados, un conocimiento básico indispensable sobre las características del suelo donde se llevarán a cabo los trabajos.

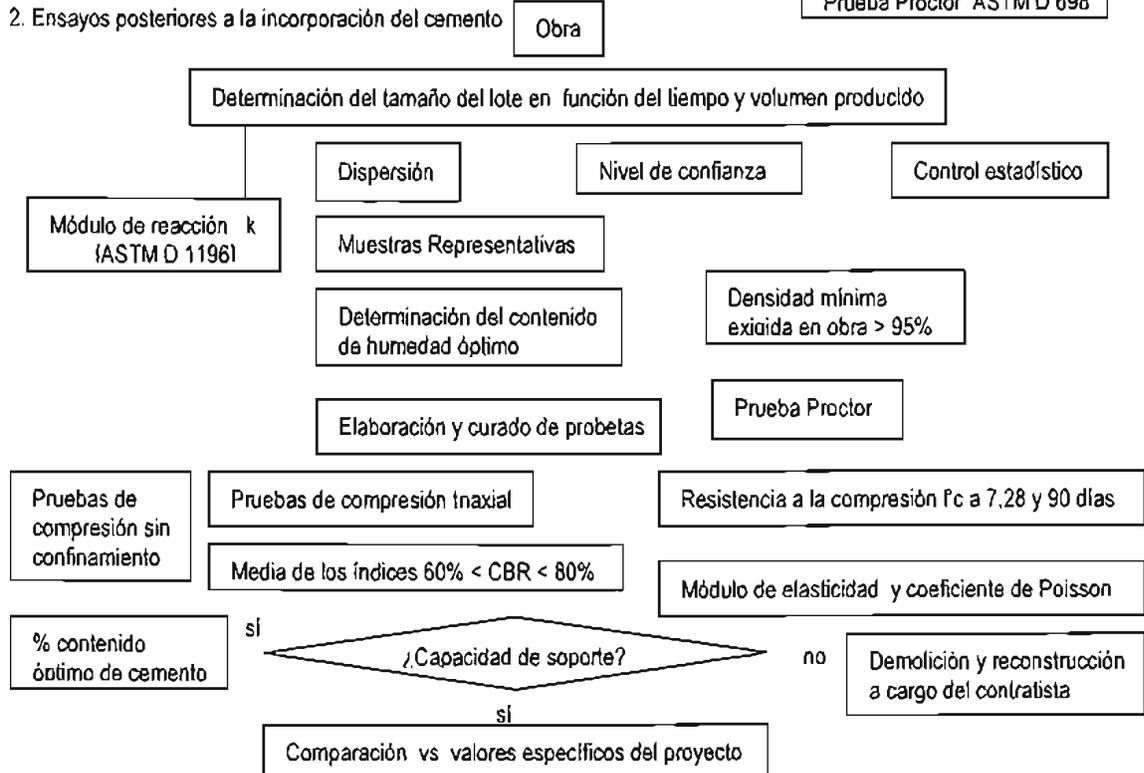
Se exponen a continuación ciertos criterios que servirán como guía para la elección de los estudios más propicios anteriores y posteriores a la adición del conglomerante lo que permitirá establecer un control de calidad adecuado para cada caso.

[4] Design of concrete overlays (Whitetopping) for asphalt parking lots. Portland Cement Association. National Ready Mixed. 1985
NCHRP Synthesis of Highway Practice. No. 99. Resurfacing with Portland Cement Concrete. Transportation Research Board, Washington 1982

1. Ensayos previos a la incorporación del cemento



2. Ensayos posteriores a la incorporación del cemento



Capítulo II CONSIDERACIONES GENERALES DEL PAVIMENTO

2.1 Componentes del pavimento. Elementos que lo constituyen

Rodadura

A toda capa superior del pavimento que está en contacto permanente con las cargas del vehículo por medio de las ruedas, el ambiente que le rodea y cuya función consiste en proteger a la estructura del ataque de estos agentes brindando durabilidad e impermeabilidad se le conoce como rodadura.

La rodadura generalmente está compuesta por una mezcla bituminosa en caliente para rodaduras de alta calidad con tráfico pesado (contenido de asfalto cercano al 5%), y en frío; en tratamientos superficiales. Es además, la capa que recibe los esfuerzos tanto horizontales como verticales que transmitidos por las llantas provocan su deterioro. Como el neumático tiende a pulir su superficie reduce a la postre sus propiedades de fricción interna.

Estructura del pavimento

La estructura del pavimento está compuesta por diversas capas de material (c/u de ellas con resistencias diferentes) que en conjunto **distribuyen y disipan** sobre áreas cada vez mayores las cargas provocadas por la acción del tránsito desde la superficie hasta la subrasante. Dado que los esfuerzos decrecen con la profundidad, conviene que los materiales con mayor cohesión y capacidad de carga compongan las capas superiores; mientras que los de mejor fricción interna, se ocupen para capas más profundas.

Los materiales para subbase y base pueden ir desde los del tipo granular (como resultado de emplear procesos mecánicos –disgregado, cribado, triturado, lavado, etc- hasta los estabilizados con cemento, cal, emulsión asfáltica o una mezcla entre ellos. El comportamiento de un material cualesquiera ante las cargas impuestas dependerá como veremos más adelante, no sólo de sus propiedades elásticas sino también de las características de la carga en términos de la velocidad con que se apliquen, la magnitud y la presión ejercida.

Base

Es el estrato que recibe la mayor parte de los esfuerzos generados por el paso de los vehículos, regularmente estabilizada y encargada del sustento de la carpeta de asfalto superior a ella.

Subbase

Inferior a la base tiene como principal tarea tratar de evitar que se presente el efecto de bombeo ante condiciones de tráfico muy pesado, por ello su espesor generalmente parte de los 10 a los 15 cm.

Subrasante

Es la capa más profunda de la que está compuesto un pavimento, superior al cuerpo de la terracería e inferior a las subbase, base y rodadura. Al material que la compone no se le aplica ningún tipo de tratamiento si de reciclado se trata debido a que el espesor de las capas superiores es de mayor interés y mucho más fáciles de mejorarse. Sin embargo, las características que deberá cumplir son las siguientes: expansión máxima del 5%, grado de compactación mínimo del 95%, espesores: mínimo de 30 cm para caminos de tránsito reducido y 50 cm en aquellos con un TPDA > 2000 vehículos.

El valor empírico de la Relación Californiana de Soporte (CBR) de la subrasante constituye la primer referencia en todo diseño de pavimentos. La subrasante además evita que el terraplén contamine la estructura y que ésta sea absorbida por la terracería, mediante una clasificación granulométrica selectiva y el mezclado de los suelos, se logran condiciones medianamente uniformes en su parte superior.



Terraplén

Consideramos como terraplén a cualquier terreno natural sobre el que descansan los diferentes estratos que integran el pavimento. Exento de la presencia de suelos tipo MH, OH y CH, cumple una función muy importante toda vez que conforma el cuerpo o base del proyecto. Para aquellos casos donde el material que compone el terraplén sea importado de un banco de préstamo, éste debe ser producto de cortes longitudinales o préstamos laterales del propio camino, su acarreo no deberá exceder los 20 m para que resulten explotables. Ahora que sí está hecho a base de rocas, es recomendable bandear (moverse en zig-zag) sobre las capas de mayor espesor dando como resultado una compactación mínima del 90%. Para los terraplenes con menos de 1.20 m de altura la AASHTO recomienda taludes de 6:1 y de 4:1 si superan dicho límite.

Aspectos relacionados con la presión de inflado

Si bien, la carga del vehículo se transmite en repetidas ocasiones a través de las ruedas propiciando la densificación de las partículas del material que provocan el ahuellamiento, la presión de inflado del neumático (kPa) determinará las dimensiones y la profundidad de las roderas.

El tamaño del área de contacto es mayor cuando la presión de la llanta es menor que la presión ejercida por el pavimento, y viceversa, cuando las altas presiones de la rueda (paredes de la llanta en tensión) superen la presión del firme –desde un punto de vista estático-. Se sabe que para vehículos pesados el rango de presiones de inflado oscila entre los 500 a 900 kPa que equivaldrían aproximadamente a unos 80 kN por eje sencillo.

Ciertos criterios de diseño basan su análisis a partir del cálculo de esfuerzos y deformaciones en lugares críticos, como resultado de las aplicaciones de carga originados por las ruedas “En general los vehículos en marcha transmiten al neumático una carga de magnitud variable según el movimiento oscilatorio de la masa suspendida, cuya frecuencia varía con la velocidad y tipo de pavimento. Los máximos pueden ser un 40 a 50% superiores a los normales con carga estática”. [5]

2.2 Tráfico

Muchos son los aspectos a considerar cuando se trata de diseñar y dimensionar pavimentos. El número y tamaño de vehículos que circulen a través de ellos determinarán la magnitud de la carga impartida a la superficie y la frecuencia con que se cargará y descargará el firme a lo largo de toda su vida útil.

Como es lógico suponer las cargas entre vehículos varía de acuerdo con el fin al que sirven (entre 80 kN y 130 kN) lo cual obliga a definir cuál será la carga máxima permitida en términos de un eje simple al que se conoce como: **Eje Equivalente** (18 kips – 8.2 ton). A partir de la configuración que éste guarde podremos establecer un **periodo de diseño** como el tiempo necesario para el rescate de la inversión efectuada cuyo plazo oscila comúnmente entre los 5 y los 20 años.

Para el cálculo del tráfico de diseño se considera un tráfico promedio diario anual (TPDA) que corresponde a la puesta en servicio del pavimento a lo largo de 365 días, un porcentaje estimado de tráfico pesado (H) como el número de vehículos pesados que transitan por el carril de proyecto, el número de Ejes Equivalentes (E.E) promedio y un factor de crecimiento anual del tráfico de entre un 3% y 4% que se obtiene a partir de una tasa (i) expresada en porcentaje y el periodo de diseño (y).

Así tenemos que:

$$\text{Tráfico de diseño} = \text{TPDA} \times H \times \text{E.E} \times f_y$$

$$\text{Siendo: } f_y = 365 \times \frac{(1 + 0.01 \times i)^y \{ (1 + 0.01 \times i)^y - 1 \}}{0.01 \times i}$$

Al carril más lento en una o dos direcciones por el que transitan las cargas de mayor peso y que en consecuencia sufre de mayor deterioro se le conoce como **carril de proyecto**. Este carril es el que mejor representa las condiciones críticas de servicio. Es frecuente observar que en carretera se reserve la franja separadora central para vehículos más rápidos y para efectuar rebases, mientras que los mayores volúmenes se presentan en el carril inmediato al acotamiento. De hecho se ha visto que en carreteras de dos carriles y doble sentido de circulación, sobre el carril de proyecto circulará la mitad del total de vehículos pesados en los dos sentidos siempre y cuando no se trate de anchos menores de 6 m.



Si el ancho comprende entre 5 y 6 m, por el carril de proyecto transitarán $\frac{3}{4}$ partes del total de vehículos pesados y si éste es todavía menor, obviamente circularán todos los vehículos pesados.

Resulta evidente señalar que para vías compuestas de dos carriles por cada sentido, sobre el carril de diseño transite el total de los vehículos pesados en el sentido considerado.

En autopistas con 3 carriles o más, circulará el 85% del total de los vehículos pesados para el sentido considerado. Algunas instituciones como la PCA (Portland Cement Association) recomiendan obtener la proporción de vehículos pesados circulando por el carril de baja velocidad (carril de la derecha) para una vialidad de 2 a 3 carriles a partir del TPDA estimado, el que servirá como dato de entrada.



Al suponer una tasa anual de crecimiento del tráfico (i) es necesario considerar:

1. El aspecto socio-económico del proyecto.
2. Rehabilitar un pavimento, muchas veces atrae una mayor cantidad de vehículos que circularían normalmente a través de vías alternas; por lo que el tránsito actual estará compuesto por el tránsito existente previo a la mejora más el tránsito atraído.

Los usuarios, componentes del tránsito atraído a una nueva carretera no cambian ni su origen, ni su destino, pero la eligen motivados por una reducción en los tiempos de recorrido, por la distancia, sus características geométricas, el confort y la seguridad. Como finalmente no se cambia el modo de viaje, a este volumen de tránsito también se le denomina tránsito desviado.

Como en muchas ocasiones no se cuenta con la suficiente información acerca del volumen real de vehículos que transitan por la carretera, resulta indispensable llevar a cabo **aforos** en determinados puntos de la misma (casetas de cobro si éstas son de cuota o en estaciones maestras en la mayoría de las carreteras de la red vial primaria) y de preferencia, siempre dentro de un mismo itinerario. A menudo éstos se realizan mediante contadores automáticos o por conteos físicos, siendo estos últimos los preferidos en su mayoría por su sencillez y economía.

Para ello la persona encargada de hacerlos debe contar con la experiencia suficiente como para asumir que los resultados que arroje el estudio sean confiables. Durante el conteo se acostumbra discriminar al tipo de vehículo conforme a su número de ejes (sencillo, tándem, etc) pero todavía más importante es saber si van cargados o no, la composición vehicular se mide en términos de porcentajes sobre el volumen total.

Conforme una vía se va congestionando de tráfico su tasa anual de crecimiento se va haciendo cada vez menor hasta llegar al punto de saturarse permaneciendo para entonces prácticamente constante.

| Caso | Tasa de crecimiento |
|------------------------------|---------------------|
| Vías completamente saturadas | 0% al 1% |
| Crecimiento normal | 1% al 3% |
| Con tráfico inducido * | 4% al 5% |
| Con alto crecimiento * | mayor al 5% |

* solamente durante 3 a 5 años [6]

Al respecto la SCT efectuó hacia 1991 el "Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional" el que tuvo por objeto proporcionar información suficiente sobre las características de los vehículos de carga que transitan a lo largo de la red carretera del país, los tipos de carga transportados por ellos, orígenes, destinos y algunos datos más sobre las condiciones en que se realiza el transporte en nuestro país.

Se concluyó que las cinco configuraciones de vehículos de carga más significativos son:

1. Camión de carga de 2 ejes (C2)
2. Camión de carga de 3 ejes (C3)
3. Tractocamión de 3 ejes con semiremolque de 2 ejes T3-S2
4. Tractocamión de 3 ejes con semiremolque de 3 ejes T3-S3
5. Tractocamión de 3 ejes con semiremolque de 2 ejes y remolque de 4 ejes T3-S2-R4



vehículo C3. Eje delantero sencillo y traseros duales



vehículo C2. Eje delantero sencillo y trasero dual



vehículos T3-S2 y T3-S2-R4. Ambos con eje delantero sencillo y traseros duales en tractocamión. El primero, sólo con ejes duales en semiremolque mientras que el segundo en semiremolque y remolque.

[6] Manual del constructor. Cemex Concretos. México. 2003. Cap VI Pavimentos de Concreto Hidráulico

Cuyas dimensiones corresponden con la tabla siguiente:

| Tipo de Vehículo | Dimensiones (m) (*) | | | | | | | | | |
|------------------|---------------------|-------|-------|----------|-------|-------|--------|--------|------|-------|
| | Ancho Máx | Largo | | Alto Máx | DE | | VD Máx | VT Máx | LR | LS |
| | | Mín | Máx | | Mín | Máx | | | | |
| C2 | 2.60 | 12.50 | 14.00 | 4.15 | 3.10 | 7.00 | 1.00 | 3.20 | | |
| C3 | 2.60 | 12.50 | 14.00 | 4.15 | 6.10 | 7.10 | 1.20 | 2.80 | | |
| T3-S2 | 2.60 | 16.50 | 20.80 | 4.15 | 14.20 | 17.00 | 1.30 | 2.10 | | 14.60 |
| T3-S3 | 2.60 | 16.50 | 20.80 | 4.15 | 17.70 | 14.60 | 1.20 | 1.50 | | 14.60 |
| T3-S2-R4 | 2.60 | 23.50 | 31.00 | 4.15 | 26.12 | 28.50 | 1.20 | 1.03 | 9.14 | 14.60 |

Tabla 2.1 Dimensiones principales de los vehículos que circulan por la red carretera nacional (Mendoza 2002)

(*) Las dimensiones de ancho, largo y alto, son las autorizadas por la SCT en el "Reglamento de Pesos y dimensiones de 1994", las demás (DE, VD, VT, LR y LS) son dimensiones obtenidas en campo.

Siendo:

DE = Distancia entre ejes, LR = Longitud del remolque, VD = Vuelo delantero, VT = Vuelo trasero y

LS = Longitud del semiremolque

Distribuidos durante el último lustro como sigue:

| Tipo de Vehículo | Composición vehicular promedio (en %) | | | | | | |
|------------------|---------------------------------------|------|------|------|------|------|----------|
| | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | Promedio |
| C2 | 39.9 | 38.9 | 35.0 | 45.2 | 26.7 | 28.5 | 35.7 |
| C3 | 20.0 | 20.5 | 19.5 | 15.5 | 17.1 | 12.8 | 17.5 |
| T3-S2 | 18.9 | 19.8 | 26.1 | 22.1 | 39.3 | 43.3 | 28.2 |
| T3-S3 | 15.7 | 15.4 | 13.2 | 12.4 | 12.8 | 7.5 | 12.8 |
| T3-S2-R4 | 2.6 | 2.8 | 3.3 | 3.1 | 2.2 | 3.3 | 2.8 |
| Otros | 2.9 | 2.6 | 2.9 | 1.7 | 1.9 | 4.6 | 2.7 |
| Suma | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Tabla 2.2 Composición promedio de los vehículos más representativos (Gutiérrez y Mendoza, 2001)

Sin embargo como ya se dijo no sólo la configuración de los ejes nos permite caracterizar al vehículo en cuestión. Existe otro parámetro conocido como el Peso Bruto Vehicular (PBV) que corresponde al peso máximo permitido por el reglamento.

La tabla pone de manifiesto una clara violación de los pesos máximos autorizados establecidos por el actual reglamento, de lo que se deduce la necesidad de contar con un mayor control en materia de transporte y las correspondientes modificaciones en el diseño de pavimentos.

| Tipo de Vehículo | Peso máx reglamentario | Peso máximo en toneladas | | | | | | |
|------------------|------------------------|--------------------------|-------|-------------|-------|--------------|--------------|--------|
| | | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | Global |
| C2 | 17.5 | 26.8 | 26.8 | 30.0 | 26.0 | 26.0 | 26.0 | 30.0 |
| C3 | 26.0 | 49.4 | 42.4 | 56.4 | 48.4 | 48.4 | 43.4 | 56.4 |
| T3-S2 | 44.0 | 79.7 | 79.0 | 106.0 | 97.0 | 116.0 | 116.0 | 116.0 |
| T3-S3 | 48.5 | 95.4 | 92.4 | 108.4 | 113.4 | 118.4 | 93.9 | 118.4 |
| T3-S2-R4 | 66.5 | 109.1 | 121.6 | 122.6 | 125.6 | 116.6 | 115.6 | 125.6 |

Tabla 2.3 Peso Bruto Vehicular máximos registrados (Fuente: Gutiérrez y Mendoza, México 2001)

2.3 Deterioro del pavimento

Con toda seguridad hemos transitado alguna vez por una carretera. Como usuario lo menos que uno espera es que nuestro recorrido resulte confortable; pero no siempre es así ya que en algunos tramos es muy posible que hayamos experimentado baches, desniveles, saltos, etc. Que terminan provocando incomodidad a nuestra marcha.

El deterioro obedece a varias causas, algunas relacionadas con factores climáticos, otras más consecuencia del efecto acumulado de las cargas.

El análisis del estado de esfuerzos de un punto o partícula cualesquiera, revela que el σ principal mayor supone la condición más desfavorable para el firme, las cargas verticales, normales a la superficie inducen la compresión de las fibras superiores y la tensión de las fibras de la mitad inferior de la capa, a la base. Situación que se agudiza a medida que aumenta el paso de vehículos pesados que solicitan la estructura.



La deformación ocasionada continúa creciendo justo hasta el instante en que la falla se presenta, cuando la aparición de los primeros signos de agotamiento son inminentes e irremediables (agrietamiento). Una grieta comienza en el punto donde el esfuerzo por tensión es máximo. Este mecanismo se transmite y multiplica de manera acelerada y ascendente afectando a todas aquellas fibras superiores que encuentra a su paso creándose pequeños conductos por los que desafortunadamente circulará el agua, la que en un corto plazo bombeará la fracción fina de las capas subyacentes otrora protegidas del intemperismo, disminuyéndoles al mismo tiempo la resistencia para las que fueron concebidas.

Con frecuencia al oír hablar de deterioro pensamos instantáneamente en el ahuellamiento y agrietamiento sufrido en la capa más inmediata a la superficie, pero escasamente en la manera de medirlo no sólo cualitativa sino cuantitativamente. La AASHTO propuso para ello evaluar estas dos irregularidades introduciendo un nuevo concepto conocido como **índice de servicio**. El índice de servicio califica en una escala del 0 al 5 las condiciones que de manera general va presentando el pavimento con el transcurrir del tiempo y el efecto acumulado de las cargas que imponen perennemente el número de ejes sencillo equivalentes. Correspondiendo el cero a un estado de intransitabilidad y el cinco al pavimento de mejor calidad y más altas especificaciones técnicas cumplidas.



Fig 2.6 Indicadores del pavimento

Aunque el índice de servicio no deja de ser un parámetro subjetivo existe el propósito de asociarlo con otros estándares –coeficiente de fricción, perfil, distancias de frenado, visibilidad, etc- que ayuden a describir con todo rigor la magnitud del daño ocasionado. Por eso mismo, es importante que cuando se construya un pavimento éste alcance el más alto de los índices de servicio posibles redundando en una mayor vida útil.

La ASSHTO propone que la serviciabilidad inicial en pavimentos de concreto sea de 4.5 y para pavimentos de asfalto de 4.2. mientras que para índices de servicio final la SCT (México) aconseja un valor de 2.5 para autopistas y 2.0 para carreteras.

2.3.1 El Comportamiento de las cargas y la relación esfuerzo deformación

En un principio el esfuerzo y la deformación sólo serán verticales bajo condiciones estáticas y concentradas de la carga. Asumiendo que para un firme semirrígido como lo es el reciclado de pavimentos con Cemento Portland cada llanta tiene un área de contacto de forma circular similar al de una placa flexible con un radio y presión dados. Donde el cálculo de los esfuerzos y deformaciones se obtiene a partir de las siguientes ecuaciones. Todas ellas basadas en la fórmula que publicara Boussinesq hacia 1885 considerando al suelo como homogéneo, isótropo y linealmente elástico.

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi} \frac{z^3}{(r^2 + z^2)^{5/2}} \tag{Ecuación 2.1}$$

$$\sigma_z = q \left[\frac{1 - \nu}{a + z} \right] \tag{Ecuación 2.2}$$

$$\sigma_r = q \left[\frac{1 + 2\nu}{a + z} - \frac{2(1 + \nu)z}{(a + z)^2} + \frac{z}{(a + z)} \right] \tag{Ecuación 2.3}$$

$$\epsilon_z = \frac{(1 + \nu)q}{E} \left[\frac{1 - 2\nu}{a + z} + \frac{2\nu z}{(a + z)^2} - \frac{z}{(a + z)} \right] \tag{Ecuación 2.4}$$

$$\epsilon_r = \frac{(1 + \nu)q}{2E} \left[\frac{1 - 2\nu}{a + z} - \frac{2(1 - \nu)z}{(a + z)^2} + \frac{z}{(a + z)} \right] \tag{Ecuación 2.5}$$

$$\omega = \frac{(1 + \nu)qa}{E} \left\{ \frac{a}{(a + z)} + \frac{1 - 2\nu}{a} [(a + z) - z] \right\} \tag{Ecuación 2.6}$$

Ahora que por otro lado, si consideramos que existe movimiento y la carga se desplaza de un sitio a otro el esfuerzo inducido tendrá tres componentes; **la normal**, que siempre se conserva; **un esfuerzo horizontal**, producto de la aceleración y/o frenado del vehículo **y un cortante**, como consecuencia del roce entre neumático y pavimento.

Así lo muestra la figura donde el estado de esfuerzos para el punto "x" experimenta en (1) esfuerzos normales y cortantes, en (2) un estado triaxial de esfuerzos similar al que se reproduce en laboratorio (cortante nulo) y para (3) nuevamente, esfuerzos normales y cortantes pero con dirección contraria a la del punto número (1)

| | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Superficie de rodamiento | Superficie de rodamiento | Superficie de rodamiento |
| Base | Base | Base |
| Subbase | Subbase | Subbase |
| Subrasante | Subrasante | Subrasante |

Fig 2.7 Estado de esfuerzos en la subrasante

Si nos apoyamos de un plano coordenado para representar la relación que guardan el tipo de esfuerzo vs el tiempo en que se aplica la carga apreciamos que conforme el vehículo avanza hacia el punto "x", el esfuerzo cortante va aumentando hasta alcanzar un máximo para luego decrecer hasta un valor de cero justo en el instante en que el esfuerzo vertical es máximo. Posteriormente, incrementa de nuevo pero con signo contrario hasta llegar a un máximo negativo para después decrecer y volverse cero completándose un ciclo, cuyo comportamiento se asemeja a la de una onda senoidal –su duración es apenas de 0.1 seg para la aplicación de la carga con un periodo de reposo de 0.9 seg y varía de acuerdo con la velocidad del vehículo y la profundidad del punto en cuestión-. Este proceso **se va repitiendo "n" cantidad de veces** por lo que habrá que prestar atención al número acumulado de ejes sencillos equivalentes (E.E) y a su módulo de Young o de elasticidad para fines de diseño de cualquier obra vial.

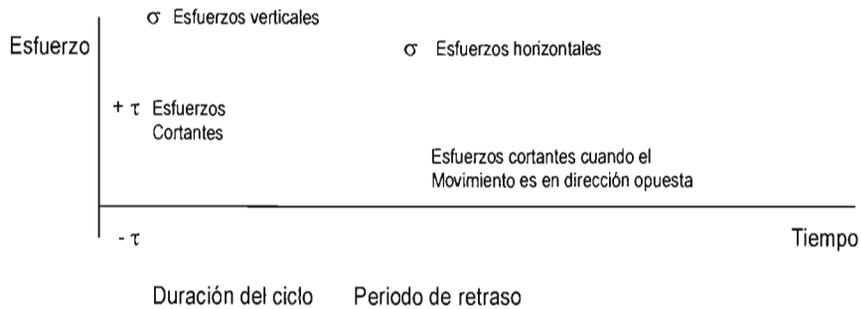


Fig 2.8 Ciclo de esfuerzos verticales, horizontales y cortantes originados por la aplicación de la carga impuesta.

2.4 Condiciones ambientales

Los ataques que por acción del clima guardan vías, carreteras y autopistas contribuyen de manera directa en la merma de los materiales de c/u de las capas que comprenden al pavimento. Destacándose los ocasionados por la incidencia de la **radiación solar** (luz ultravioleta) sobre la superficie expuesta de la capa de rodadura y el ingreso de agua al interior de la estructura.

La rodadura por ejemplo acusa síntomas de envejecimiento prematuro cuando el cemento asfáltico comienza a oxidarse poco a poco tras el incesante bombardeo de los rayos UV hasta alcanzar una condición realmente frágil que finaliza con la pérdida gradual de su propia integridad. En un principio, el material endurece lentamente para después ir decreciendo en elasticidad y capacidad de respuesta ante las cargas, lo que a la larga origina no sólo el agrietamiento de la mezcla sino también el paso del agua a capas subyacentes.

Una vez que el agua ha logrado infiltrarse, satura todo el material que encuentra en su camino ablandando y lubricando de manera simultánea las partículas de grano fino que en mayor número a la postre expulsará a través de las mismas grietas (**efecto de bombeo**) quedando al descubierto el agregado de mayor tamaño carente de unidad.

| | | |
|---|---|--|
| Ahuellamiento confinado A las capas asfálticas | Grietas por fatiga de la base asfáltica con el ingreso de agua y posterior pérdida de finos de la subbase granular | Deformación de la subrasante originando agrietamiento en las capas superiores e ingreso del agua con la pérdida de finos de la subbase granular |
| Rodadura asfáltica | | |
| Base asfáltica | | |
| Subbase granular | | |
| Subrasante | | |

Fig 2.9 Indicadores de falla de los pavimentos

2.5 Mantenimiento del pavimento

El conjunto de medidas que suelen adoptarse para la conservación de una obra carretera incluyen entre otros: la impermeabilización y drenaje efectivos, el sellado de grietas y/o el riego ligero de emulsión asfáltica diluida, c/u de estas operaciones cumple una doble función; evitar que el agua estancada tenga acceso al interior de la estructura a través de las grietas y al mismo tiempo prolongar la vida de servicio. Llama la atención que éstas y otras actividades sólo competen a la superficie de rodadura, pues en caso de existir un daño más agudo que involucre capas inferiores no quedará más remedio que inclinarse por considerar la rehabilitación de la estructura como una posibilidad real.

Pero quizá, la condición más importante para saber qué remedio elegir es el relacionado con el presupuesto del que se dispondrá para dicho trabajo, siendo el peor de los escenarios posibles el permanecer indiferente y no hacer nada por impedir el daño que sufre el pavimento ante el paso del tiempo puesto que la velocidad del **deterioro** va creciendo de manera **exponencial**.

La siguiente figura resalta la importancia de tomar medidas a tiempo para mantener la calidad del servicio tan alto como sea posible, conforme ésta disminuya las soluciones deberán ser mayores, así como sus costos.

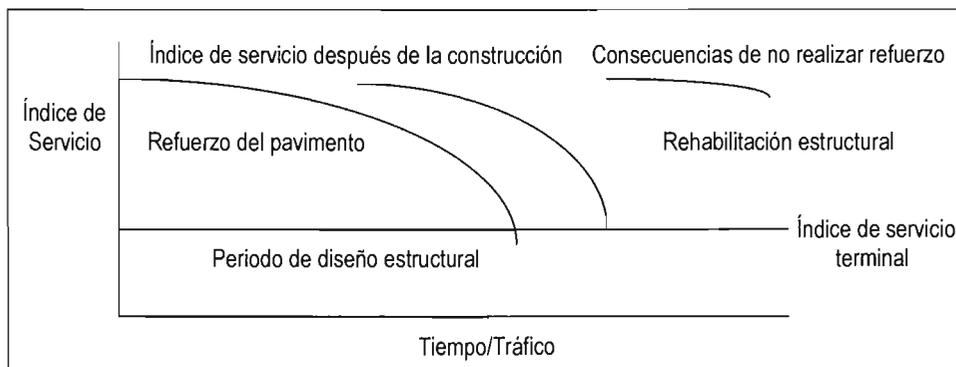


Fig 2.10 Gerencia del mantenimiento. Decisiones de rehabilitación mediante la observación de la calidad de servicio

2.6 Alternativas de rehabilitación

Las primeras actividades a realizar comprenden el reconocimiento a pie y/o a bordo de un vehículo en ambos sentidos de la carretera, la localización de las zonas donde el deterioro es más severo, el control km a km asentado en bitácora con la descripción del daño indicando cuántas y cuáles son las capas involucradas y el registro fotográfico que los documente de ser posible.

Una vez concluida esta etapa, se tendrán los elementos suficientes para aclarar si se trata de una falla confinada sólo a la rodadura o existe un **problema serio de capacidad estructural**.

¿ Valdrá la pena invertir en un proyecto a corto plazo cuyos resultados aunque inmediatos sólo posponen el rescate definitivo del pavimento ? o ¿ será mejor destinar la suma de esos mismos recursos a favor de un mayor periodo de diseño ?.

Si la respuesta es: "el problema cae dentro de los primeros 10 cm", el tipo de solución que se busca va dirigido a rejuvenecer el asfalto. El fresado por ejemplo retira y reemplaza la capa superior por una mezcla nueva, fresca, hecha al momento; como "afeitando" el camino. Otro puede ser, el reciclaje poco profundo el que además añade nuevos materiales o simplemente coloca una nueva carpeta sobre la ya existente.

Ahora que, si el deterioro es aún mayor la solución debe ser radical. La reconstrucción total supone botar todo e iniciar de cero lo cual no necesariamente es tan malo si se piensa en mejorar o modificar sustancialmente las condiciones y características geométricas actuales del firme ya sea ampliando los carriles, y/o aumentando/disminuyendo la pendiente en ciertos tramos. Si hablamos de reciclaje éste debe ser más profundo y su diseño demanda una mayor comprensión de la naturaleza de c/u de sus componentes recuperados e incorporados en pro del balance exacto que optimice la fórmula de trabajo.

3.1 Definición de reciclado

Es un procedimiento que permite utilizar los materiales degradados procedentes de firmes que ya han estado en servicio, en la construcción de una nueva capa, homogénea, cuya capacidad estructural se ve mejorada con la adición de un conglomerante/aglomerante (cemento y/o emulsión) posterior al fresado, agua –para la hidratación, envuelta y compactación- y posiblemente algún corrector granulométrico.

Los componentes se integran de manera homogénea tras una vigorosa mezcla, que después se extiende, compacta y cura, obteniéndose finalmente una capa base o subbase de características semirrígidas.

3.2 Tipos de reciclado

Existen varios criterios para clasificar un reciclado; los hay por temperatura, el lugar donde se hace la mezcla o por el tipo de ligante empleado.

a. De acuerdo al lugar

1. In Situ

Como su nombre lo indica, la mezcla del material disgregado con el aglomerante/conglomerante tiene lugar en la propia carretera. Toda vez que el ligante haya cubierto el total de la superficie por medio de equipos repartidores (nunca manualmente) da inicio la mezcla, añadiendo una cierta cantidad de agua durante esta operación de preferencia en forma de lechada.

2. En planta

Después de escarificado el material, éste se conduce a una central para ser aprovechado como parte de una nueva mezcla que incluirá la adición de algún conglomerante. Para más tarde regresar al mismo sitio de partida, ser extendido, compactado y terminado.

b. Por Temperatura

1. En frío

Para este tipo de reciclado no es necesario calentar los materiales del firme existente efectuándose por lo regular in situ.

2. En caliente

De realizarse en planta, el material fresado deberá mezclarse con betún asfáltico incorporando de ser necesario material importado a manera de corrector granulométrico –piedra triturada, grava o arena- el material reciclado integra menos del 40% del total producto de la mezcla.



Fig 3.1 Reciclado en Planta

c. Por el tipo de ligante

1. Cemento

El cemento Portland es una de las alternativas con mayor aceptación que existen hoy en día entre otras razones porque **permite atacar mayores profundidades** de material, reduce el espesor de las capas tratadas, disminuye la plasticidad, adquiere una resistencia importante a edad temprana que en suma dan como resultado un aumento considerable en la capacidad de soporte del firme garantizando no sólo su buen funcionamiento sino también una larga vida útil.

2. Cal y cemento

Para ciertos materiales demasiado plásticos como puede ser el caso de algunas arcillas se recomienda el uso de ambos; mientras que la cal floclula los finos gracias a un intercambio iónico, el cemento le añade resistencia.

3. Emulsión bituminosa

Esta variante utiliza agua y emulsión durante la mezcla con el material de origen, logrando un producto cuyas características son similares a las de una gravaemulsión o una mezcla bituminosa en frío.

4. Betún espumado

Ocupar este tipo de ligante implica todo un proceso para su elaboración, que inicia calentando el betún a una temperatura aproximada de 180°C para después inyectarle agua fría en proporción del **2 al 3% en peso** y aire adquiriendo para entonces una consistencia espumada, de ahí su nombre incrementando en 30 veces su volumen original, pero disminuyendo su viscosidad lo que le permitirá incorporarse al material eskarificado.

5. Cemento y Emulsión

Combina lo mejor de c/u de estos materiales, ofreciendo flexibilidad hasta cierto punto con la resistencia suficiente, pero sin que se presenten los problemas usuales de retracción (fisuras del cemento). En este tipo de reciclado mixto es común que el cemento participe del **1.0 al 2.5% de la dotación**, obteniéndose una mezcla de rigidez intermedia que incrementará la capacidad de reparto de las cargas propias del firme, siendo el **principal inconveniente** de esta técnica el **costo** de su proceso; de 2 hasta 3.5 veces más elevado que la simple recuperación con cemento.

3.3 Trenes de Reciclaje

Uno de los aspectos más importantes y significativos que nos llama poderosamente la atención antes, durante y después de la ejecución de los trabajos de reciclaje es el relacionado con los equipos, la tarea que desempeñan y el orden que guardan todos y c/u de ellos **varia según el tipo de agente estabilizador** que pretenda emplearse, por lo que existen distintas maneras de acoplar un tren. Su versatilidad les permite ser tirados o empujados indistintamente. Está de sobra decir que el resultado final comprenderá todos los estudios, análisis y consideraciones hechas previamente a su puesta en marcha.

Al estabilizar suelos y mezclas de materiales con adición de agua y cemento Portland el proceso constructivo sugiere anteponer una mezcladora de lechada a la recicladora obteniendo así, una dosificación apropiada, homogénea al 100% prescindiendo del empleo de repartidores de cemento y camión cisterna. El control y registro del peso del cemento así como el volumen de agua aportado son regulados por un **microprocesador** integrado en la propia mezcladora que trabaja automáticamente en función de la velocidad de avance y la profundidad del corte suministrando al mismo tiempo la suspensión resultante al sistema de riego e inyección del que también dispone, éste a su vez a la carcasa para su mezcla definitiva con el material fresado.

Vale la pena hacer un alto para hablar sobre esta pieza clave de la que está compuesta toda recicladora, sobre todo por el papel que desempeña dentro del reciclado, en capítulos más adelante se describirá más a detalle sus características técnicas, componentes, consideraciones de servicio, manutención, por mencionar sólo algunos.

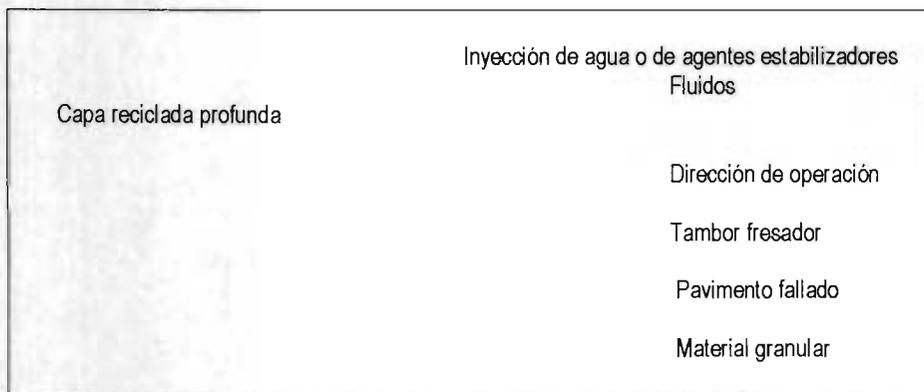


Fig 3.2 Configuración del tambor/fresador/mezclador y sistemas de inyección

En sí, **la carcasa** no es más que un tambor donde se aloja un rotor, el que equipado por una serie de unidades de corte (picas) a todo lo largo y ancho realiza el trabajo de escarificado/fresado a diferentes profundidades dependiendo de las necesidades del proyecto. Como se mencionó anteriormente, el agua-cemento-lechada u otro tipo de agente fluidizante es inyectada dentro de esta cámara de manera que al entrar en contacto directo con el material disgregado se combina formando una masa cuyo contenido óptimo de humedad facilite la tarea al rodillo compactador que precede a la recicladora y con el que termina dicho tren.



En algunas obras de menor relevancia, es todavía común observar como ciertos vehículos distribuyen sobre la superficie de contacto el cemento en forma de polvo a la espera del paso de la máquina recicladora. Esto en realidad no es muy recomendable pues **la dosificación** no es precisa y la acción del viento puede poner en peligro la salud de quienes participan en esta actividad.

Cuando se combinen emulsión bituminosa y cemento puede acoplarse un tren de manera similar, sólo que en esta ocasión el primer vehículo en tomar parte será un tanque/cisterna de emulsión. **La adición del cemento es del 2 al 5% en peso** del material seco al igual que el de la emulsión bituminosa dependiendo del espesor de las capas subyacentes. En respuesta se obtiene un módulo de alta resistencia y menor riesgo de fisuración.

Si se opta por distribuir el cemento en forma pulverulenta para trabajos de poca profundidad y donde el reciclaje se lleva a cabo dentro de las mismas capas bituminosas suelen manejarse recicladoras montadas sobre orugas las que conectadas por medio de una manguera flexible realizan la función de fresado, mezcla y extensión del material y aún más, pues de estar equipadas por una plantilla pavimentadora ya no será necesario el uso de motoniveladora para corregir el perfil.



Rodillo Motoniveladora Recicladora WR2500 Mezcladora de cemento WM1000 Tanque de agua y/o emulsión

Fig 3.4 Tren típico de reciclaje con cemento y/o emulsión bituminosa, con la participación de la recicladora de Lantas neumáticas de alta flotación



Fig 3.5 Tren típico de reciclaje con emulsión asfáltica utilizando máquina recicladora montada sobre orugas

En la dosificación de espuma de betún y agua los equipos involucrados son en el siguiente orden:

Un camión de volteo, encargado de aportar nuevo material (corrector granulométrico) en caso de ser necesario, que será repartido por una motoniveladora, seguido por un camión cisterna y un camión abastecedor de betún, una recicladora; encargada del fresado y mezcla de los materiales, nuevamente una motoniveladora que a diferencia de la primera ahora servirá para corregir el perfil de la mezcla extendida y para finalizar, un compactador.



Fig 3.6 Conformación de Trenes de reciclaje en frío

El uso de espuma de betún en caliente ofrece la gran ventaja de poder construir con un solo tipo de ligante una capa base de alta calidad y capacidad portante. El porcentaje de betún incorporado al peso del material en seco es del 2 al 4%. El empleo de betún por otra parte elimina la formación de polvo.

3.4 Beneficios del reciclaje en frío

Calidad de las capas recicladas

La adición de agua y agentes estabilizadores de todo tipo a materiales existentes (cuyo deterioro se manifiesta por la pérdida de sus propiedades iniciales) trae como consecuencia una mezcla de **consistencia uniforme y de muy alta calidad**. En buena medida, este éxito se debe al microprocesador que les permite no sólo controlar electrónicamente la profundidad del corte (con un margen +/- 5 mm de aproximación) sino también garantizar que los fluidos, bombeo e inyección durante la mezcla sean dosificados de manera idónea.

Integridad estructural

Como es de esperar al término de los trabajos en frío encontraremos un producto final cuyas características comprenderán el aprovechamiento del material envejecido, la **recuperación al máximo** del pavimento original, **capas íntimamente ligadas** e incremento en la capacidad portante del firme degradado.

Inalterabilidad de la subrasante

A diferencia de la rehabilitación de pavimentos con equipo convencional las recicladoras actuales efectúan el fresado, mezcla y extendido del material en **una sola pasada** sin que ello implique someter a la subrasante a repetidos esfuerzos de carga, con lo que además se evitan otros problemas relacionados con las guarniciones y cunetas o los pasos a desnivel.

Económico-Ambientales

Ocupar el mismo material siempre será positivo, no sólo desde el punto de vista económico sino también por la reducción del tiempo y el consumo de energía que representa el transportar grandes volúmenes de producto importado procedente de bancos de préstamo y canteras alledañas.

Relacionadas con el tráfico

Una de las bondades que implica trabajar con un tren de reciclaje, es sin duda alguna la posibilidad de rehabilitar carriles individuales sin que se interrumpa el tráfico que circula en ese sentido lo cual evita molestias al tener que incorporarse a una carretera secundaria adyacente. Por el acomodo de cada una de sus piezas el tren de reciclaje **no obstaculiza** el ancho de calzada a menos claro que se trate de un solo sentido.



Fig 3.7 Rehabilitación de carriles individuales

Reducción de contaminantes

Gracias a un ambiente controlado al interior de la cámara mezcladora; se reduce al mínimo la emisión de ruido así como de polvo contaminante.

3.5 Características de la capa recuperada

1. Reciclaje hasta la profundidad en que se presentan los problemas
2. Estructura homogénea y de resistencia superior
3. Aumento en la capacidad portante, adecuada al tipo de tráfico que se espera recibir
4. Mayor durabilidad, insensible ante condiciones adversas provocadas por el intemperismo
5. Protección de las capas interiores

4.1 Investigación y diseño del pavimento

El interés que despierta el uso cada vez mayor de las técnicas de reciclado en frío, promueve la investigación no sólo de las causas que inducen el deterioro del pavimento aclarando el ¿porqué? de su comportamiento, también atiende aspectos relacionados con el diseño en sus distintas fases como pueden ser: el período de diseño ¿a corto o largo plazo?, funcionales ¿cuál debe ser el índice de servicio?, presupuesto destinado, medios para hacerlo ¿equipo?, ¿mano de obra calificada?, ¿conocimientos? y mantenimiento ¿cada cuánto?.

Cada proyecto es diferente y como tal, estas consideraciones y otras más deben ajustarse para conseguir un diseño de calidad adecuado. Investigar, es recopilar toda la información posible relacionada con el proyecto, es disponer de antecedentes que permitan identificar el tipo de material del que está compuesto el pavimento, por cuantas capas está formado y de qué espesor es cada una de ellas.

A lo largo de este capítulo expondremos los métodos de investigación más socorridos de acuerdo con cada una de las tres categorías en que se divide el reciclaje en frío considerando por supuesto sus diferencias y alcances, favoreciendo así la selección del diseño de rehabilitación más propicio.

4.1.1 Tráfico de diseño

Con base en lo expuesto en el capítulo II, el análisis del tráfico futuro cobra una mayor importancia. El buen desempeño de un diseño cualesquiera dependerá de la acertada predicción en el cálculo del porcentaje de vehículos pesados que circulen sobre el carril de proyecto, el número de cargas legales por eje y los numerosos conteos que por categorías se esperan realizar. Contar con registros históricos obtenidos de la propia administración encargada siempre es valioso, pero como la información usada para calcular el número de E.E acumulados no es exacta, en ocasiones se requiere llevar a cabo un análisis de sensibilidad para investigar cómo los cambios en los datos de entrada podrían influir en el tráfico de diseño.

4.1.2 Métodos de investigación

La siguiente, es una sinopsis de los métodos más usados...

Reconocimiento del estado que guarda la carretera

Inspección visual

Es por excelencia, la herramienta más usada a la que podemos recurrir para entrar en contacto con el problema. El propósito de este primer acercamiento es obtener una impresión general de la magnitud del proyecto, dividiendo a la carretera en secciones más o menos homogéneas donde el deterioro y tipo de firme resulten los más similares posibles. Para lograrlo suele recurrirse a la renta de un vehículo con Georadar; este dispositivo emite una onda electromagnética que una vez rechazada por el pavimento nos permite deducir los espesores de las múltiples capas que lo integran, más no de su composición. Frecuentemente es conducido a todo lo largo de la vía a una velocidad promedio entre 60 y 80 km/hr.

Evaluación visual detallada

Como era de esperarse una vez cubierta la etapa anterior, ahora el reto será averiguar qué grado de deterioro observa el pavimento y que mejor oportunidad para hacerlo que caminando sobre el mismo.

Acompañado por una libreta de tránsito habrá que tomar nota de todas y cada una de las fallas localizadas a todo lo largo y a todo lo ancho del camino, procurando si es posible, referirlas a cadenamientos aproximados. Problemas relacionados con aspectos geométricos (pendientes, curvaturas, accesos, terraplenes, bordes, barreras de seguridad), tramos que requieren una corrección de rasante, cambios geológicos y en particular los relacionados con el drenaje (cunetas, drenes subterráneos y obras de desagüe superficial) merecen especial atención debiendo estar claramente documentados y asentados en la bitácora del proyecto.

La inspección visual reconoce la existencia de elementos –deformaciones, agrietamientos, alisamientos y desintegración- que en función de su severidad, frecuencia y ubicación delatan el estado de deterioro estructural de la carretera y por ende la urgente necesidad de su refuerzo.



Fig 4.1 Desintegración de la superficie y Alisamiento de la superficie en carriles de proyecto

| Modos y tipos de deterioro | |
|----------------------------------|---|
| Modo de deterioro | Tipo de deterioro |
| Deformación | Ahuellamiento, depresiones, abultamientos |
| Agrietamiento | Piel de cocodrilo, en mapa, en bloque, longitudinales y transversales |
| Desintegración de la superficie | Baches, desmoronamiento, parches, ruptura de bordes |
| Lisura de la textura superficial | Exudación, pulimiento |

Los resultados obtenidos suelen vaciarse en un diagrama que combina estos y otros parámetros, tal como se muestra en la Figura 4.4 Evaluación del pavimento

Apiques o calas

Se trata de una excavación hecha a manera de trinchera cuya profundidad normalmente de 1 m comprende la trayectoria externa de las ruedas en un carril de tráfico. Conforme avanzan los trabajos se lleva a cabo la extracción de muestras representativas de cada estrato. éstas deben ser de buen tamaño y con material suficiente con las que puedan determinarse su contenido de humedad (plasticidad), la calidad del material (resistencia) y algún posible diseño con agentes estabilizadores. Concluida esta etapa se procede a dibujar a detalle el perfil, determinando al mismo tiempo el espesor real de cada una de las capas involucradas.

| Leyenda Suelo | Prof en mm | Descripción del suelo | | | | | | |
|---------------|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|---|-----------|---------------------------------|
| | | Color | Consistencia | Condición de Humedad | Estructura | Tipo de suelo | Origen | Muestras |
| | 50 | Rodadura Asfáltica | | | Severamente fisurada | | | 2 bolsas grandes |
| | 140 | Base Asfáltica | | | | | | 4 bolsas grandes (≈80 kg) |
| | 310 | Gris claro Café | Suelta | Ligeramente Húmeda | Fragmentada | Triturado Arenisca Cuarclítica | Importado | 3 bolsas grandes (≈70 kg) |
| | 550 | Café oscuro | Medianamente Densa | Ligeramente Húmeda | Intacta | Grava natural, arenisca meteorizada | Importado | 3 bolsas grandes (≈70 kg) |
| | 1000 | Gris café oscuro | Densa | Húmedo | Fisurada | Arena arcillosa, altamente meteorizada | Residual | 3bolsas grandes (≈70 kg) |

Fig 4.2 Ejemplo de un perfil de apiques



Fig 4.3 Agrietamiento en mapa y alisamiento de la superficie

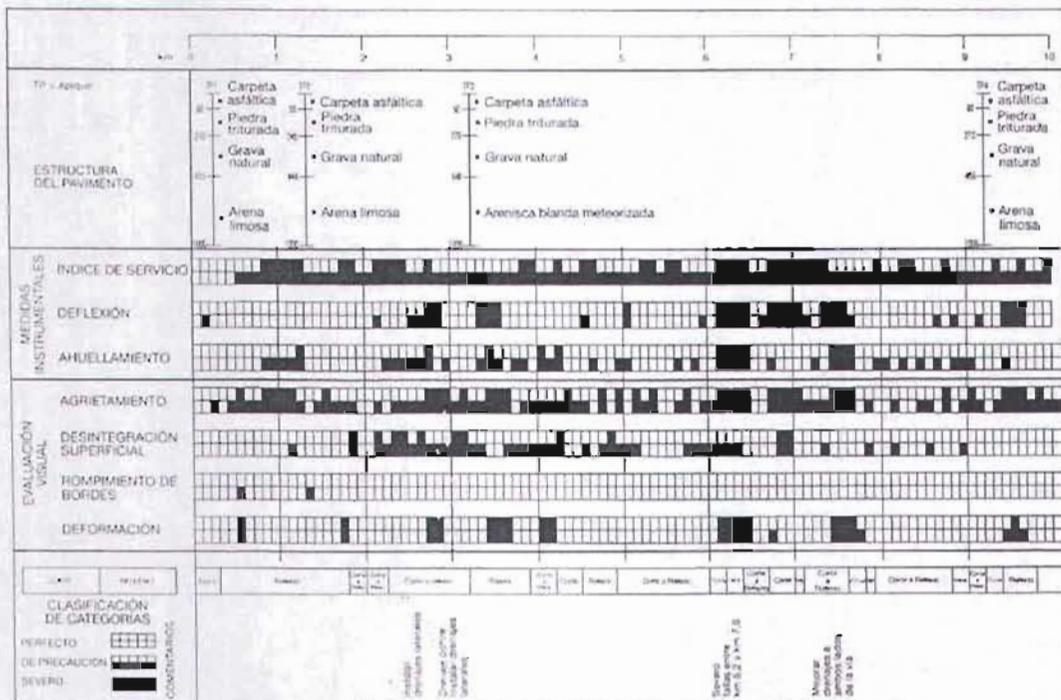


Fig 4.4 Evaluación del pavimento

Toma de núcleos

Es recomendable que la extracción de núcleos sea representativa del tipo e importancia de la obra, por ello el número de los mismos ha de ser suficiente para cumplir ese propósito. Existe sin embargo una regla que señala como mínimo dos sondeos y una cala por cada kilómetro recorrido.

A diferencia del método anterior esta alternativa resulta mucho más rápida, altera menos el tráfico, es económica y pronta de ensayarse. Su única desventaja radica en que la profundidad que suele atacarse oscila entre los 200 y 300 mm superiores del pavimento, por lo tanto los agregados no ligados así como los suelos adolecen del muestreo apropiado para su análisis debido a la pérdida usual de material durante este proceso.

Los ensayos típicos para ambos casos incluyen tamizado, plasticidad y capacidad de soporte de California (CBR).

4.1.3 Evaluación del pavimento por métodos no destructivos

Medidas de la profundidad del ahuellamiento

El mecanismo para averiguar este tipo de deterioro es muy simple. Colocando una regla de manera transversal sobre el carril de interés podemos medir no sólo el ancho sino la profundidad de la deformación por donde circula el tráfico. Anchos importantes indican fallas profundas en el pavimento mientras que, si son relativamente angostas la falla se localiza en las capas superiores.

Las profundidades de ahuellamiento se miden a intervalos regulares a lo largo de la carretera, los resultados se grafican contra las medidas de deflexión de la superficie. De esta manera es posible establecer donde se concentra el deterioro.

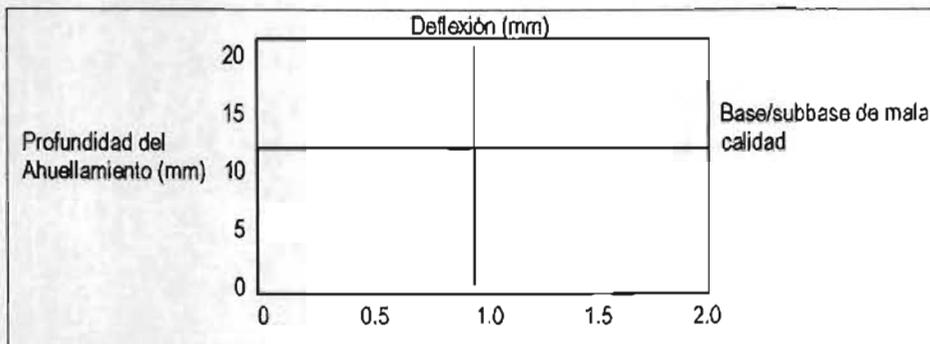


Fig 4.5 Ejemplo de un gráfico de datos de deflexión-profundidad del ahuellamiento

Medidas de flexiones

Con esta clase de métodos se pretende inferir qué tipo de condiciones presenta la estructura y cuál es su capacidad de respuesta ante la acción permanente de la carga. La magnitud de la deflexión y la forma de la cuenca son de utilidad para investigar las propiedades in situ del pavimento. El uso de la viga Benkelman por ejemplo, consiste de una palanca de 3.6 m suspendido de un bastidor que transmite la deflexión vertical del punto medido a un comparador dividido a cada 0.01 mm, también se le conoce como defleclómetro mecánico simple.



Ensayos con el penetrómetro dinámico de cono

El Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP) es un instrumento que por su sencillez y economía se utiliza en el análisis de pavimentos. Permite definir las condiciones estratigráficas del sitio. Consta de una varilla o vástago de acero que en su extremo inferior posee una punta en forma de cono de 20 mm de diámetro hecha del mismo material diseñada para penetrar el pavimento mediante golpes de martillo. Los resultados obtenidos corresponden con la resistencia in situ del firme.

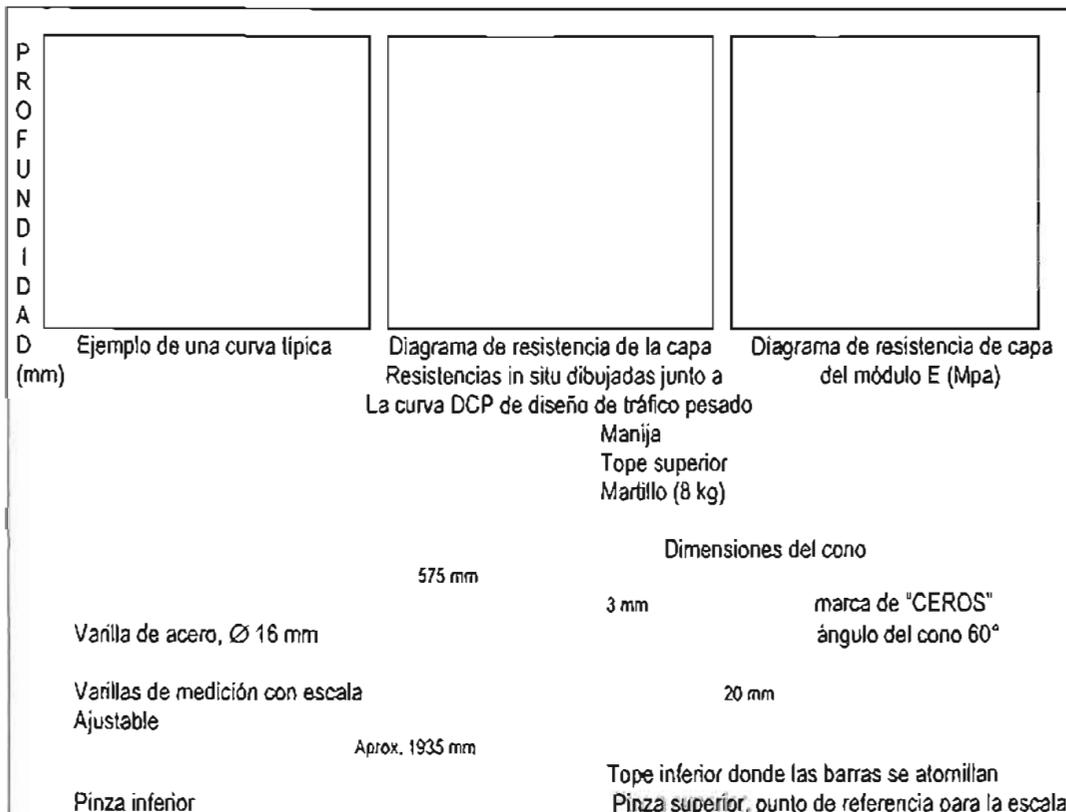


Fig 4.6 Sección de una impresión típica de computadora arrojada al emplear el Penetrómetro Dinámico de Cono

Esta clase de ensayos también sirven para estimar los valores del CBR, el módulo de elasticidad de los materiales y la resistencia a la compresión inconfiada de la subrasante y varias capas más. Ante la sospecha de poder hallar gruesas capas de asfalto o materiales fuertemente cementados conviene inclinarse por otro método o bien, aguardar a que primero sean removidas las capas asfálticas (superiores).

4.2 Categorías del reciclaje en frío

4.2.1 Reciclaje Superficial o de capas delgadas

En respuesta a los muchos casos donde el agrietamiento constituye el principal problema de las primeras capas del pavimento –sobre todo la de asfalto- esta variante del reciclaje en frío revierte esa situación corrigiendo espesores que van de los 80 a los 150 mm, entendiéndose que esta solución sólo aplica a proyectos de corto plazo y con este tipo de condiciones. Obviamente se mejoran la capacidad estructural del firme y la protección del pavimento contra la filtración del agua.

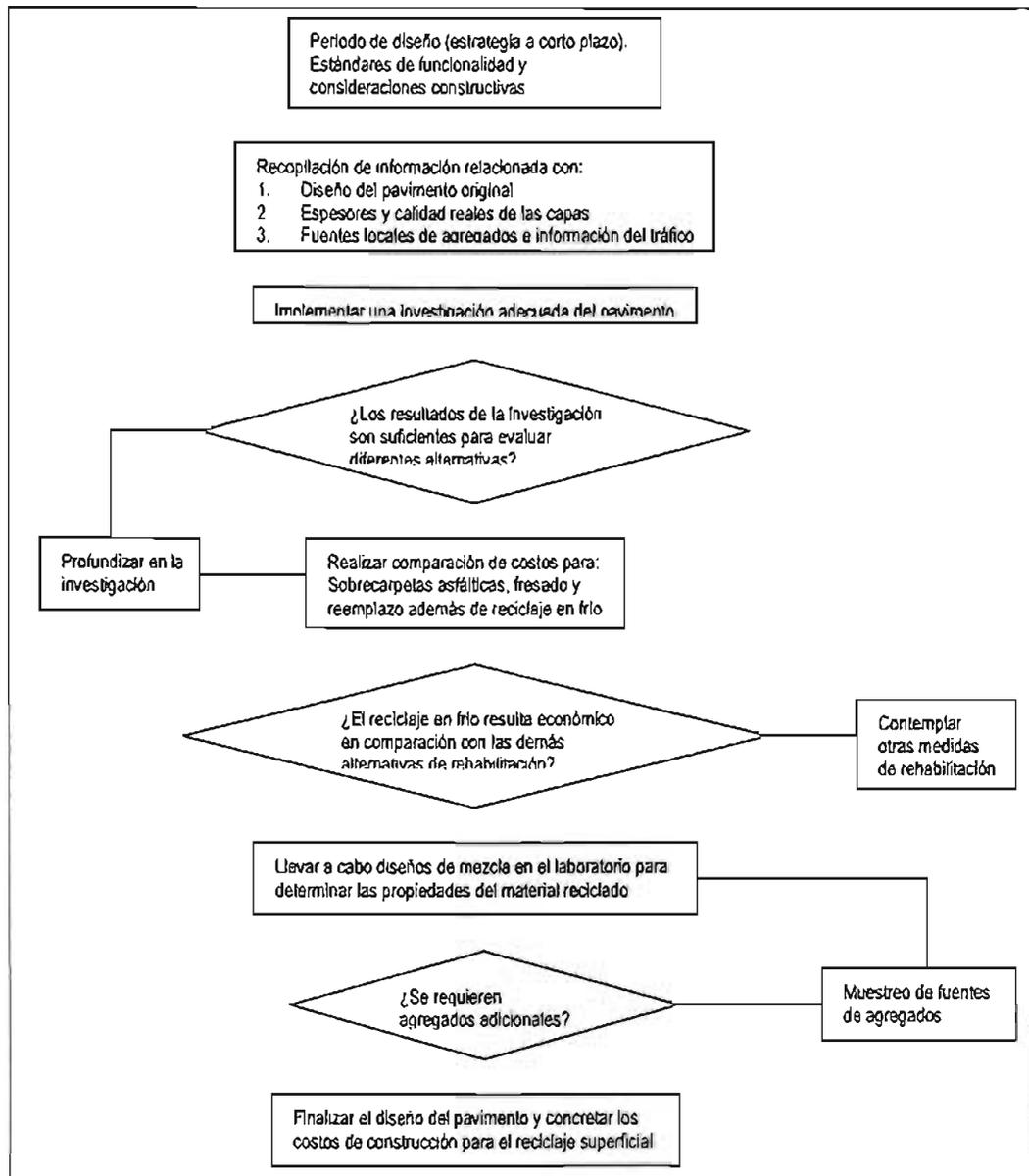


Fig 4.7 Metodología de investigación y diseño de pavimentos mediante reciclaje superficial

4.2.2 Mejoramiento de vías no pavimentadas

Transformar un camino de grava no pavimentada en uno que si lo sea, elimina tener que importar nuevo material, procedente de bancos de préstamo y fomenta el uso del material existente (la grava) evitando que ésta sea reemplazada.

Es frecuente que las vías no pavimentadas pierdan anualmente de entre 20 y 30 mm de grava a consecuencia del tráfico y la acción del clima.

El procedimiento consiste en reciclar espesores de entre 100 y 150 mm con aporte de agentes estabilizadores que van del cemento y la cal hidratada, a la emulsión o betún espumado; buscando en cualquier caso aplicar un sello muy ligero sobre la sección a tratar obteniendo así una superficie firme y libre de polvo.

4.2.3 Reciclaje Profundo con cemento

Por años ha sido una práctica común rehabilitar casi todo con capas de mezcla asfáltica en caliente gracias a que es fácil, rápido y relativamente barato montar una sobrecapa, sin hacer caso de las condiciones que presenta el pavimento o tipo de falla. Afortunadamente ya existen otras soluciones para atender estos problemas. Se ha reemplazado pavimentar capa tras capa por otros tratamientos como el reciclaje en frío, reciclaje en caliente y el reciclaje profundo; derivado del primero.

En el reciclaje en caliente, el pavimento existente normalmente procesado tiene una profundidad de 19 a 37.5 mm (0.75 a 1.5 in). Mientras que para el reciclaje en frío de 75 a 100 mm (3 a 4 in) es la profundidad estándar.

El reciclaje profundo se enfoca hacia problemas ligados a la base y estructura del pavimento que impedirían contar con una mayor resistencia e índice de servicio, mientras que los tratamientos convencionales (en frío y caliente) se encargan más de aquellos relacionados con fisuras y surcos menores. Por lo tanto el reciclaje profundo cubre **estrategias de diseño a mediano y largo plazo.**

El reciclaje profundo difiere de ambos en que el grueso de la sección pavimentada (100% del material existente) más una cierta cantidad predeterminada de material granular son tratados simultáneamente para producir una base estabilizada, corrigiendo no sólo algún problema la rasante sino también aquellos relacionados con la pendiente. Si el material "in situ" no es suficiente para mejorar la base a la profundidad deseada, nuevos materiales pueden importarse e incluirse en el proceso. Este método de reciclaje a menudo opera profundidades de 100 hasta 300 mm.

Muchos caminos fallan prematuramente entre otras razones por –un diseño inapropiado, el uso de materiales de menor calidad, una construcción deficiente, condiciones ambientales y/o estructurales que después de haber operado satisfactoriamente durante muchos años a consecuencia del tráfico presentan deterioro, etc-. Sin embargo en todas ellas se observa el mismo problema de origen; resistencia inadecuada.

Problemas comunes en la gran mayoría de los viejos pavimentos compuestos de asfalto

Los efectos del uso y el clima son responsables de la destrucción del pavimento. Los caminos requieren mantenimiento constante para estar en condiciones de servicio.

Los pavimentos de asfalto típicamente fallan de varias maneras. Las más comunes incluyen:

- **Fisuramiento por fatiga.** El tráfico ocasiona esfuerzos repetidos en la superficie y eventualmente el agrietamiento del asfalto.
- **Ahuellamiento.** Las cargas provocadas por el tráfico alteran los materiales en la superficie, base y rasante.
- **Desplazamientos.** Las fuerzas creadas por los coches y camiones al instante de frenar o detenerse socavan el material de la superficie de la capa base.
- **Pérdida en la base o soporte.** La humedad provoca deterioro, las cargas del tráfico o fallas en la rasante pueden ocasionar el colapso de la base del pavimento. El tipo de fallas mencionadas arriba predominan especialmente en caminos secundarios, donde la estructura del pavimento es ligera y no está diseñada para recibir incrementos en los niveles de tráfico. Repararlo puede ser costoso. Una forma de mantenimiento tradicional consiste en una sobrecapa ligera de asfalto, que sólo temporalmente resolverá el problema. Otras opciones como la remoción y reemplazo de capas son demasiado caras.

El reciclaje ahorra dinero y recursos naturales

El reciclaje profundo utiliza esos mismos materiales con deterioro y en adición con cemento, forma una base nueva mucho más fuerte y uniforme, con un mejor contenido de humedad que la base original, hecho que a la postre se verá reflejando en un menor mantenimiento. Los costos del reciclaje disminuyen normalmente entre un 25 a 50% comparados contra la remoción y reemplazo del viejo pavimento.

Comenzando por una nueva base

Una base nueva es importante para cualquier estructura, especialmente si se trata de pavimentos. La base del pavimento provee el espesor y la dureza necesaria para seguir soportando las cargas del tráfico. Las bases de pavimento estabilizadas, como las de suelo-cemento y el cemento tratado, combinan suelo y/o agregado con cemento y agua, mientras son compactados a altas densidades.

Una base dura reduce las deflexiones debidas a las cargas del tráfico, así tenemos que una delgadísima sección de cemento estabilizado puede reducir el esfuerzo en la rasante más que una capa espesa de agregado de la base no tratado.

Los pavimentos estabilizados con cemento forman una base resistente a la humedad, que mantiene al agua alejada y en altos niveles de resistencia incluso cuando está saturada.

Una base estabilizada con cemento también reduce problemas potenciales de bombeo de material fino de la subrasante. De requerirse una base de grueso importante también se puede incorporar material de la subrasante, arcillas, limo o suelo granular para ser reciclados junto con ella.

Así es como funciona el proceso con equipo convencional

Un pulverizador destruye la base de la vieja capa de asfalto. Una motoconformadora perfila el camino a la rasante deseada, haciéndola transitable para el tráfico temporal. A continuación, un camión rocía la cantidad prescrita de cemento sobre la base del camino pulverizado. Enganchado a un camión sistema, el pulverizador mezcla el cemento y agua, escarificando el firme inferior a una profundidad de 6 a 10". La base es compactada y curada usualmente con un sello o asfalto de mezcla en caliente.

Diseño y construcción

El procedimiento básico es simple. El proceso de reciclado completo puede ser terminado en un solo día y el tráfico local puede regresar casi de inmediato. El procedimiento incluye los siguientes pasos:

Diseño del espesor. El espesor del pavimento puede determinarse usando: "Diseño de espesores para pavimentos de suelo-cemento de la PCA" o la guía AASHTO para el diseño de estructuras de pavimento.

Procedimiento constructivo para el reciclado de pavimentos flexibles con cemento Portland con equipo convencional
1ª parte Preparativos

Paso

- 1 Escarificar y pulverizar el viejo material—capas base y bituminosa-
- 2 Prehumedecar el material preparado
- 3 Perfilar de manera aproximada lo que serán la corona y la rasante, es decir, darle forma al carril de tránsito

2ª parte Inicio del proceso

Paso

- 4 Esparcir el cemento Portland
- 5 Mezclar a fondo
- 6 Añadir agua, si es necesario. Para mejorar el contenido óptimo de humedad y remezclar
- 7 Compactar cuando menos al 95% estándar
- 8 Proceder al acabado
- 9 Y curar (con agua o riego asfáltico 0.90 l/m²)

3ª parte Aplicar una delgada capa de asfalto (2.5 – 5 cm) sobre la ya endurecida

Investigación del sitio. A priori a efectuar el reciclado, una investigación del sitio debe conducirnos a determinar ¿cuáles son las causas del deterioro del pavimento?, ¿de qué tamaño es su espesor? y ¿de qué tipo de material está compuesto?.

El sitio debe ser analizado para determinar las causas de la falla. Núcleos o muestras deben ser utilizados para determinar el espesor de las capas.

Evaluación del laboratorio. El muestreo del material del sitio debe ser pulverizado en el laboratorio para crear una mezcla de suelo-agregado muy similar al esperado por el proceso de reciclado. El procedimiento de diseño de las mezclas es el mismo que el desarrollado para el suelo-cemento. En referencia a la publicación E8052 de la PCA. Manual de laboratorio para suelo cemento. Este incluye la determinación del contenido óptimo de humedad y la máxima densidad seca. Si la resistencia a la compresión inconfiada se usa para determinar el contenido de cemento, la resistencia al 7º día debe ser entre 300 y 400 psi (2.1 a 2.8 MPa).

No todos los materiales son susceptibles de ser reciclados con cemento Portland, por ejemplo, si la carretera contiene una superficie bituminosa, el asfalto debe ser relativamente quebradizo. Pues, de no ser así, el material aún está "vivo", conservando su viscosidad y flexibilidad originales debiendo ser removido antes que ser incorporado a la mezcla. El viejo asfalto quebradizo cuando se pulveriza se convierte en una "grava negra" que se enlazará con el cemento una vez hidratado mientras que el material removido puede ser susceptible de ser reciclado en una nueva superficie de asfalto.

También resultan inconvenientes ciertos materiales de granulometría discontinua, tipo macadam, que necesitan el aporte previo de un corrector granulométrico (grava y/o arena) o el ajuste en la velocidad del rotor para su empleo. Cuidado especial merece el no incluir ciertas sustancias compuestas por materia orgánica, sulfuros (piritas), sulfatos (yeso) o cloruros que pueden obstruir e inhibir el proceso de fraguado del cemento.

Requisitos para llevar a cabo reciclaje en frío

Muchos tipos de pavimento en deterioro pueden ser rehabilitados por medio del reciclaje en frío, pero los agrietados de estructura firme, sólida y con base bien drenada son los más aptos. El proceso del reciclaje en frío destruye el patrón existente y produce una capa nueva, libre de fisuras, lista para una nueva superficie. Los pavimentos con menos posibilidad de ser corregidos a través de esta técnica y/o que además requieren de otro tratamiento son aquellos que presentan:

1. Fallas ocasionadas por la humedad, como bases y subbases de materiales inestables
2. Fallas ocasionadas por el peso o protuberancias en suelos subyacentes
3. Surcos provocados por altos contenidos de asfalto o agregado fino degradado
4. Los que exhiben el agregado del que está compuesto el asfalto.

Consideraciones previas

El objetivo de las operaciones constructivas es la mezcla de la capa asfáltica pulverizada y el material de la base con cemento y la humedad suficiente para adquirir la máxima compactación posible.

Conseguir un pulverizado adecuado garantiza larga vida a la obra. El tratamiento a capas relativamente delgadas no implica problemas pues el material siempre estará "listo" a ser escarificado.

Habitualmente se utilizan 15 cm de material reciclado, pero este grosor puede variar desde 10 hasta 30 cm dependiendo de los requisitos de la mezcla. Todo el material debe estar lo suficientemente pulverizado, las piezas más grandes no deben superar las 2" (50 mm) y que el 55% del total logre pasar la malla No.4. La capa bituminosa –entiéndase viejo material- incluido en la mezcla no debe exceder de un 50%. El equipo de construcción empleado para escarificar, romper y pulverizar las viejas capas incluyen fresadoras, escarificadores, máquinas moledoras, mezcladoras, discos lacerantes y varios tipos de rodillo. La dureza, espesor y tipo de superficie dictarán la elección del equipo para el trabajo específico.[7].



Recordemos que el objetivo del reciclaje en frío es producir un pavimento libre de fisuras, rejuvenecido y estructuralmente firme cuyo espesor entre los 50 y 100 mm (3 – 4 in) logre salvar el 50% o más del producto original, que en otros casos con la misma inversión como es el caso de capas recicladas en caliente, apenas se podrían recuperar 37 mm del espesor total.

Descripción del proceso

Las operaciones de mezcla y pulverización son realizadas por máquinas recicladoras de gran potencia (por arriba de 485 kW/650 Hp) como por ejemplo: Caterpillar RM 350, Wirtgen WR 2500, Hamm Raco 550, etc.

La profundidad del reciclaje profundo depende del espesor del pavimento existente, condiciones del suelo en la subrasante y el tráfico futuro esperado, pero éste oscila con frecuencia entre los 150 y 300 mm (6 – 12 in).

Para proyectos con secciones de mayor espesor (>200 mm) y una base capaz de soportar el equipo, el reciclaje profundo puede completarse con un tren de reciclaje en frío.

[7] López, Bob. Prusinski, Jan. Carreteras recicladas con cemento. Cement & Concrete Council of Texas PCA, E.U.A. 1998

Escarificación y pulverizado. Dependiendo del equipo disponible para construcción y el espesor del pavimento existente, la vía puede necesitar ser escarificada antes de ser pulverizada. La calidad del reciclaje profundo se desarrolla normalmente usando equipo especializado diseñado para este propósito. La profundidad del pulverizado normalmente es de 6 a 10" (150 a 300 mm), mientras que para caminos secundarios típicamente incluye el total de la superficie y base, más cierta parte de la subrasante. Para mejorar la gradación, más de una pasada puede ser necesaria –en equipos convencionales-. La distribución de las partículas debe tener un 100% menor de 2 in (50 mm) y el 55% pasar la malla No.4 como ya se mencionó.



Adicionalmente, muchas otras condiciones deben ser tomadas en cuenta antes de iniciar el reciclaje en frío:

- La presencia de pozos de visita o bocas de tormenta en el área a pavimentar
- Pendientes con un grado de inclinación mayor al 5%
- Extensas áreas con sombra que requieren prolongados tiempos de curado.

Aplicación del agua

El agua se adiciona para traer al suelo-agregado la mezcla óptima de contenido de humedad (contenido de agua a la máxima densidad seca ASTM D558) se añade al frente del pulverizador o en la cámara de mezclado o inyectada de manera directa en la cámara de la recicladora.



Componentes de la mezcla

Los tres diferentes tipos de material estabilizador más usados son –mecánicos, químicos y bituminosos-. Con la estabilización mecánica, el material granular, como pueden ser piedra triturada o grava, se adicionan para mejorar los materiales in situ. A pesar del beneficio y los bajos costos iniciales, **la estabilización mecánica quizá no sea** la opción con la mejor relación costo-beneficio, porque el incremento de la resistencia puede no ser suficiente a largo plazo.

Los aditivos usados para la estabilización química son el cemento Portland, cloruro de calcio, cal hidratada y ceniza volante de carbón.

Para bases y subbases de pobre o escasa condición, el éxito del reciclado en frío se consigue usando cemento Portland o ceniza volante del tipo C (auto-cementante) como agente estabilizador. Estos dos aditivos producen mezclas con resistencia a edad temprana mejorando aquellas capas subyacentes de material débil donde las mezclas con emulsión pudieran fallar antes de alcanzar la resistencia suficiente. Cuando las fallas en la base sólo representan una pequeña parte del proyecto, 10% o menos, quizá sea más económico localizarlas y repararlas a iniciar el reciclado en frío.

Es frecuente utilizar ceniza volante y escoria granular molida, en sustitución parcial del cemento Portland (en proporciones máximas a un 10%) por su capacidad para reaccionar con los productos del proceso de hidratación cemento/agua, lo cual ayuda a prolongar el periodo de generación de resistencia, advirtiendo que los efectos de estos materiales dependen de la temperatura y el tiempo.

La profundidad del mezclado debe ser cuidadosamente controlada para no alterar la cantidad de aditivo considerado de acuerdo al espesor a mejorar.

La ceniza volante generalmente se clasifica ya sea como tipo F o como tipo C. El tipo F resulta útil para alargar los periodos de generación de resistencia y para combatir los efectos perjudiciales de los sulfatos, pero no presenta propiedades cementantes. Los del tipo C por su parte contribuyen a reducir la demanda de agua, mejorar la trabajabilidad y aumentar la rapidez con que se adquiere la resistencia a largo plazo.

Para el cemento y la clase C "autocementante" de ceniza volante, la operación de mezclado debe ser completada tan pronto como sea posible, particularmente durante climas cálidos por secar y endurecer rápidamente.

Pequeñas cantidades de retardadores químicos pueden añadirse al mezclarse con el agua aumentando la trabajabilidad de la mezcla. Después de completarla, el material reciclado es rociado y perfilado aproximadamente a la profundidad, rasante y pendiente deseadas. Un retraso de estas operaciones podría producir una superficie inaceptable de baja densidad (áspera).

Para la estabilización bituminosa, emulsiones asfálticas son empleadas y de vez en cuando polímeros modificados. El betún espumado o también conocido como "asfalto expandido" forma parte del mismo grupo.

En Europa y Canadá, el cemento Portland y la emulsión asfáltica son usados en combinación para elaborar mezclas con mucho mayor resistencia a edad temprana e incrementar la resistencia contra daños ocasionados por el agua.

El cemento puede aplicarse en seco esparciéndolo por encima del pavimento reciclado, pero ahora los nuevos equipos son capaces de inyectarlo en forma de lechada e ir midiendo la cantidad suministrada durante el proceso de mezclado. Después de incorporar los aditivos, el pavimento reciclado es perfilado por una motoconformadora y compactado, mismo que puede completarse mediante una amplia variedad de rodillos.

Aditivos químicos o bituminosos normalmente empleados para llevar a cabo el reciclaje profundo:

-CaO o ceniza volante, puede aplicarse a la superficie en cantidad específica usando un "esparcidor" químico calibrado.

-Ca(OH)₂ y cemento han sido aplicados en seco, pero provocan problemas de polvo. Ahora se adicionan en forma de lechada (cal-agua mezclando del 30 al 40% de los sólidos).

-Tanto la emulsión asfáltica como el betún espumado se adicionan dentro de la cámara de mezclado de la recicladora.

Optar por el uso de polvo de ceniza para secar materiales muy húmedos e incorporar cal, provoca una reacción inmediata que podría mejorar sustancialmente ciertas características geotécnicas.

Perfilado

El material pulverizado es perfilado a la sección deseada y rasante. Esto podría involucrar trabajo en tierra adicional en orden de mejorar el camino. La elevación de la base final puede requerir una pequeña cantidad de material removido o su adición.



Compactación

La adecuada compactación del material reciclado es muy importante en las obras de reciclaje profundo. Mejorar la densidad y un acabado final aceptable se consiguen al utilizar el equipo adecuado de rodillos:

Para la ruptura inicial; un vibrador pata de cabra o vibrador sencillo o un tandem de tambor liso

Para compactación intermedia; rodillos de llantas neumáticas.

Para el acabado final, un tandem estático de acero o un tandem vibrador.



La mezcla se compacta hasta alcanzar el 96% de la densidad requerida por la prueba Proctor Standard (ASTM D558). La compactación se realiza normalmente con un rodillo liso-neumático-vibratorio. Seguido de un rodillo neumático para terminar la superficie. La compactación final debe tomar no más de 3 hrs desde la pasada inicial de la mezcla con cemento. La densidad en campo y el contenido de humedad son monitoreados con propósitos de calidad.

De nuevo, para el cemento o la ceniza volante, las operaciones de compactado deben hacerse rápidamente – usualmente este proceso debe completarse dentro de las 2 horas posteriores a la mezcla-. Con las emulsiones asfálticas sin embargo, la demora es necesaria para permitir que la emulsión reaccione –cambiando de un tono café a un color negro- el tiempo de espera dependerá de la profundidad, el tipo de emulsión, la mezcla del total del contenido líquido –emulsión más agua- y de las condiciones del clima, temperatura, humedad, nubosidad y viento. Cualquier tipo de rodillo que ocasione fisuras o severos desplazamientos deber ser inmediatamente reemplazado. Algunas veces, el problema se localiza en áreas de humedad y subrasantes débiles que deben ser corregidas drenando o estabilizando con cemento, cal o ceniza.

Limitaciones del clima

El reciclaje profundo no debe completarse si está chispeando o lloviendo intermitentemente ya que la lluvia provoca el lavado de la emulsión asfáltica o la reacción química de los agentes estabilizadores secos rociados sobre la superficie, lo que provoca una reducción de la resistencia del material. También, resulta inconveniente trabajar ante la presencia de bancos de niebla o condiciones de humedad muy altos ya que el curado es pobre.

La temperatura ambiente normalmente recomendada para un reciclaje en frío con emulsiones oscila entre los 10 y los 16°C. no permitiéndose trabajar durante lluvia y/o niebla presenta mientras que para cemento Pórtland la temperatura mínima requerida es de 4°C.

Curado

El material reciclado necesita ser adecuadamente curado para desarrollar una buena resistencia. Con el cemento, el procedimiento de curado requerido debe prevenir fisuras por contracción. Los 2 tipos de curado más comúnmente usados son: humedeciendo el sitio con agua y sellando con asfalto formando una membrana. La aplicación de este riego de impregnación debe ocurrir lo más pronto posible para asegurar que la humedad selle por dentro al interior de la base.

La superficie se mantiene húmeda periódicamente aplicando agua a la misma con un camión sistema, para estar seguro de que no llegue a secarse. Esto se realiza constantemente a través de periodos de curado hasta que la base pueda soportar tráfico sin deformación..

Un rodillo ligero con llantas neumáticas puede usarse para mantener compacta la superficie. Cuando el tráfico lo permite antes de colocarlo sobre la superficie, el sellado/curado con asfalto puede necesitar un poco de arena para prevenir el acelere de vehiculos.

El paso final es colocar la nueva superficie de asfalto. No se admiten camiones pesados o equipo de construcción durante el curado previniendo un daño estructural a la base como pueden ser fisuras por flexión.

Los preparativos de la base estabilizada antes de la capa de asfalto incluyen: el barrido con escobas autopropulsadas. Para bases estabilizadas con emulsión se les acostumbra diluir lentamente asegurando el buen enlace con la sobrecapa de la mezcla en caliente o en frío. Para la estabilización química, un curado con asfalto quizá resulte suficiente.



Superficie pavimentada

La nueva superficie pavimentada consiste generalmente de una mezcla de asfalto en caliente.

Control de calidad

Reciclaje con cemento sigue el procedimiento básico usado para operaciones normales de suelo-cemento. El éxito del reciclaje depende en buena medida del cuidado de los siguientes factores: adecuada pulverización, contenido óptimo de cemento y de humedad, adecuada densidad y curado apropiado.

Ventajas del reciclaje profundo con cemento

El proceso de reciclado profundo con cemento rehabilita pavimentos de asfalto muy gastados (inservibles) donde la vieja capa de asfalto y el material base se pulverizan, se mezclan con agua y cemento y se compactan para producir una superficie resistente y duradera. No habiendo necesidad de acarrear agregado, ni deshacerse del antiguo material existiendo un pequeño o nulo desperdicio.

El ¿porqué de elegir el reciclaje profundo?

Conservar los materiales vírgenes de construcción a través del reciclaje con cemento es una estrategia económica e inteligente. Frecuentemente, otros agregados provienen de canteras distantes a gran costo o de fuentes locales ofreciendo sólo calidad marginada. El agotamiento de las mismas para reconstruir caminos existentes sólo propaga y acelera el problema. Adicionalmente, si el viejo asfalto y el material base no son reciclados, deben ser desechados o acopiado de materias primas, incrementando los costos de transporte.

Ventajas y beneficios del reciclaje profundo

1. La estructura del pavimento puede mejorar significativamente sin cambiar la geometría del mismo y/o reconstruirlo.
2. El reciclaje profundo restaura el viejo pavimento al perfil deseado, eliminando el ahuecamiento existente, restaurando la corona y la pendiente y eliminando baches, irregularidades y áreas ásperas. Operaciones de ensanchado también forman parte del proceso.
3. El reciclaje profundo acaba con la piel de cocodrilo y otro tipo de fisuras transversales y longitudinales.
4. Los costos de producción disminuyen. Sólo una sobrecapa delgada o sello ligero en la superficie se requieren en la mayor parte de los proyectos.
5. Materiales y energía se conservan, mientras que problemas de calidad del aire resultantes de polvo, vapores y humo son eliminados. No se requiere acarrear el material. El proceso es ambientalmente deseable porque la disposición del problema se anula.

Como el reciclaje en frío se realiza "in situ" se ahorra energía, se eliminan la manipulación de otros materiales o se reducen grandemente. No se requiere calentar por tratarse de un proceso en frío. Hay menos contaminación del aire por que sencillamente no hay que calentar absolutamente nada.

El reciclaje en frío conserva el material existente, los materiales -piedra y asfalto- son reutilizados conservando los recursos que de por sí, son limitados.

6. El reciclaje con cemento hace de la reconstrucción de viejos caminos un proceso autosustentable.

Ventajas del reciclaje en frío

La tabla siguiente expone algunas de las ventajas ofrecidas por la técnica del reciclaje en frío en contraste con el método convencional obtenido en planta.

| Aspecto a considerar | Técnica de reciclaje en frío | Método convencional efectuado en planta | Motivo o razón del inconveniente |
|---|------------------------------|---|--|
| Uniformidad de la mezcla | Excelente | Variable | |
| Control exacto del espesor de la capa reciclada | Si | No | Las variaciones que pudieran existir están en función y tipo de maquinaria empleada para ello, así como de la fluidez alcanzada por el agente incorporado. |
| Control preciso de humedad | Si | No | El contenido de humedad y la adición de agentes estabilizadores es subjetiva |
| Demora/retraso entre las operaciones de mezclado y compactado | Breve | Larga | Para dar inicio al compactado bajo el método convencional es indispensable que el total de la superficie haya sido procesada, lo cual puede ocurrir mucho tiempo después |
| Reuso del material "in situ" | 100% reciclado | Con pérdida | Todo volumen de cualquier material que no cumpla con las dimensiones que señala el proyecto, deberá ser sustituido |
| Vulnerable ante cambios del clima | Si | No | |
| Problemas de inestabilidad en la subrasante | No | Si | Son frecuentes las fallas que son tratadas por medio de la remoción y reemplazo con material importado a consecuencia de las múltiples pasadas de la que es objeto la subrasante |
| Profundidad alcanzada | >300 mm | 150 mm | |

En resumen, podríamos agrupar las ventajas del reciclaje en frío en cuatro grandes categorías, ordenadas conforme a su grado de importancia:

1. Mayor calidad del producto final
2. Menor tiempo de construcción
3. Bajo costo de rehabilitación y
4. Mejores condiciones en cuanto a tráfico

4.3 Procedimientos de Investigación para diferentes categorías de reciclaje

Como sucede en casi todos los proyectos, no es común utilizar todos los métodos expuestos para caracterizar la magnitud del deterioro del pavimento más bien su elección debe adecuarse en términos de la categoría de reciclaje a tratar. Como a continuación se expone:

| Método de investigación | Reciclaje superficial o de capas delgadas | Mejoramiento de vías no pavimentadas | Reciclaje Profundo |
|--|--|---|--------------------|
| Inspección visual | Si | Si | Si |
| Apiques y toma de muestras para ensayos de laboratorio | Sólo hasta la profundidad propuesta para el reciclaje | Sólo muestreo de grava para determinar su calidad | Si |
| Extracción de núcleos | Sólo para verificar el espesor de las capas asfálticas | No | Si |
| Ensayos con el Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP) | No | Si | Si |
| Medidas de la profundidad de ahuellamiento | Si | No | Si |
| Medidas de deflexiones | No | No | Si |

4.4 Diseño de mezclas

Formular un diseño, supone cumplir/cubrir una buena parte de la solicitud del material a reciclar, es decir, es un modo de resolver el problema. Parte del proceso consiste en evaluar toda la información posible, más aún si éstos son el resultado de muestras representativas preparadas y ensayadas en laboratorio.

En general, el diseño de mezclas obedece a lo siguiente:

Paso 1 Selección Inicial del tipo de agente estabilizador, considerando:

El costo de cada uno de ellos

Disponibilidad, en pos de garantizar el volumen diario suficiente, el suministro del producto deberá ser consistente, en la cantidad y calidad indicadas y despachados de manera oportuna

Con base en los resultados que arroje el laboratorio es como deberá elegirse el agente más adecuado

Las propiedades requeridas, justifican su inclusión en el diseño

Paso 2 En términos de la cantidad óptima de fluidos de compactación es como se van incorporando tanto el agua

Como el agente estabilizador seleccionando procurando elaborar cuando menos 4 mezclas con diferentes contenidos

Paso 3 Con estricto apego a estándares se fabrican las probetas

Paso 4 Se curan

Paso 5 Se ensayan, determinando así sus propiedades

Paso 6 Evaluar si conviene o no continuar utilizando un solo agente estabilizador o es preferible la combinación entre ellos (ver paso 1 nuevamente)

4.5 Enfoques para el diseño de pavimentos

Al dar inicio este capítulo se hizo hincapié de cuán importante resulta contar con información confiable en pos de comprender de una mejor manera el comportamiento del pavimento. Cuando no todo lo encontrado durante la etapa de investigación con ayuda de métodos empíricos y/o semiempíricos concuerda o es insuficiente para identificar las causas de la falla es necesario completar los trabajos con otra clase de métodos de diseño y/o modelos de respuesta mucho más complejos pero de mayor confiabilidad.

Comencemos por los desarrollados por el Instituto del Asfalto y el TRRL (Transportation Road Research Laboratory) de los E.U.A.

Estos se basan en el análisis de la respuesta ante la carga sufrida por el firme, dicha respuesta no es otra cosa que una deformación a la que suele llamársele *cuenca de deflexiones*. El procedimiento supone para esta primera condición un cierto módulo elástico que se ira comparando y ajustando de forma iterada contra otros módulos de cada capa que vayan resultando de las repeticiones de las cargas de tráfico (propuesta del Instituto del Asfalto) o el tráfico acumulado (propuesta del TRRL) hasta el instante en que ambos valores sean el mismo.

Cuando se estudian pavimentos en los que se considera el reciclaje como una medida de rehabilitación, esta alternativa localiza las zonas de debilidad correlacionando las deflexiones de la superficie con la profundidad del ahueamiento. Para ambos métodos, el ahueamiento acusa su condición más crítica de llegar a los 10 mm.

Métodos de análisis mecánicos o racionales de diseño

De entre los métodos con mayor aceptación en materia de firmes semirrígidos, están los modelos de respuesta elástico lineales de capas múltiples desarrollados por Burmister, utilizados para determinar la capacidad estructural del pavimento en términos de las deflexiones, esfuerzos y deformaciones de cada capa. Bajo la siguientes hipótesis:

- Se trata de un firme compuesto por capas horizontales, paralelas entre sí, de espesor constante, indefinidas en su plano, apoyadas en un espacio semiinfinito de Boussinesq.
- Todos los materiales se consideran linealmente elásticos, homogéneos e isotrópicos, en un medio continuo.
- Caracterizados por su módulo de elasticidad E y el coeficiente de Poisson, mismos que servirán como datos de entrada para alimentar al programa.

- Son despreciables tanto los efectos térmicos y las fuerzas de inercia como los esfuerzos cortantes resultantes (provocados) del contacto entre rueda y pavimento.

El cálculo numérico lo lleva a cabo un software especializado (por ejemplo Alizé, Bisar, Chev, Circly [8], Elsym 5, Nstress, Welsea, etc) capaz de identificar aquellos puntos críticos donde las tensiones y deformaciones alcanzan su valor máximo, los que a menudo corresponden a las interfaces. Otras opciones de análisis como son los modelos elástico no lineales y los elasto-plásticos también forman parte de esta clase de métodos. Con toda esta información y comprendidas las causas y el nivel del deterioro que presenta el pavimento, el siguiente paso es, determinar el espesor del reciclado.

4.6 Dimensionamiento de la rehabilitación de un firme existente reciclado in situ con cemento

Dimensionar significa, proponer el tamaño del espesor a reciclar así como el espesor total de la mezcla bituminosa de refuerzo que podría llevar un firme en caso de adoptarse este tipo de rehabilitación como medida correctiva.

En especial, la propuesta que utiliza cemento Pórtland como agente estabilizador resuelve satisfactoriamente aquellos problemas relacionados con elevadas deflexiones aclarando que su cálculo no depende de las mismas, ni del mal estado que guarda la carretera sino de los resultados obtenidos a través de los modelos de respuesta de sistemas multicapa (tensiones, deformaciones y desplazamientos provocados por las cargas del tráfico, que suponen un valor teórico del módulo elástico E y del coeficiente de Poisson ν tanto de la capa reciclada como de la que no lo está). A los valores críticos resultantes se les compara contra los límites admisibles en cada caso evaluando así el número de aplicaciones de la carga tipo que será capaz de soportar la sección hasta su deterioro. El dimensionamiento será correcto sólo si este valor supera aunque sea por un margen muy escaso al número de ejes o tráfico equivalente que se ha proyectado circule para ese periodo de diseño. En caso de no ser así, habrán de corregirse los espesores de las capas o bien, sus propias características.

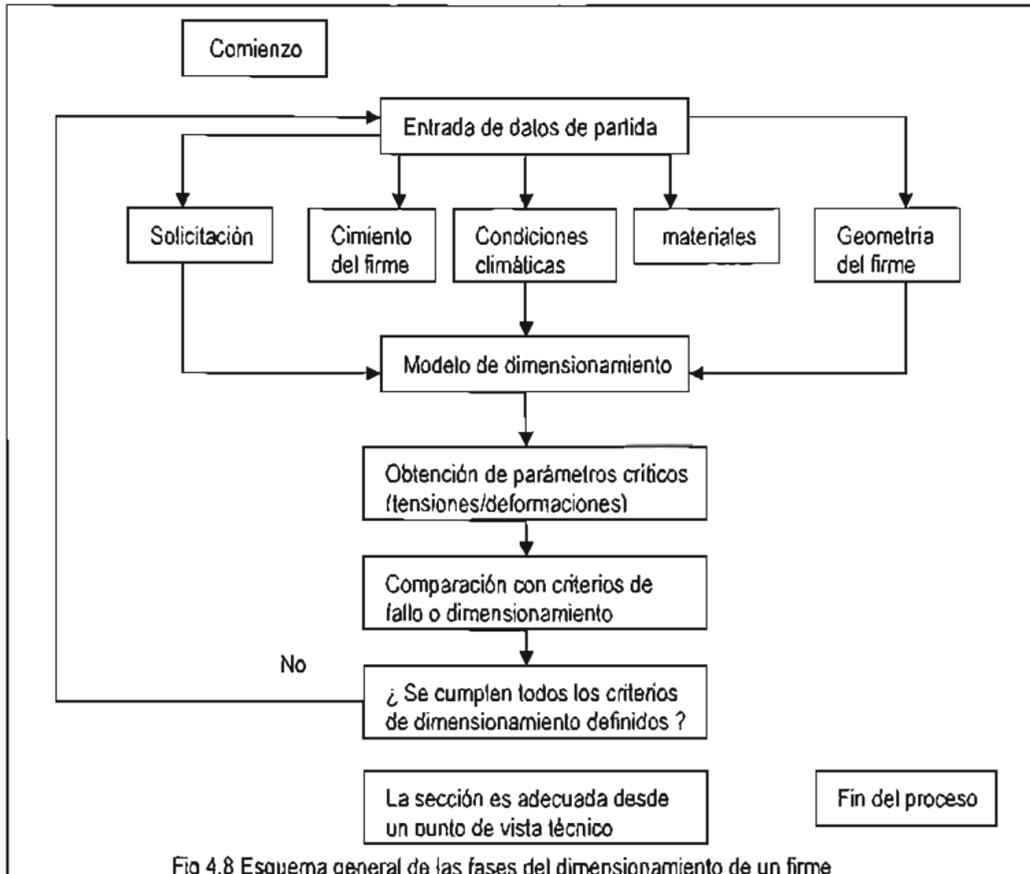


Fig 4.8 Esquema general de las fases del dimensionamiento de un firme

[8] <http://www.mincad.com.au/circly5demos/circly5demos.htm>

Una de las cualidades por las que se distingue el cemento y que lo convierte en una opción interesante desde el punto de vista estructural es su gran capacidad para repartir la carga. Como las capas de material tratadas con cemento trabajan a flexión, como si tratara de una losa, las tensiones y deflexiones provocadas por la acción de los vehículos son reducidas, permitiendo al mismo tiempo disminuir el espesor del firme y aumentar su vida de servicio. Por esta razón, el dimensionamiento de un pavimento cualesquiera reciclado a base de cemento dependerá única y exclusivamente del tipo de tráfico que se haya previsto en términos del periodo de diseño elegido por la autoridad, el número de vehículos pesados por día, la tasa de crecimiento del tráfico compuesto, el número de Ejes Equivalentes de 80 kN considerados así como el espesor y contenido de betún de las capas de mezcla bituminosa antes presentes y de las propiedades de la capa granular de base, como lo ilustra el siguiente ejemplo:



Información del tráfico:

Periodo de diseño (años): 15 años
Número de vehículos pesados por día: 1000

Número de Ejes Equivalentes de 80 kN: 4.4
Tasa de crecimiento del tráfico (% compuesto): 2

| Clasificación | Tráfico de diseño 80kN x 10 |
|---------------|-----------------------------|
| T1 | 0.3 a 1 |
| T2 | 1 a 3 |
| T3 | 3 a 10 |
| T4 | 10 a 30 |
| T5 | 30 a 100 |

Con ayuda de la tabla 4.2 se infiere que el tráfico de diseño resultante es de 28.33×10 E.E, lo que clasifica a este tipo de tráfico de acuerdo con la tabla 4.1 como T4 - tráfico pesado -. Finalizando con la selección de alguna de las alternativas que el catálogo de estructuras típicas ofrece para capas recicladas con cemento. Ver Fig 4.8.

De inicio se sugiere una profundidad de tratamiento de 20 a 30 cm, en correspondencia con la categoría de tráfico pesado, mientras que para carreteras con tráfico ligero el mínimo recomendable es de 20 cm. Por debajo de ese valor, el espesor podría ser la causa de un rápido deterioro del firme.

Vale la pena aclarar que las estructuras mostradas sólo sirven como guía orientando el diseño pero no necesariamente son la opción más adecuada puesto que cada proyecto es distinto. Recordemos también que con esta técnica no es difícil alcanzar resistencias cuando menos similares a las de un suelocemento y en el mejor de los casos, próximos a las de una gravacemento. Conviene entonces, auxiliarse de un análisis de sensibilidad que englobe aquellas situaciones no previstas que pudieran escapar a lo considerado hasta este instante:

- Posibles heterogeneidades en las capas inferiores,
- Falta de adherencia entre ellas
- Defectos en algún espesor
- Menor resistencia en cierta(s) capa(s), etc,

Conforme a lo previsto, ahora sólo resta afinar algunos detalles relacionados con la sección transversal del pavimento considerando que habrá diferentes espesores dependiendo de:

- El tráfico que circule por cada uno de los carriles
- Su diseño geométrico: trazado, sobreeanchos, miradores, retornos, etc.
- Las diferencias de pendientes entre la rasante y la superficie de rodamiento.

| Núm de vehículo pesados por día | Crecimiento tráfico compuesto (%) | Periodo de diseño (años) | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|---|-------|--------|--------|
| | | 5 | | | | 10 | | | | 15 | | | | |
| | | Factor de carga del vehículo (E.E a 80 kN por vehículo pesado) | | | | | | | | | | | | |
| | | 0.6 | 2 | 3.5 | 4.4 | 0.6 | 2 | 3.5 | 4.4 | 0.6 | 2 | 3.5 | 4.4 | |
| 10 | 2 | | | | | | | | | | | | 0.28 | |
| | 4 | | | | | | | | | | | 0.27 | 0.33 | |
| | 6 | | | | | | | | | | | 0.32 | 0.40 | |
| | 8 | | | | | | | | | | | 0.37 | 0.47 | |
| 20 | 2 | | | | | | | 0.29 | 0.36 | | | 0.26 | 0.45 | 0.57 |
| | 4 | | | | | | | 0.32 | 0.40 | | | 0.30 | 0.53 | 0.67 |
| | 6 | | | | | | | 0.36 | 0.45 | | | 0.36 | 0.63 | 0.79 |
| | 8 | | | | | | | 0.40 | 0.50 | | | 0.43 | 0.75 | 0.94 |
| 50 | 2 | | | 0.34 | 0.43 | | 0.41 | 0.71 | 0.90 | | | 0.64 | 1.13 | 1.42 |
| | 4 | | | 0.36 | 0.45 | | 0.46 | 0.80 | 1.00 | | | 0.76 | 1.33 | 1.67 |
| | 6 | | | 0.38 | 0.48 | | 0.51 | 0.89 | 1.12 | 0.27 | | 0.90 | 1.58 | 1.98 |
| | 8 | | | 0.40 | 0.51 | | 0.57 | 1.00 | 1.26 | 0.32 | | 1.07 | 1.87 | 2.35 |
| 100 | 2 | | 0.39 | 0.68 | 0.85 | | 0.82 | 1.43 | 1.79 | 0.39 | | 1.29 | 2.25 | 2.83 |
| | 4 | | 0.41 | 0.72 | 0.90 | 0.27 | 0.91 | 1.60 | 2.01 | 0.46 | | 1.52 | 2.66 | 3.34 |
| | 6 | | 0.44 | 0.76 | 0.96 | 0.31 | 1.02 | 1.78 | 2.24 | 0.54 | | 1.80 | 3.15 | 3.96 |
| | 8 | | 0.46 | 0.81 | 1.02 | 0.34 | 1.14 | 2.00 | 2.51 | 0.64 | | 2.14 | 3.75 | 4.71 |
| 500 | 2 | 0.58 | 1.94 | 3.39 | 4.26 | 1.22 | 4.08 | 7.13 | 8.97 | 1.93 | | 6.44 | 11.27 | 14.16 |
| | 4 | 0.62 | 2.06 | 3.60 | 4.52 | 1.37 | 4.56 | 7.98 | 10.03 | 2.28 | | 7.60 | 13.30 | 16.72 |
| | 6 | 0.65 | 2.18 | 3.82 | 4.80 | 1.53 | 5.10 | 8.92 | 11.22 | 2.70 | | 9.01 | 15.76 | 19.81 |
| | 8 | 0.69 | 2.31 | 4.05 | 5.09 | 1.71 | 5.71 | 9.99 | 12.56 | 3.21 | | 10.70 | 18.73 | 23.55 |
| 1000 | 2 | 1.16 | 3.87 | 6.78 | 8.52 | 2.45 | 8.15 | 14.27 | 17.94 | 3.86 | | 12.88 | 22.53 | 28.33 |
| | 4 | 1.23 | 4.11 | 7.20 | 9.05 | 2.73 | 9.12 | 15.95 | 20.05 | 4.56 | | 15.20 | 26.60 | 33.44 |
| | 6 | 1.31 | 4.36 | 7.63 | 9.60 | 3.06 | 10.20 | 17.85 | 22.44 | 5.40 | | 18.01 | 31.52 | 39.62 |
| | 8 | 1.39 | 4.63 | 8.09 | 10.18 | 3.43 | 11.42 | 19.99 | 25.13 | 6.42 | | 21.41 | 37.46 | 47.09 |
| 3000 | 2 | 3.49 | 11.62 | 20.34 | 25.57 | 7.34 | 24.46 | 42.80 | 53.81 | 11.59 | | 38.63 | 67.60 | 84.99 |
| | 4 | 3.70 | 12.34 | 21.59 | 27.14 | 8.20 | 27.35 | 47.85 | 60.16 | 13.68 | | 45.61 | 79.81 | 100.33 |
| | 6 | 3.93 | 13.09 | 22.90 | 28.79 | 9.18 | 30.60 | 53.55 | 67.32 | 16.21 | | 54.03 | 94.56 | 118.87 |
| | 8 | 4.16 | 13.88 | 24.28 | 30.53 | 10.28 | 34.26 | 59.96 | 75.38 | 19.27 | | 64.22 | 112.39 | 141.28 |
| 5000 | 2 | 5.81 | 19.37 | 33.91 | 42.62 | 12.23 | 40.77 | 71.34 | 89.68 | 19.32 | | 64.38 | 112.67 | 141.64 |
| | 4 | 6.17 | 20.56 | 35.98 | 45.23 | 13.67 | 45.58 | 79.76 | 100.27 | 22.80 | | 76.01 | 133.02 | |
| | 6 | 6.54 | 21.81 | 38.17 | 47.98 | 15.30 | 51.00 | 89.24 | 112.19 | 27.02 | | 90.05 | | |
| | 8 | 6.94 | 23.13 | 40.47 | 50.88 | 17.13 | 57.11 | 99.94 | 125.63 | 32.11 | | 107.0 | | |
| | | Convenciones: < 0.25 x 10 E.E > 250 x 10 E.E | | | | | | | | | | | | |

Tabla 4.1 Estimación del tráfico de diseño (E.E x 10)

| | | | | | | |
|--|---|---------|-------|--------|---------|----------|
| <p>Leyendas</p> <p>Tratamiento superficial</p> <p>Rodadura asfáltica</p> <p>Base asfáltica</p> <p>Reciclaje con cemento</p> <p>Subrasante</p> <p>Todos los espesores de las capas se muestran en mm</p> | <p>Tipo de tráfico</p> <p>Rango del tráfico de diseño E.E. 80 kN x 10</p> | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 |
| | | 0.3 - 1 | 1 - 3 | 3 - 10 | 10 - 30 | 30 - 100 |
| | Capa reciclada | | | | | |

Fig 4.9 Catálogo de estructuras típicas de pavimentos reciclados

5.1 Generalidades

La puesta en marcha de los trabajos relacionados con el reciclaje es un asunto que requiere de toda la atención posible para lograr su correcto desempeño. El éxito de la operación dependerá del cumplimiento de las siguientes consideraciones básicas de nuestro diseño:

1. El espesor previsto de la capa reciclada y
2. La calidad de los materiales que la integran

Su ejecución y rendimiento obtenidos son a la vez producto del tipo de equipo(s) seleccionado(s) para rehabilitar la vía. Explotar sus características y aprovechar todo el potencial del que son capaces asegura la obtención del máximo beneficio, por tanto el ingeniero responsable supervisará que:

1. Todos y cada uno de los conceptos descritos en el proyecto sean cubiertos
2. Planeando en tiempo y forma **el suministro** de la(s) materia(s) prima(s) llámese agentes estabilizadores, agua o algún tipo de corrector granulométrico.
3. Garantizando que los equipos reciban **el mantenimiento** adecuado que les permita estar disponibles en todo momento.
4. Previendo quizá **la adquisición y reemplazo** de/por nuevas piezas (refacciones como por ejemplo la sustitución de picas)
5. Identificando y removiendo cualquier tipo de obstáculo que pudiera entorpecer el accionar del tren de reciclaje
6. Dejando en claro al personal a cargo, **el objetivo** de cada una de las etapas que componen el reciclaje in situ y qué resultado se espera obtener.

A lo largo del capítulo profundizaremos un poco más en aquellos puntos que de alguna manera generen impacto durante la ejecución de las obras.

5.2 Planeación para el reciclaje

Antes de iniciar cualquier clase de trabajos, es necesario programar con sumo cuidado cada una de las actividades a realizar durante la jornada, esto con el fin de no tener que echar mano de las holguras que supuso **el análisis de la ruta crítica** solicitado previamente en el proyecto. Los aspectos a considerar son:

Tipo de máquina recicladora. La selección del tipo de máquina determina **la tasa de producción, el ancho y la profundidad de ataque (corte)** máximos que pueden reciclarse por pasada, así como la necesidad de contar o no con una motoniveladora que profile la superficie final.

Geometría de la vía Define el número de pasadas o bandas de trabajo que hay que dar para completar la sección o calzada, así como su longitud evitando la formación de juntas frías entre cortes adyacentes. Por ese motivo las bandas de trabajo no deben exceder a los 500 m.

El factor tráfico A menudo suele desviarse con bandas de paso alternas o prescribiendo límites a las horas de trabajo, para **interrumpir lo menos posible** que circulen por el lugar de los trabajos.

Objetivo de la producción Terminar cuando menos una sección, ya sea a lo ancho o sólo en la mitad de éste; es decir, **evitar que medias calzadas sean abiertas al tráfico**, pues de no ser así habrá serios problemas con las juntas y la confusión de los conductores que manejen por el sitio a lo largo de la noche.

Requisitos del producto terminado A priori a dar comienzo, debe quedar claro que tipo de propiedades interesa conseguir en cuanto a compactación, textura, resistencia y espesor para cada una de las capas que integran el producto final (**tolerancias máximas y mínimas**).

Relacionadas con el material Ante cambios bruscos en el espesor de los mismos, habrá retrasos significativos en su velocidad de avance complicando la dosificación del tipo de agente estabilizador, agua, etc.

Comportamiento del material reciclado con cemento Es importante señalar, que a **temperaturas elevadas** es conveniente **agregar un retardador de fraguado**, esto con el fin de evitar se reduzca el plazo de manejabilidad o en caso contrario, de presentarse temperaturas iguales o menores a los 5°C abstenerse de reciclar.

Requisitos de pre-reciclado

- Remoción de obstrucciones; como tapas de atarjeas, bocas de tormenta
- Instalación de nuevos sumideros o cualquier otro tipo de drenaje adicional
- Fresado/Escarificado al nivel prescrito
- Importación, acarreo y colocación de nuevo material sobre la superficie existente (sólo de haber sido previsto)

Operaciones auxiliares Son aquellas que obligan a detener el proceso de reciclado como son el suministro del cemento en los equipos, agua y demás aditivos o incluso el cambio de alguna refacción.

5.3 Acomodo del tráfico

Uno de los aspectos con mayor impacto al planear cómo se deben ejecutar los trabajos de rehabilitación es el relacionado a la seguridad del público que transitará a lo largo del día (24 hrs).

Como el proceso de recuperación se realiza en una sola pasada y de manera unidireccional, no es necesario bloquear todo el ancho de la calzada, sólo la porción que ocupará el propio tren de reciclaje. Lo que permite a los usuarios disfrutar cuando menos de la mitad de la vía –carril adyacente al invadido- sin que se interumpa la circulación habitual.

Con el auxilio de señales sencillas, avisos temporales de alerta en ambos lados de la sección reciclada, luces, fantasmas, caramelos y conos de buen tamaño colocados a cada 20 m, es como suele desviarse el tráfico previsto, en lo que concluyen las obras y perduran las molestias.

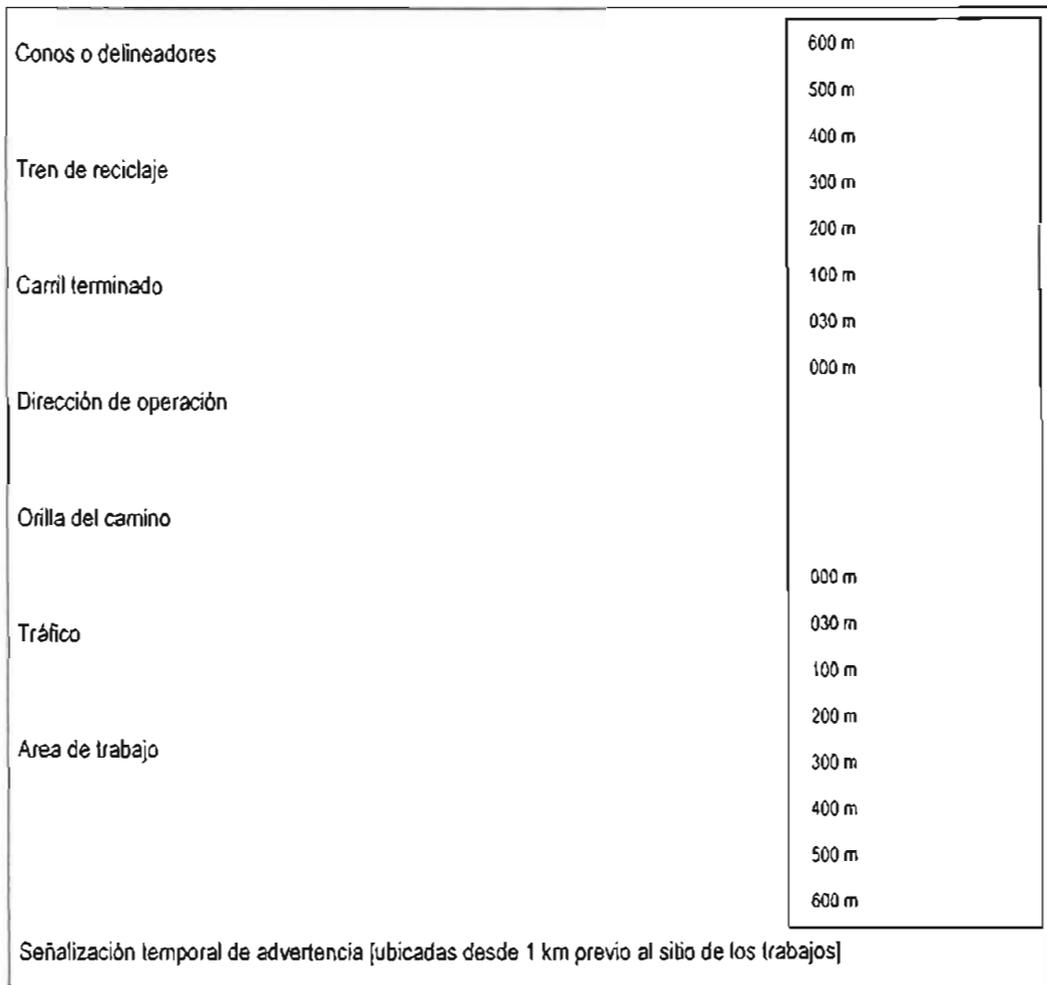


Fig 5.1 Acomodo usual del tráfico y señalización requerida cuando se lleva a cabo reciclado in situ

5.4 Trabajos preliminares

Son todas aquellas actividades que favorecen el libre tránsito de la recicladora sin que ésta sufra de interrupciones, en beneficio de un producto exento de discontinuidades y por ende de áreas potenciales de falla.

5.4.1 Conformación de la vía existente previo al reciclaje

Las correcciones sobre la forma de las secciones longitudinal y transversal comprenden modificaciones que van desde la sobreelevación de la superficie hasta las relacionadas con fallas profundas y el ahuecamiento. Atenuar pendientes, desaparecer irregularidades (tales como depresiones y montículos), incorporar nuevo material y cualquier otra operación que signifique un cambio en la apariencia e integridad geométrica de las capas a reciclar son parte de los preparativos.

5.4.2 Importación de nuevo material

Cuando los asentamientos son demasiado pronunciados superando incluso los del espesor de la capa reciclada es conveniente que el mal estado que observa la superficie se corrija mediante la adición y extendido de nuevo material sobre la capa existente sin que se formen cuñas o lentes de material no tratado.

Una razón más para su empleo tiene que ver con incorporar al material que va a ser degradado ciertos tamaños de partículas de las que adolecen regularmente las capas asfálticas como aquellas que corresponden a la fracción fina (material que pasa la malla de 0.075 mm) o quizá simplemente para garantizar que el espesor sea suficiente sin que esto afecte la estructura de soporte.

5.5 Juntas y traslapes

Tras el diseño adecuado de un plan de trabajo diario y teniendo claros los objetivos de producción, el siguiente paso consiste en determinar cuál será la secuencia y la dirección de avance del tren de reciclaje dentro de la zona demarcada, cerrada al tráfico. El cálculo tanto del número de pasadas mínimo necesario para completar el total de la superficie a rehabilitar así como el ancho del traslape provocado entre cortes adyacentes, resultado de las juntas longitudinal y transversal, se pueden estimar con el siguiente procedimiento:

Paso 1. Calcular N_p

Paso 2. Calcular W_o

Paso 3. Si W_o es menor que el ancho mínimo de traslape propuesto, incrementar en "1" el valor de N_p y repetir de Nuevo el cálculo desde el paso 1.

Donde:

W_r = ancho de la vía W_d = ancho del tambor fresador N_p = Número de pasadas requeridas para cubrir el área total
 W_o = ancho del traslape(constante)

Ejemplo:

Ancho de vía $W_r = 9500$

Ancho del tambor $W_d = 2500$

Ancho mínimo de traslape permitido: 150 mm

Paso 1 $N_p = W_r/W_d = 9500/2500 = 3.8$

Paso 1' Incrementar al número inmediato superior el resultado anterior, es decir a 4

Paso 2 $W_o = W_d - (W_r - W_d) / (N_p - 1)$

$$W_o = 2500 - [(9500 - 2500) / (4 - 1)] = 166.66 \text{ mm}$$

Paso 3 $W_o = 166.66 > 150 \text{ mm}$

Paso 4 Se requiere de un total de 4 cortes para completar la superficie, con un ancho de traslape constante de:
 166.66 mm

A fin de garantizar continuidad entre corte y corte y no dejar materiales sin mezclar es frecuente considerar un traslape del orden de 100 a 150 mm, valor que también es función del espesor de las capas, lo grueso del material y el tipo de agente estabilizador que vaya a ocuparse. Puesto que el ancho efectivo del tambor fresador con que cuentan la mayoría de los equipos es, menor al del camino; tan sólo, para el primer corte se reciclará el 100% del material virgen, disminuyendo en los cortes subsecuentes de acuerdo a lo previsto por el cálculo inicial.

Desde el punto de vista operativo esto no deber significar problema alguno para quien se encarga del manejo de la recicladora pues acostumbrado a guiarse sobre la superficie mediante marcas de pintura o el tendido de una cuerda (reventón) evita generar franjas de material no reciclado. No obstante, como en cualquier plan de producción, existe un respaldo logístico capaz de resolver hasta la más mínima duda relacionada con: la secuencia de los cortes, el número de los mismos, su profundidad y dirección de avance. En general suele dibujarse un esquema visto en planta aclarando el sitio de inicio y fin de los trabajos y/o ciertos verticales que adviertan algún detalle constructivo a considerar.

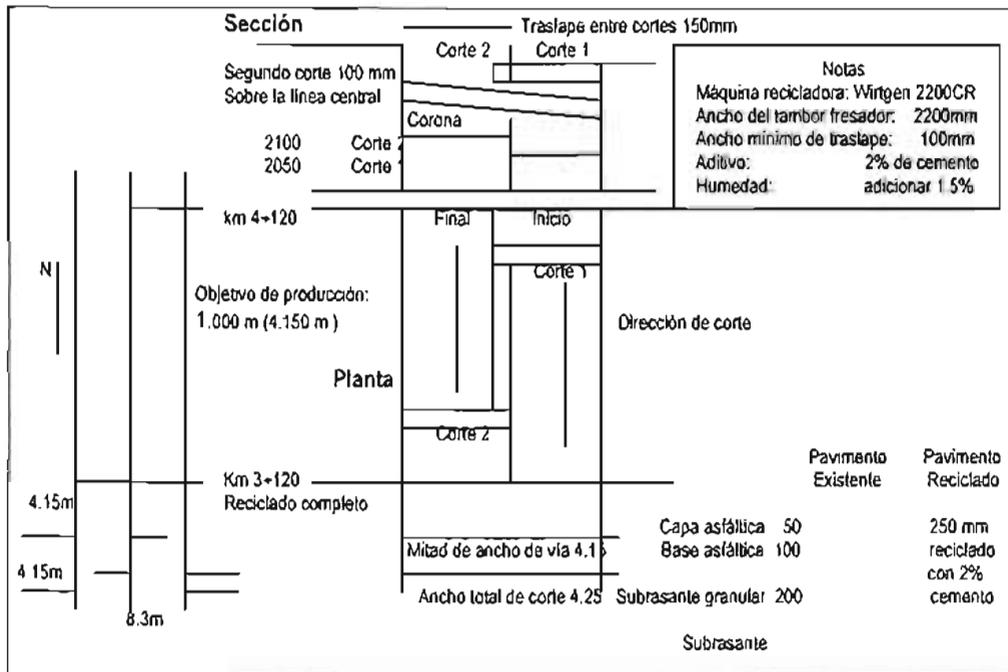


Fig 5.2 Esquema de producción previsto

Las juntas no son otra cosa que discontinuidades a lo largo y ancho de la carretera ocasionadas cada vez que el tren detiene su marcha, como sucede hacia el final de cada sección transversal o al término de la jornada. Por ello se sugiere comenzar de nuevo la recuperación desde un metro atrás a la formación de la junta y sobre el material ya tratado.

De no tenerse cuidado con ellas tienen el potencial suficiente para producir zonas débiles que a la postre merman la capacidad estructural de la capa reciclada. Así por ejemplo, para el caso del cemento habrá que vigilar que la ejecución entre cortes adyacentes no exceda el plazo de manejabilidad del material que en general es de unas 3 hrs, porque de lo contrario podrían comenzar a desarrollarse fisuras a lo largo de la junta. Una manera de anticipar y corregir esta situación y que actualmente disfruta de gran aceptación por sus excelentes resultados es la llamada "Prefisuración ordenada" o también conocida con el nombre de "Ejecución de juntas en fresco" de la que hablaremos a continuación.

5.5.1 Ejecución de juntas en fresco o prefisuración ordenada

Por la misma tendencia del cemento a crear fisuras, es de suponer que, si el material reciclado no recibe un adecuado tratamiento preventivo podría reaccionar de manera similar induciendo el deterioro, la falga acelerada ante la pérdida de continuidad y la filtración del agua hacia las capas más profundas de la estructura, de ahí la conveniencia de realizar entallas en fresco a distancias cortas **Interesando parcialmente el espesor recuperado** reduciendo la separación que hay entre las mismas.

El método consiste en una serie de **cortes hechos a propósito** tanto longitudinales como transversales separados entre sí cada cierto número de metros dependiendo del espesor de la capa y su resistencia a la compresión simple. Así por ejemplo, para resistencias superiores a 12 MPa a 28 días y/o espesores mayores a 20 cm se recomienda guardar una distancia aproximada de 5 m entre entalla y entalla, reduciéndose a sólo 2.5 m en caso de que el espesor de la capa bituminosa sea menor a los 14 cm.

Pero, ¿qué tan seguros podemos estar de que dichas "entallas" no volverán a cerrarse a sabiendas de que aún les falta resistir el paso de los rodillos?

Previendo que esto ocurra el principio de cualesquiera de los métodos a utilizar, **supone el tratamiento del surco formado** ya sea mediante la inclusión de una tira de plástico flexible o la inyección de pequeñas cantidades de emulsión tras hecho el corte correspondiente.

Varios son los equipos que en la práctica se ocupan para llevar a cabo la prefisuración ordenada, clasificados de acuerdo a su profundidad de ataque, modo de desplazarse y tipo de junta que mejor realizan.

1. Conforme a su profundidad

- Los rodillos y bandejas vibrantes provistos de cuchilla anular soldada a su cara inferior son la mejor alternativa si esta comprende sólo parte del espesor, cercano a 1/3
- El equipo CRAFT, el método Olivia y los equipos de juntas activas son lo más apropiados cuando se trata del grueso de la capa.

2. Por el modo en que se desplazan

- Como los equipos del primer grupo cuentan con ruedas, sólo basta empujar para trasladarlos por doquier
- En cambio los del segundo grupo tienen la enorme ventaja de estar acoplados a vehículos móviles que disponen de motor para su propulsión.

3. Por el tipo de junta que mejor saben hacer

- El equipo CRAFT, el método Olivia y el equipo de juntas activas trabajan eficientemente al realizar cortes transversos, mientras que los rodillos y bandejas muestran versatilidad ejecutando juntas de cualquier tipo.



Fig 5.3 Equipos usados para la ejecución de juntas en fresco

5.5.1.1 Equipo CRAFT (CREación Automática de Fisuras Transversales)

Diseñado para cumplir una doble función; realizar la entalla mientras se vierte la emulsión bituminosa, este dispositivo de corte impide la adherencia entre caras de la junta. Hecho que no resulta sorprendente si consideramos que la adición del betún aumenta la relación agua/cemento, demora el fraguado y motiva la formación de fisuras justo en el sitio donde se realiza el tajo.

Hoy en día existen dos tipos de equipo; el primero, con un ancho de trabajo de 3.5 m, consumos de emulsión de 0.5 l/h y capacidad de 500 litros y un segundo, con un ancho de 5 m, consumos de 1 l/h y capacidad de 1000 litros.

El equipo consta de:

1. Un elemento de corte, compuesto por una cuchilla que en su parte delantera posee un vibrador y por detrás, una manguera que rellena de emulsión el surco realizado a todo lo ancho.
2. Un brazo hidráulico que sujeta y desliza la cuchilla mientras va ejecutando la entalla
3. Y un depósito para la emulsión, a partir de donde es bombeado

Lo increíble de estos equipos radica en la prontitud con que se completa un ciclo de trabajo, pues desde que da inicio el corte hasta el comienzo del próximo ni siquiera han transcurrido 30 seg considerando además que la separación entre junta y junta varía de los 2.5 a los 3.5 m. Gracias a su alto rendimiento la participación de este tipo de equipos no representa retraso alguno, recomendándose su inclusión en cualquier clase de obra.

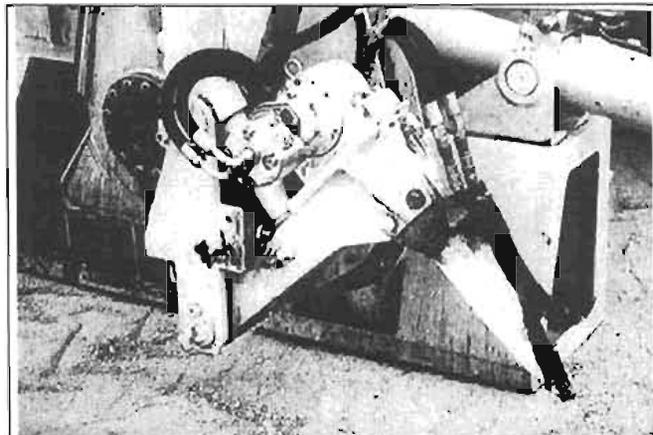


Fig 5.4 Componentes de un equipo CRAFT: elemento de corte, brazo hidráulico y sistema de inyección

5.5.1.2 Equipo Olivia

Esta alternativa apuesta por la aparición controlada de fisuras como resultado del efecto combinado entre las cargas y el debilitamiento de la propia superficie. Para inducir este mecanismo, se efectúa un corte transversal insertando al mismo tiempo una tira de plástico que, de acuerdo a lo previsto impedirá "la adhesión" posterior entre las caras o labios verticales de la entalla.

La cinta suele venir enrollada y montada en el chasis de una carretilla elevadora de carga frontal, su ancho oscila entre $\frac{1}{3}$ y $\frac{1}{4}$ del espesor de la capa mientras que su grosor está entre los 40 y 80 μm .

Diseñados para operar por completo de manera automatizada actualmente existen dos tipos de modelos cuyos anchos de trabajo cubren los 4 o 5 m siendo 2 m el mínimo aceptable.

El equipo Olivia está compuesto por:

1. Una viga fija, unida al vehículo
2. Una viga móvil, que recorre a todo lo ancho de la capa tratada
3. Un par de gatos hidráulicos, en quienes se apoya la viga móvil y finalmente
4. Un dispositivo de prefisuración o elemento de corte integrado por:
 - a. Una cuchilla estrecha de 2 cm de doble ranura, por donde entra y sale la cinta
 - b. Un sistema de motor hidráulico, de quien depende para su desplazamiento y
 - c. Una cadena de transmisión

Así conforme avanza al penetración del elemento de corte, la cinta se va desenrollando y depositando paulatinamente de manera vertical para luego cortarse al término de cada pasada y regresar a su posición original, completando un ciclo. Normalmente la ejecución de las juntas será a cada 3 m.

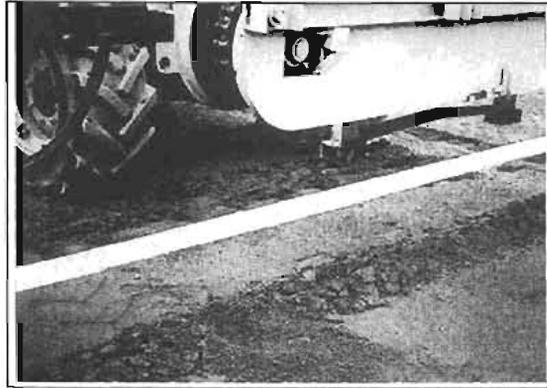


Fig 5.5 Cadena de transmisión del Equipo Olivia

5.5.1.3 Equipo de juntas activas

A diferencia del método anterior esta propuesta sugiere la inserción de un perfil ondulado de plástico rígido tras haber elaborado el surco abarcando solamente el eje central de cada carril con lo que se busca repartir las cargas entre las paredes de las juntas.

Dichos elementos mantienen una separación entre los 2 y 3 m, siendo su longitud habitual 2 m mientras que su altura aproximada comprende 2/3 del espesor de la capa tratada; de esa forma la parte superior de la cinta queda a sólo 5 cm de la superficie situación que no impide llevar a buen término la compactación y refinó restantes.

5.6 La operación del reciclaje

Antes de iniciar la operación del reciclaje, es menester de quienes participan del proyecto involucrados en la toma de decisiones repasar el orden en que cada una de las actividades programadas se realizará. Esto con el fin de que ningún aspecto relacionado con las mismas haya sido descuidado u omitido pues está de por medio el éxito de la rehabilitación.

A. Preparativos del tren de reciclaje

1. Revisión minuciosa de todas las máquinas sin excepción
2. En caso de utilizar agentes bituminosos checar que la temperatura sea la apropiada
3. Confirmar que el suministro de agua y agentes estabilizadores corresponda con lo previsto en función del plan de trabajo y el contenido de humedad.
4. Posicionar el tren, arrancando a partir de la primera línea de corte o ligeramente detrás del sitio donde paro el día anterior.
5. Verificar que todas las mangueras, válvulas y demás dispositivos que surten a la recicladora no guarden aire.
6. Dependiendo el tipo de agente será la longitud de corte (Así por ejemplo, cuando se trabaja con cemento los tramos conviene hacerlos cortos, lo que permite reciclar, nivelar, compactar y terminar la superficie antes de que el material haya tenido tiempo suficiente para hidratarse)
7. Recordar al operador donde inicia y donde termina el corte, haciendo énfasis de cuan importante es cumplir la tasa de aplicación a lo largo de todo el proceso.
8. Anticipar el uso de motoniveladora en aquellos casos en que una sección transversal a desnivel presente una pendiente mayor al 2% pues el material fresado tenderá a deslizarse, perdiéndose la forma de la vía y afectando la ejecución del corte adyacente.
9. Verificar que los consumos del material concuerden con la cantidad de agente estabilizador colocado al comienzo de la jornada.
10. Hacer de esta práctica una costumbre mientras persisten los trabajos.

B. El inicio

A fin de valorar el comportamiento general de la operación usualmente se realiza un primer tramo de prueba, de longitud cercana a los 100 m y de ancho igual al de un carril considerando:

1. La revisión del material producido por la recicladora

Es de esperar que éste resulte semejante al ocupado por las muestras que dieron origen al diseño de la mezcla. De no ser así, habrá que realizar ciertas modificaciones a la máquina tales como ajustar el tamaño máximo de la partícula, variar la velocidad de rotación o cambiar simplemente, la velocidad de avance.

2. La compactación

Una compactación apropiada es un factor determinante en pos de obtener una buena resistencia a la fatiga de la capa tratada. La **densidad lograda** por el material dice mucho de su desempeño futuro. Por ello reviste importancia que la selección de los equipos corresponda con las solicitudes cada vez más comunes que exige la práctica; realizar en una sola pasada capas de grueso espesor (>250 mm)

3. Aumento de volumen

Si bien es cierto que la mezcla entre viejo y nuevo material da como resultado la expansión del mismo, la revisión de los niveles finales tiene por objeto evaluar que la capa terminada no rebase las tolerancias preestablecidas.

5.7 Afine, compactación y riego de protección

5.7.1 Afine

Como es lógico, tras el paso de la recicladora y una vez extendido el material suelen apreciarse ciertas imperfecciones, casi todas ellas, producto de los cambios de volumen. Así tenemos que el trabajo con cemento **supone por efectos de esponjado** el retiro del material sobrante haciendo el afine a todo lo ancho del carril hasta la cota definitiva, más nunca rellenando puntos bajos con material excedente que provenga de puntos altos. Incurrir en dicha práctica sólo fomentaría **segregar** el material.

Ahora bien, ¿porqué elegir una motoniveladora? La versatilidad de sus funciones **satisface** ampliamente las más **diversas tareas**, que van desde el intercambio de material, enrasado, corrección y remoción del mismo, hasta la puesta a punto de la capa dependiendo el tipo de recubrimiento que pretenda adoptarse.

¿Tolerancias? Las que marque el proyecto. A menudo, para capas de asfalto, de grueso espesor se es más "generoso" que en aquellos otros casos donde por ejemplo, sólo se aplicará un sello o riego de emulsión.



Fig 5.6 Enrasado del material con motoniveladora

5.7.2 Compactación

Compactar, es someter a la capa reciclada a esfuerzos de compresión tales que **favorezcan la cohesión** entre sus partículas, aminorando los contenidos de aire y agua a la par de **un mejor acomodo** y distribución granulométrica que en suma, redunden en una mayor estabilidad, resistencia y uniformidad.

Para comprender la importancia de ejecutar correctamente esta etapa conviene recordar bajo qué principios se desarrolla esta técnica:

1. Estabilidad

La capa será más estable mientras más difícil resulte modificar su estado de consolidación; es decir, mayor es su **grado de consolidación**:

- Cuanto mayor es su compacidad (mayor densidad específica)
- Cuanto mayor trabazón presente su estructura
- Cuanto más se aproxime su contenido de humedad al óptimo
- Cuanto menor es la presión de sus gases

2. Resistencia a la deformación

Incorporar ligantes a la mezcla siempre tendrá como propósito formar un **armazón continuo y homogéneo**, capaz de soportar condiciones de tráfico intenso. Una compactación enérgica es fundamental para lograrlo.

3. Uniformidad

Como sucede en ciertas ocasiones, será preciso corregir el material fresado antes de su colocación definitiva. **Ajustando el tamaño de los granos** conforme a una curva granulométrica continua –ello asegura contar con partículas de todos los diámetros en cantidad y proporción necesarios favoreciendo tanto el reparto de los efectos como el grado de humedad en todos sus puntos–.

En general, un equipo de compactación debe ser potente, capaz de obtener la densidad mínima señalada en el proyecto dentro del plazo de trabajabilidad definido y con la calidad de acabado necesario, compuesto al menos, por un rodillo vibratorio y un compactador de neumáticos o bien por un rodillo mixto. De estos tres, el más socorrido para la compactación de capas gruesas en una sola etapa (>200 mm) es el compactador pesado vibratorio de frecuencia dual, recomendándose los de 12 a 15 t de carga estática.

Carga estática

Una carga P se desplaza sobre el material a compactar, a una velocidad V uniforme, provocándole una serie de presiones cuyo valor dependerá de la profundidad del punto considerado y de su distancia al centro de la carga.

Como podemos ver AB corresponde a la sección media del material y es la distancia comprendida entre los extremos del cono de influencia de la carga supuesto a 45° desde los contornos de la placa.

Ciclo de carga y descarga

Cuando la carga está lejos de la vertical del punto considerado no existe sobrepresión en dicho punto. No obstante, a medida que el compactador se aproxima, genera una compresión cuyo valor aumenta hasta el instante en que la carga pasa por la vertical, para luego decrecer paulatinamente. Sin embargo, los efectos de la carga sólo son soportados por parte de la capa. Boussinesq desarrolló una teoría que permite definir el reparto de presiones (distribución) por medio de placas de formas y dimensiones diversas como las que presentamos a continuación: Se aprecia en las tres primeras que la presión a determinada profundidad es proporcional a la carga, siendo las de placa cuadrada las que a igualdad de carga y superficie producen mayor presión a mayor profundidad.

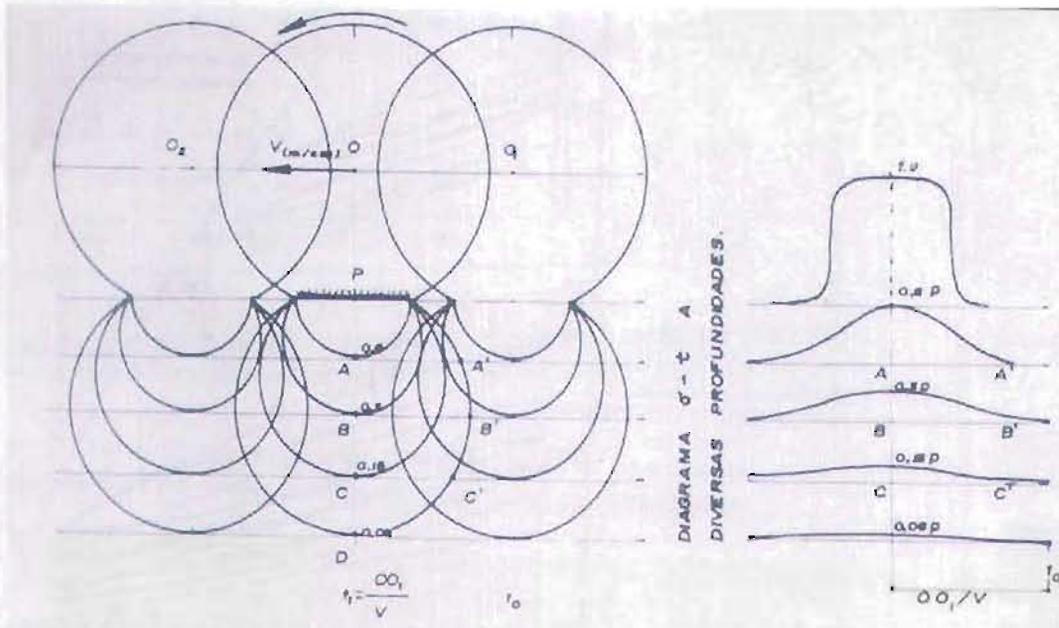


Fig 5.7 A. Ciclo real de carga y descarga del suelo a compactar
B. Diagrama de distribución de presiones debidas al paso de un compactador de ruedas neumáticas

5.7.2.1 Rodillos vibratorios

Su vibración la obtienen a partir del giro de masas excéntricas. Gracias a su peso y excentricidad se pueden combinar distintas frecuencias (600 - 4,500 rpm) con diversas amplitudes, lo que asegura un mejor compactado dependiendo la zona de la capa a la que se quiera llegar. Así por ejemplo, una vibración de baja frecuencia, pero de gran amplitud resultará más adecuada por el esfuerzo que representa densificar partes inferiores de la capa, que operar a altas frecuencias de baja amplitud donde se requiere ser más eficiente puesto que el material no es tan "cohesivo" -partes superiores de la capa-.

Es probable que, la vibración de baja frecuencia y gran amplitud provoque algunos desprendimientos, defecto que puede evitarse enrasando mediante motoniveladora como ya vimos anteriormente. Es obvio que el espesor que vaya a compactarse determine la selección del tipo de rodillo. Siendo la carga estática por unidad de longitud de generatriz. También ayuda el hecho de que el material esté limpio y exento de finos plásticos para mejorar esta condición.

| Tipo de rodillo vibratorio | Carga Estática por unidad de longitud de generatriz (N/cm) | Espesor de capa más adecuado (cm) |
|----------------------------|--|-----------------------------------|
| Ligeros | 100 - 250 | 10 - 15 |
| Medios | 250 - 350 | 15 - 20 |
| Pesados | 350 - 450 | 20 - 30 |
| Muy pesados | > 450 | > 30 |

Tabla 5.1 Tipos de rodillos vibratorios

La compactación debe realizarse longitudinalmente del borde más bajo de la capa hacia el más alto, procurando respetar un cierto margen en caso de no existir contención lateral. En las esquinas o curvas cuyo radio sea muy cerrado se sugiere compactar en forma de abanico sin forzar el giro; esto evitará desplazamientos del material provocados por las diferencias de recorrido de cada uno de los extremos del rodillo vibratorio.



Fig 5.9 Compactadores de rodillo liso (de izq a der. Hamm HW90, HW130 y Modelo 3412)

5.7.2.2 Compactadores neumáticos

Son equipos de carga estática, **empleados para el cierre superficial o "pulimento"** (milímetros superiores) del material ligeramente descompactado por el paso de rodillos vibratorios –lo cual se aprecia, por un agrietamiento fino en sentido horizontal de forma hojaldrada-. Los hay autopropulsados, remolcados, de suspensión flotante y de tipo isostático. La superficie de contacto de un compactador neumático es de forma elipsoidal siendo su carga por rueda $>3t$. La presión de inflado de esta clase de compactador (>0.7 MPa cuando menos) se controla automáticamente por medio de un dispositivo conocido como "racor" encargado de comunicar a todas las ruedas con un depósito de aire, el que alimentado por un compresor aumenta o disminuye durante la marcha según las necesidades de la compactación.

Mientras que los remolcados suelen ser de difícil maniobra (peso entre 30 y 100 t), con los autopropulsados sucede lo contrario, ya que por su menor peso (10 a 40 t) pueden desplazarse por sí mismos, sin mayor inconveniente. En general cuentan de 7 a 9 neumáticos dispuestos de forma alterna de manera que puedan combinarse la presión vertical con un ligero amasado que en suma faciliten el encaje de los granos finos en los huecos. De cara a la compactación en profundidad, el factor más importante es éste último. En función de ésta, los compactadores neumáticos se clasifican en ligeros (< 3 t/rueda), medios (3 – 6 t/rueda) y pesados (> 6 t/rueda).



Fig 5.10: Dispositivo de control y variación de la presión de inflado de un compactador neumático

5.7.2.3 Reparto de presiones bajo las ruedas

La presión a una determinada profundidad es función del diámetro medio de la huella y la presión de contacto para neumáticos de varias dimensiones. Cuando un compactador lleva varias de ellas con sus ejes en línea separadas entre sí a distancias cortas, los **bulbos de presión** de cada una terminan por **traslaparse** dando como resultado una **envoltura** de mayor profundidad.

Al igual que las demás actividades, la técnica de compactación requiere de ciertos cuidados especialmente aquellos relacionados con:

- 1 La demora entre el extendido y compactado del material
- 2 Las desventajas de compactar una y otra vez la misma zona
- 3 La adición de retardadores de fraguado
- 4 ¿Cómo compactar materiales finos de baja plasticidad ?

1. Demora entre el extendido y compactado del material

Es normal que tras quedar expuesto el material al aire libre, se pierda algo de humedad por efecto de la **evaporación** para aliviar este inconveniente se recomienda regar la superficie con un poco de agua evitando que se alteren hasta donde sea posible las condiciones de partida de la mezcla (densidad).

2. La sobrecompactación, una falla común

En un principio la compactación se conseguía paulatinamente mediante pasadas sucesivas de la máquina compactadora calculadas en número, en función del tipo de máquina, el espesor de la tongada, la humedad del terreno y el grado de consolidación deseado, procediendo finalmente a su realización. Hoy en día sin embargo, esta práctica ha caído en desuso pues se ha visto que el paso insistente del rodillo sobre un mismo punto termina por **romper el material** y con él, la densidad supuesta disminuye.

3. Adición de retardadores de fraguado

A favor de un correcto empalme entre bandas adyacentes y en vista de que los **plazos de manejabilidad** para materiales reciclados son mínimos (**2 - 3hrs**) la inclusión de retardadores de fraguado resulta imprescindible para evitar que se presente esa condición -por parte del conglomerante- sin antes haber efectuado la compactación respectiva.

4. ¿Cómo compactar materiales finos de baja plasticidad?

"Los **materiales** de gradación fina con **baja plasticidad tienden a fallar por corte** bajo la acción de la compactadora, ocasionando desplazamientos laterales. El agua es la mejor ayuda para la compactación de estos materiales, pero incluso cuando se trabaja en el contenido óptimo de humedad es difícil mantener una superficie final aceptable, requiriendo así una pasada adicional con la motoniveladora para eliminar las distorsiones inducidas por el compactador. Habrá que tener cuidado de que toda la superficie se enrase sin que se formen lentes delgadas de material depositados en depresiones poco profundas". [9]

5.7.3 Riego de protección

El método más sencillo para curar un pavimento es mediante un baño de emulsión aniónica o catiónica sobre el carril recién terminado.

1. Con auxilio de un camión cisterna dotado por una barra esparcidora se riega el ancho de la superficie con una dotación no inferior a 600 g/m (lo que aproximadamente equivaldría a 300 g/m de betún residual).
2. Se protege el área extendiendo una capa de arena de 0-4 mm o si se prefiere gravilla limpia y seca de 2-6 mm (para una dotación de 4-6 l/m)
3. Tras apisonar la gravilla, sólo resta esperar a que rompa la emulsión
4. Obteniendo así un magnífico sello, rico en asfalto y a bajo precio. A este proceso también se le conoce como riego de adherencia.

En general, el ancho de la barra suele medir 2.30 m. integrada por un sistema automático que le permite no sólo controlar la velocidad y ancho del riego, sino también la inclinación, altura e inyección del ligante. Con respecto a la apertura al tráfico, ésta debe posponerse **hasta** el momento en que **se dé la ruptura de la emulsión** -cambio de color- procurando que la velocidad hasta entonces sea moderada, esto evitará posibles desprendimientos de la capa y deslizamiento del material en la superficie; quizá por ello resulte conveniente añadir una capa más del mismo producto lo cual no sólo completa el tratamiento sino también proporciona una textura rugosa al pavimento suficiente como para favorecer el frenado eficiente de los vehículos.



Fig. 5.11 Ejecución de riego de adherencia mediante camión cisterna

5.8 Control de calidad

Es la etapa encargada de evaluar si un producto cumple o no, las especificaciones prescritas por el proyecto. Ésta inicia con la supervisión en la ejecución de los trabajos y concluye tras el análisis e interpretación de los resultados obtenidos. Su vigilancia permite al contratista adoptar las medidas que considere necesarias ante una eventual contingencia y la pronta solución del problema.

A Con respecto al proceso de reciclaje

1. Todo tipo de material, llámese cemento, agua, aditivo, etc que intervenga en la recuperación y mezcla de la capa será **suministrado en tiempo y forma** conforme a lo previsto sin descuidar la calidad de los mismos.
2. Revisar las toberas de inyección de cemento de la máquina recicladora puede ser cosa de rutina, pero comprobar que el consumo registrado **coincida** con la dotación de partida confirma su buen funcionamiento.
3. A fin de evitar que posteriormente sea difícil alcanzar el grado de compactación deseado siempre **procuraremos** mantener el contenido de agua lo más cercano al óptimo posible.
4. **Cuando menos diariamente** debe realizarse un **análisis granulométrico** con el propósito de constatar cuán eficaz ha resultado el escarificado y homogenizado del material.
5. Como el material reciclado puede variar, tanto transversal (a menudo como resultado de operaciones de ensanchado) como longitudinalmente (debido sobre todo a diversas fuentes de material utilizadas en la construcción original) habrá que tomar **muestras aleatorias** en ambos sentidos.
6. **La densidad** seca máxima (DSM) es un parámetro que **correlaciona de manera aceptable** la energía de compactación estándar necesaria para hincar una porción de ese material con respecto a su contenido óptimo de humedad. Su obtención es una forma de medir la densidad seca del terreno expresado como porcentaje.

B Con respecto a la capa terminada

7. Sobre el espesor diremos que, a menudo, éste se revisa a través de **medidas físicas directas**, como en el caso de la extracción de testigos, los que por su carácter destructivo se encuentran limitados a uno o dos por cada kilómetro.
8. **El espesor** es quizá la variable más importante en el desempeño de la capa reciclada, ya que de ser menor al propuesto por el diseño disminuye notablemente la resistencia del pavimento y en consecuencia la respuesta del material ante la repetición de cargas. Por el contrario, si es mayor, estará sobredimensionado resultando insuficiente la dotación de cemento por m³. que se había contemplado haría falta.
9. Para conceder el visto bueno a una superficie recién terminada, es necesario que presente un acabado aceptable –textura uniforme- **libre de material segregado y con el drenaje suficiente** para evacuar el agua que intente acumularse en caso de lluvias. Su ancho no debe ser menor que el ancho previamente proyectado y su nivel, no diferir más allá de 15 mm en cualquier punto.
10. Con el propósito de evaluar la resistencia a la compresión simple, se fabricarán probetas de 15 cm de diámetro por 30 cm de alto del material reciclado de acuerdo al siguiente criterio:
 - Dos series diarias de tres probetas cada una para ensayar a 7 días; tres por la mañana y tres por la tarde
 - Una serie de tres probetas cada 2 o 3 días para ensayar a 28 días.

6.1 Tipos de agentes estabilizadores

Dentro de la amplia gama de agentes estabilizadores que podemos hallar en el mercado y de los que tenemos un amplio conocimiento por su gran impacto dentro del ramo de la construcción están los de tipo convencional como la cal (viva e hidratada) y el cemento (sólo o combinado con otros productos, destacándose -puzolanas, cenizas, escorias, etc-). Los hay también de origen químico, tales como el cloruro de calcio, el silicato de sodio, el cloruro de sodio (conocida como sal de mesa), polímeros de cadena larga (resina de anilina + suelo + catalizador ácido), productos sulfatados del petróleo, etc. Mezclas de distintos tipos de suelo (grava, arena, arcilla en distintas proporciones) y otros más como el uso de asfalto en sus dos variantes, en forma de espuma y emulsión.

No obstante, sea cual sea la naturaleza del estabilizador, **el común denominador de todos ellos** reside en la capacidad de alterar, aprovechar y superar las propiedades del material existente (suelo) incrementando su resistencia o bien, disminuyendo su plasticidad de manera que éste pueda soportar cualquier condición adversa de índole atmosférica, vehicular o el producto de la combinación de ambos.

Los esfuerzos por lograr la estabilización de los suelos han dado origen a estudios más profundos sobre mecánica de suelos que no sólo atiendan su clasificación en términos del tipo, tamaño del grano, porcentaje de finos y su plasticidad sino que ayuden a **pronosticar** la manera en que responderán y permanecerán ante el ataque de ciertos ácidos orgánicos, aguas salitrosas, álcalis, etc.

Otra de las razones por las que conviene complementar la información obtenida a partir del sistema unificado de clasificación de suelos (Ver capítulo I) es la necesidad de conocer en muchos de los casos su **constitución mineralógica**; pues en su gran mayoría los diversos tipos de estabilización fundamentan su aplicación y el éxito de sus alcances, en las distintas reacciones y enlaces producidos al interior de la mezcla.

6.1.1 Estabilización con tratamientos químicos

De una u otra forma el hecho de aglutinar a dos o más partículas, llámense finas, llámense gruesas para que adquieran de alguna manera cierta cohesión que por si mismas no tienen, constituye en sí; una reacción química. Claro que, de ningún modo existe uno y solo uno, producto químico capaz de estabilizar a todos los tipos de suelo. Los hay por ejemplo, aquellos que para actuar necesitan de la presencia de un catalizador para formar un polímero que al poco tiempo proporcionará la resistencia y durabilidad esperada (acrilato de calcio y resina de anilina)

Vale la pena señalar como en los casos anteriores, que no es necesario dotar al suelo de altos contenidos de compuesto químico para lograr buenos resultados; simplemente que la mezcla sea homogénea para en consecuencia apreciar la disminución de sus límites de consistencia.

Existen otros como el cloruro de sodio o sal común de mesa que pese a su bajo costo necesita ser machacada primero y tamizada después para lograr una correcta distribución al integrarse al suelo, las partículas finas son a las que más beneficia esta situación pues experimentarán un considerable aumento de su densidad que a su vez elevará su capacidad de soporte. Se acostumbra que por cada metro cuadrado y un cm de espesor en los primeros 8 cms se inviertan 150 gr de sal.

6.1.2 Estabilización mecánica empleando suelos granulares

El principio de esta técnica de estabilización se basa en la adición de material arcilloso perfectamente pulverizado y distribuido, con el suficiente contenido de humedad como para impartir la cohesión necesaria a partículas de grano fino o a algunas otras de bajo poder cementante al mismo tiempo que aglutina a las de grano grueso, las que por lo regular sólo poseen una alta fricción interna como cualidad principal.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

6.1.3 Consideraciones sobre los agentes estabilizadores

Normalmente en la práctica el ingeniero se topa con suelos que en su estado natural resultan ser inadecuados para fines de diseño y que de no evaluarse correctamente, influirán de manera importante en otros rubros del proyecto. Para estos casos habrá que tomar en cuenta lo siguiente:

- a. El suelo por sí mismo cuenta con la suficiente cohesión y fricción interna ¿cómo para soportar las cargas a que será sometido?
- b. Cada método de estabilización tan sólo aplica a un número limitado de suelos por lo que debe considerarse o excluirse el uso de varios de ellos.
- c. Definir qué propiedades conviene mejorarse (estabilidad volumétrica, resistencia mecánica, permeabilidad, durabilidad y compresibilidad)
- d. La estabilización es una medida preventiva y no sólo correctiva
- e. No siempre tratar de mejorar el suelo es la mejor opción, habrá ocasiones que su reemplazo resulte ser más económico.

6.1.2 Propiedades de la capa estabilizada

| Propiedad | Problemas relacionados con... | Soluciones posibles |
|-------------------------|---|---|
| Estabilidad volumétrica | Expansión y contracción del suelo ante cambios de humedad | <ol style="list-style-type: none"> 1. Empleo de membranas impermeables 2. Floculación por medios térmicos o químicos de arcillas expansivas 3. Sellado de poros y grietas de masas expansivas 4. Compactación a pesos volumétricos altos |
| Resistencia | <p>Insuficiente cantidad de agente estabilizador incorporado</p> <p>Grado de humedad</p> | <ol style="list-style-type: none"> 1. Realizar pruebas con cargas repetidas a fin de estudiar efectos de disgregación y pulverización para suelo seco y agrietado. 2. En suelos de textura abierta y mal graduados analizar si son factibles de recompactarse 3. Adición de cemento Pórtland y cal al suelo salvo aquellos con altos contenidos de materia orgánica (<10%) 4. Ensayos de resistencia in situ 5. Incremento de la capacidad de carga por medio de la electrólisis. |
| Permeabilidad | <p>Ascensión capilar</p> <p>Flujos que provocan el arrastre</p> <p>Presiones de poro excesivas inducen deslizamientos en terracerías</p> | <ol style="list-style-type: none"> 1. Aumentar la energía de compactación, con lo que se abate la permeabilidad 2. Sellado a base de la inyección de lechada 3. Aplicar aditivos y emulsiones líquidas que reduzcan el potencial capilar |
| Durabilidad | <p>Mala elección del agente estabilizador</p> <p>Deterioro</p> <p>Inadecuada resistencia contra el ataque del agua</p> <p>Altos costos de mantenimiento</p> | <ol style="list-style-type: none"> 1. Llevar a cabo pruebas de intemperismo y aplicación de efectos cíclicos que simulen cierta forma las condiciones a las que estará sujeto el pavimento |
| Compresibilidad | <p>Cambios de volumen y resistencia al esfuerzo cortante</p> <p>Variación de la carga que soportaba el suelo</p> | <ol style="list-style-type: none"> 1. Pruebas de consolidación |

6.2 Estabilización con cemento

6.2.1.1 Antecedentes

Sin duda alguna el material más importante y de más amplio uso alrededor del mundo de entre los agentes estabilizadores es el cemento Pórtland. Los principales minerales requeridos para su producción son:

CaO (cal), SiO₂ (silicatos), Al₂O₃ (alumina) y Fe₂O₃ (óxido de hierro).

La tabla 6.2 enlista el origen de los mismos [*] Siendo la cal su principal componente (60-65%)

| Mineral | Materiales de origen usados en la elaboración de cemento Pórtland |
|--------------------------------|--|
| CaO | Roca cementada, Caliza, Marga, Concha de ostra, Gis, Mármol, Desperdicio de Álcali |
| SiO ₂ | Arena, Silicato de Calcio, Cuarzita, Tierra de Batán |
| Al ₂ O ₃ | Arcilla, Pizarra, Escoria, Ceniza volante, Escoria cobriza, Alumina metalífera, Granodiorita, Kaolin |
| Fe ₂ O ₃ | Hematita, Polvo de hierro, Pirita, Óxido de hierro |

En la fabricación del cemento Pórtland todos los materiales extraídos de un banco se reducen a un tamaño máximo de 3/4" para alimentar así a los molinos, de manera que es preciso triturar las grandes rocas resultantes de las voladuras de caliza. Se mezclan en cierta proporción deseada buscando siempre uniformidad en su composición química y distribución de tamaño. Los minerales se queman dentro de un horno a altas temperaturas que alcanzan hasta los 1450°C (2700°F).

Se eliminan ciertos gases y se evapora el agua, produciéndose un nuevo compuesto químico, llamado Clinker. El clinker pasa posteriormente a un enfriador en donde se le inyecta aire a presión hasta que adquiere una temperatura de 40°C.

Para producir cemento se pulveriza el clinker y se le añaden un 5% de yeso y puzolana natural (material volcánico), el primero es para controlar el fraguado mientras que el segundo contribuye a la resistencia quedando listo para su venta y distribución a granel o ensacado.

La figura 6.1 ilustra el proceso de manufactura para un cemento Pórtland en una planta típica. Los componentes resultantes son:

| | |
|---|------------------------|
| 3CaO * SiO, abreviado C3S | (silicato tricálcico) |
| 2CaO * SiO, abreviado C2S | (silicato bicálcico) |
| 3CaO * Al ₂ O ₃ , abreviado C3A | (aluminato tricálcico) |
| 4CaO * Al ₂ O ₃ * Fe ₂ O ₃ , abreviado C4AF | (ferrito tetracálcico) |

La **proporción** de estos cuatro químicos en el producto final **dependerá de las propiedades deseadas** como son el grado de dureza, la cantidad de calor que se retira y la resistencia al ataque químico.

Cuando las partículas del cemento absorben agua, se forma un gel que las liga, a este proceso se le llama **hidratación**, que perdura por meses o años mientras el agua esté presente.

La reacción química para C3S es:



El principal producto 3CaO * 2SiO₂ * 3H₂O es llamado "**tobermorita**" y brinda al concreto su fuerza. Las reacciones químicas de los demás componentes es análoga. La cantidad de agua total requerida para completar la hidratación del cemento es alrededor del 25% de la masa. [10]

[*] Canadian Portland Cement Association

[10] Atkins, Harold N. Highway materials, soils & concretes. Capítulo VI. Ontario, Canadá. 1980. Ed. Reston Publishing Co. Inc. Prentice-Hall p.235.

6.2.1.2 Rasgos característicos de los componentes y tipos de cemento

C3S Endurece rápidamente y es el principal responsable de las condiciones iniciales y resistencia temprana durante las primeras tres o cuatro semanas. Constituye el 50% en peso del cemento

C2S Hidrata lentamente y es quien origina el incremento de la resistencia a largo plazo. Compone el 25% en peso.

C3A Es un catalizador que reacciona muy rápido y adiciona una pequeña cantidad de fuerza. Es también responsable de la baja resistencia del cemento al ataque de sulfatos. Aporta el 12% en peso.

C4A Freacciona lentamente, su propósito es reducir la temperatura requerida durante la quema en el horno. 8% peso El grado de abandono del calor es mayor en C3A, seguido por C3S. Cerca del 50% del total del calor de hidratación se disipa en los tres primeros días. En general, altos niveles de silicato tricálcico C3S y las partículas más finamente molidas inducirán una alta resistencia temprana. Sin embargo, la rapidez de hidratación del C3S se mejora al aumentar los niveles de aluminato tricálcico C3A [11]

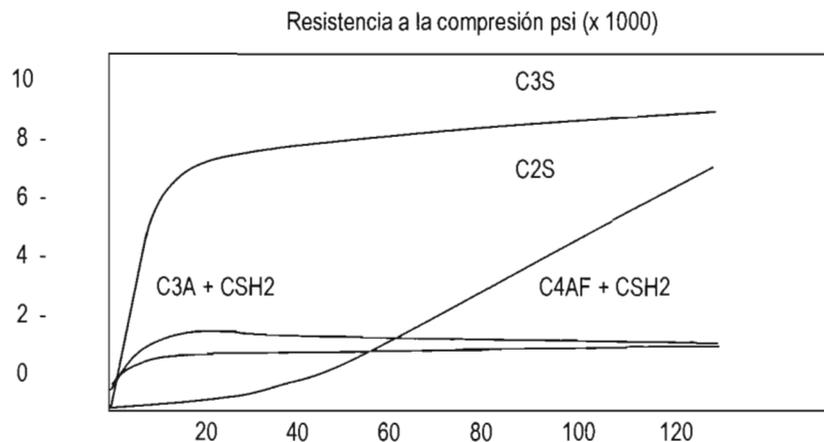


Fig 6.2 Contribución a la resistencia de los cuatro compuestos principales del cemento [12]

Tabla 6.3 Características de los componentes del cemento Portland

| Componente | C3S | C2S | C3A | C4AF |
|-------------------------------|-------|-------|--------|-------|
| Grado de hidratación | Medio | Lento | Rápido | Lento |
| Resistencia temprana | Alto | Bajo | Medio | Bajo |
| Resistencia última | Alto | Alto | Bajo | Bajo |
| Cantidad de calor liberado | Medio | Bajo | Alto | Bajo |
| Resistencia al ataque químico | Bueno | Bueno | Pobre | Bueno |

Los cementos y aditivos que contribuyen a una resistencia temprana no siempre adquieren una resistencia apreciable a mayores edades. La durabilidad no es función de la resistencia temprana, sino más bien a largo plazo, **del aire incluido, de la relación agua-cemento y de la permeabilidad**. Por lo tanto se deberá prestar atención a todas las fases del proceso de hidratación.

Se recomienda que la relación agua-cemento se mantenga menor de aproximadamente 0.43 para alcanzar una baja permeabilidad y una buena durabilidad [13]

El propósito de contar con una herramienta que permita estimar el tipo de cemento necesario para satisfacer las especificaciones del proyecto, evitará confusiones e indeterminaciones que a la postre redunden en una deficiente calidad de la obra.

Los requisitos contenidos en las normas NMX-C-414-ONNCCE y las norteamericanas:

ASTM C 150 Y ASTM C 595, se aplicarán al cemento en todos los aspectos relacionados con su calidad, almacenaje, manejo, inspección y muestreo. A continuación se presenta una tabla con los diferentes tipos de cemento hidráulico y su nomenclatura correspondiente.

[11 y 13] Guide to selection and use of Hydraulics Cements. ACI. 225R-85, 1985.

[12] Young, J.F.Mindess, S. Concrete. Prentice-Hall Inc 1981.

Tabla 6.4 y 6.5 NMX-C414-1999-Cementos Hidráulicos

| | | NMX - C414-1999 - Cementos Hidráulicos | | | | | | | | NMX - C1-1980 - Cemento Portland | | | | |
|---------|----------------------|--|------|----------|------|------------|------|----------|------------|----------------------------------|---------|----------|---------|--------|
| | | Clase 20 | | Clase 30 | | Clase 30 R | | Clase 40 | Clase 40 R | Tipo I | Tipo II | Tipo III | Tipo IV | Tipo V |
| | | Min | Máx | Min | Máx | Min | Máx | Min | Min | Min | Min | Min | Min | Min |
| 24 Hrs | Kg / cm ² | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 130 | - | - |
| 3 Dias | | - | - | - | - | 204 | - | - | 306 | 130 | 105 | 250 | - | 85 |
| 7 Dias | | - | - | - | - | - | - | - | - | 200 | 175 | - | 70 | 155 |
| 28 Dias | | 204 | 408 | 306 | 510 | 306 | 510 | 408 | 408 | - | - | - | 175 | 210 |
| 24 Hrs | N / mm ² | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 12.7 | - | - |
| 3 Dias | | - | - | - | - | 20.0 | - | - | 30.0 | 12.7 | 10.3 | 24.5 | - | 8.3 |
| 7 Dias | | - | - | - | - | - | - | - | - | 19.8 | 17.2 | - | 8.9 | 15.2 |
| 28 Dias | | 20.0 | 40.0 | 30.0 | 50.0 | 30.0 | 50.0 | 40.0 | 40.0 | - | - | - | 17.2 | 20.6 |

| | | NMX - C414-1999 - Cementos Hidráulicos | | | | | | | | NMX - C2-1986 - Cemento Portland Puzolana | | NMX - C175-1975 - Cemento Portland de Escoria de AltoHorno | |
|---------|----------------------|--|------|----------|------|------------|------|----------|------------|---|-------|--|---------|
| | | Clase 20 | | Clase 30 | | Clase 30 R | | Clase 40 | Clase 40 R | Puz 1 | Puz 2 | Tipo I | Tipo II |
| | | Min | Máx | Min | Máx | Min | Máx | Min | Min | Min | Min | Min | Min |
| 24 Hrs | Kg / cm ² | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 3 Dias | | - | - | - | - | 204 | - | - | 306 | 130 | 102 | 85 | 70 |
| 7 Dias | | - | - | - | - | - | - | - | - | 200 | 153 | 150 | 130 |
| 28 Dias | | 204 | 408 | 306 | 510 | 306 | 510 | 408 | 408 | 255 | 204 | 250 | 250 |
| 24 Hrs | N / mm ² | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 3 Dias | | - | - | - | - | 20.0 | - | - | 30.0 | 12.7 | 10.0 | 8.3 | 6.9 |
| 7 Dias | | - | - | - | - | - | - | - | - | 19.6 | 15.0 | 14.7 | 12.7 |
| 28 Dias | | 20.0 | 40.0 | 30.0 | 50.0 | 30.0 | 50.0 | 40.0 | 40.0 | 25.0 | 20.0 | 24.5 | 24.5 |

Con base en lo anterior se clasifican en cinco diferentes tipos al cemento Portland. Sus características se describen brevemente a continuación:

Tipo I. Es el cemento de uso más común (del 90 al 95% del total).

Tipo II. Se emplea en construcciones de concreto expuestas a la acción moderada de sulfatos (principalmente el Salitre) o de requerirse un calor de hidratación de bajo a moderado.

Tipo III. Para una resistencia rápida a temprana edad, ya que contiene más C3S. Usualmente su costo es de 10 a 20% mayor que el de tipo I, pero es 90% más fuerte un día después de ser curado. Al término de tres meses ambos adquieren la misma resistencia. El cemento tipo III, es mucho más fino que otras clases de cemento, sin embargo se tienen problemas derivados del sobrecalentamiento del cemento durante la molienda, entre ellos el fraguado aparente o la demanda de un agente inclusor de aire.

El fraguado aparente se traduce en un endurecimiento rápido del concreto poco después de mezclarse.

Tipo IV. Se usará cuando se requiera un calor de hidratación bajo, contiene pequeñas cantidades de C3S y C3A.

Tipo V. Para especificaciones de alta resistencia a la acción de sulfatos, mismos que se encuentran a menudo en Suelos (arriba de un 0.2%) y agua subterránea (mayores a 1500 ppm) y que al combinarse con C3A Producen un componente expansivo capaz de desintegrar el concreto.

Se recomienda que para la recuperación de pavimentos se empleen de preferencia los siguientes tipos: Cemento Pórtland Ordinario (CPO) y el Cemento Pórtland Puzolánico (CPP)

El Cemento Pórtland Ordinario (CPO) presenta un bajo contenido de aluminato tricálcico que le permiten desarrollar un moderado calor de hidratación, por lo que las expansiones causadas por un aumento de la temperatura son mucho menores. Tiene una moderada resistencia al ataque de agentes agresivos del suelo y del agua, principalmente sulfatos y salitre.

Por su alto contenido de silicato tricálcico se tienen máximos desempeños de alta resistencia, fraguado rápido y durabilidad. Este cemento es compatible con todos los materiales convencionales como arenas, gravas, piedra, cantera, mármol, etc; así como con aditivos, siempre que se usen con los cuidados y dosificaciones que recomienden sus fabricantes.

El Cemento Pórtland Puzolánico (CPP) por su parte, es un producto de alta impermeabilidad, ya que sella los poros y huecos que suelen formarse por efecto de la evaporación del agua. Presenta menor penetración de agentes agresivos, tales como sales marinas, aguas negras, suelos contaminados o lluvia ácida. Reduce el agrietamiento ante los cambios de temperatura mediante una notable disminución de su calor de hidratación. Tiene **menor segregación, menor sangrado, altas resistencias mecánicas** a edades tempranas 1, 3 y 7 días mientras que a edades mayores de 28 días su resistencia se incrementa notablemente.

Además el Cemento Pórtland Puzolánico, es compatible con cualquier material de construcción de uso común tales como arenas (tamaño: de media a fina, libre de arcilla y materia orgánica) y gravas de mina o de río, mármol, cantera, tezontle, etc. y con los aditivos convencionales para proporcionar a la mezcla resultante la trabajabilidad, fluidez o plasticidad que se requiera. De la combinación con cal por ejemplo se obtiene un incremento notable de la capacidad de carga. Se recomienda en cualquier caso; utilizar agua limpia, libre de materia orgánica incluso para humedecer la superficie posterior al fraguado final (curado).

| | |
|--|------|
| Cemento Pórtland Ordinario | CPO |
| Cemento Pórtland Puzolánico | CPP |
| Cemento Pórtland con escoria granulada de alto horno | CPEG |
| Cemento Pórtland Compuesto | CPC |
| Cemento Pórtland con humo de Sílice | CPS |
| Cemento con escoria granulada de alto horno | CEG |

Tabla 6.6 Cementos comerciales

6.2.1.4 Consideraciones relacionadas con la estabilización a base de cemento

Siempre que sea posible, se buscará que la elección del tipo de cemento cumpla con las siguientes tres condiciones:

1. Características físico-químicas que le permitan reaccionar con suelos compuestos por finos arcillosos
2. A una velocidad de fraguado moderadamente lenta y
3. Económicamente aceptable.

| Consideraciones adicionales | Motivo o repercusión |
|-------------------------------------|--|
| Escarificado del suelo | Disgrega elementos gruesos previos a la incorporación de cemento |
| Medición de la humedad del suelo | Ajuste en la dosificación del cemento a las de proyecto |
| Determinar la densidad in situ | Ajuste en la dosificación del cemento a las de proyecto |
| Evaluar grado de saturación | Ajuste en la dosificación del cemento a las de proyecto |
| Procurar un dosificación suficiente | Mejora las propiedades mecánicas del suelo |
| Evitar la dosificación excesiva | Previene fenómenos de fatiga bajo la acción de cargas |
| Homogeneidad en el extendido | Previene dotaciones irregulares de cemento en distintas zonas |
| Suspensión de trabajos ante viento | Previene pérdidas económicas |
| Capas estabilizadas > 25 cm | Si son mayores, se dificulta compactarlas |
| Comprobar densidad y porosidad | Pequeñas variaciones producen cambios en la capacidad portante |

6.2.2 Características de los agregados

Los agregados deben estar limpios preferentemente, dotados de una resistencia suficiente, compuestos por partículas cuya forma y textura brinden mayor durabilidad, capaces de enfrentar las condiciones más severas y químicamente estables; siendo estas algunas de las cualidades que uno busca sean satisfechas al considerarlos como parte importante de los procesos de mezcla y homogenización del material durante el reciclado.

Más aún cuando la gradación de los agregados es uno de los aspectos más trascendentes, pues influye directamente en conceptos relacionados con la trabajabilidad, resistencia y economía.

La máxima cantidad de finos normalmente se especifica superior e inferiormente. La pasta de cemento debe ser suficiente (entre un 3% y 7%) como para cubrir cada una de las partículas, garantizándose con ello evitar problemas de segregación y dificultades de compactación pero sin caer en el exceso, pues la mezcla no resultará económica. Descontando claro, el contenido de cemento que también es fino.

Un correcto balance entre los finos y gruesos; por ejemplo, de una fracción de arena y una o dos de grava (granulometría combinada) servirán para llenar los huecos ocupados por la pasta de cemento menos densa.

La forma de las partículas también habrá que tomarse en cuenta, si ésta es alargada, afilada, plana y sin caras de fractura, se perderá una estructura granular estable y por ende una capacidad de soporte aceptable.

Cuando sea necesario importar agregados de un banco de préstamo se recomienda que éstos, se dividan en el mayor número práctico de fracciones, de modo que cada uno de ellos pueda **manejarse y almacenarse por separado**, de preferencia sobre superficies niveladas, de no ser así debe construirse una plantilla de concreto sobre o de suelo-cemento para **evitar la mezcla de los agregados con el suelo in situ**.

Se aconseja que los agregados se almacenen en tolvas de sección transversal reducida, de preferencia que en su parte inferior dispongan de compuertas para su transporte al lugar de almacenamiento en camiones de volteo u otro tipo apropiado.

No se aconsejan almacenamientos en forma de pilas cónicas de gran altura. El tiempo que permanezcan almacenados los agregados será el mínimo necesario, haciendo uso de éstos en el orden cronológico de su llegada. Cuando los agregados, especialmente la arena hayan sido clasificados por vía húmeda, se deberá dejar transcurrir un lapso mínimo de 48 hrs buscando que su humedad sea uniforme.

| Substancias a suprimir en los agregados | Motivo | % máx en peso del total |
|--|--|---|
| Impurezas orgánicas | Afectan condiciones de inicio y resistencia que provoca deterioro, retrasa e inhiben el fraguado del cemento | < 1% |
| Materiales más finos que la malla No.200 (75 µm) | Afectan el enlace químico y aumenta la cantidad de agua requerida | 3% |
| Carbón, lignita u otro material de baja densidad | Afectan la durabilidad y pueden causar manchas | 3% al 5% |
| Terrones de arcilla | Afectan la trabajabilidad y durabilidad, producen puntos débiles en el material | gruesos < 0.25% finos < 1% |
| Sulfatos y sulfuros | Si el cemento hidratado reacciona con ellos forma sulfoaluminato de calcio (etringuita), ácido sulfúrico y óxido de hierro. los que terminan ocupando un volumen mayor al inicial provocando la expansión y desintegración del material tratado [12] | azufre total < 1% SO ₃ < 0.8% |

6.2.5 Calidad del agua

El agua deberá ser razonablemente limpia, sin olor aparente, color y/o sabor; además de estar libre de cualquier **cantidad objetable de materia orgánica, álcalis u otras impurezas** que puedan causar detrimento en la calidad de la mezcla y curado. Se prestará especial atención a que el agua esté exenta de aceites y grasas. La relación agua/cemento es sin duda la más importante en el desarrollo y obtención de la resistencia proyectada f'c, a mayor cantidad de agua menor resistencia.

[12] López Agui, Juan C. Estevez Gállego, José M. Manuales y recomendaciones. Manual de firmes con capas tratadas con cemento. Instituto Español del cemento y sus aplicaciones. CEDEX. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Ministerio de Fomento. IECA. 2003. España p. 59.

Las fuentes de abastecimiento del líquido serán las indicadas o aprobadas por el ingeniero responsable de la ejecución de los trabajos y deberá cumplir con los parámetros que estipule la norma NMX C-122 ver tabla 6.9.

Para fines de reciclado no se considerarán aquellas aguas sulfatadas, cloruradas, marinas, magnesianas e industriales por tratarse de aguas cuyo contenido forma compuestos químicos que atacan al cemento, inhiben el proceso de fraguado, pero sobre todo porque dañan la sensibilidad de los instrumentos en los equipos.

| Impurezas | Cementos Ricos en Calcio | Cemento resistente a sulfatos |
|-----------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Sulfatos (SO_4^{2-}) | 3000 ppm | 3500 ppm |
| Magnesio (Mg^{2+}) | 100 ppm | 150 ppm |
| Alcalis totales (Na^+) | 300 ppm | 450 ppm |
| PH | < 6 | < 6.5 |

Tabla 6.9 Límites máximos permisibles

Las aguas que excedan los límites enlistados para sulfatos y magnesio, podrán emplearse si se demuestra que la concentración calculada de estos compuestos en el agua total de la mezcla, incluyendo el agua de absorción de los agregados u otros orígenes, no exceda dichos límites.

Cuando se use cloruro de calcio (CaCl_2) como aditivo acelerante, debe tomarse en cuenta el dosificado para no exceder el límite de cloruros establecido (ACI 318)

6.3 Estabilización con emulsión asfáltica y asfalto espumado

A nivel mundial es ampliamente conocido el uso que tiene el asfalto como agente estabilizador, ya sea en forma de espuma o de emulsión. Resulta notable la manera en que estos productos proporcionan la cohesión necesaria a los suelos, quizá en parte porque la misma naturaleza del material de consistencia pegajosa (No olvidemos que su origen corresponde al de un elemento disperso en una fase continua –como lo es el agua- el diámetro de sus partículas oscila entre 3 y 9 micras) actúa como ligante, contribuyendo significativamente al aumento de resistencia inmediata cuando el suelo adolece de esta propiedad.

Está de sobra decir que el suelo debe poseer una relación adecuada entre finos y gruesos que a priori adviertan un mínimo de fricción interna. Se recomienda para estabilizar materiales que no presenten un alto índice de plasticidad.

Ahora bien, si el suelo posee por sí mismo una capacidad portante considerable, se produce un **efecto impermeabilizante** con la incorporación del asfalto.

Se sabe por ejemplo que los materiales a los que se adiciona asfalto presentan un contenido de vacíos que yace entre un 10% y 20% lo que los hace comportarse de manera muy similar a la de un material granular. Esta misma consistencia (viscoelástica) es la que nos hace suponer además que el material estabilizado estaría en condiciones de soportar esfuerzos de tensión repetitivos, no obstante habrá que tener cuidado de que el asfalto no recubra a las partículas de un suelo de forma indiscriminada, ya que de ser así, podría actuar **como si se tratara de un lubricante**; por ello es importante tener un control sobre aspectos relacionados con la dosificación del mismo. Lo ideal es que se forme una película delgada posterior a la mezcla y pulverización. A este proceso de atracción de las partículas de asfalto a los agregados y la reducción de la magnitud de carga en los mismos se le conoce como "tiempo de ruptura".

En general se tienen dos tipos de emulsiones asfálticas: **aniónicas y catiónicas** que difieren en principio por el tipo de carga que poseen como resultado de añadirles sodio las primeras (carga negativa) y cloro a las segundas (carga positiva).

Por ejemplo, si se trata de emulsiones asfálticas se debe procurar que el contenido de fluidos, es decir la relación humedad/densidad, no sea demasiado alta pues de ser así se desarrollarán presiones hidráulicas que originan la expansión, disminuyendo la fricción interna y generando una mezcla esponjosa, inestable y difícil de compactar.

Una manera de corregir el problema medianamente es añadiendo cemento o bien dejando que el material fresado pierda su humedad a través de secado al aire libre procediendo posteriormente a su estabilización. Sin embargo, a diferencia del material que se estabiliza con cemento, **el asfalto no padece** los efectos típicos de **agriamiento por contracción**.

6.4 Estabilización con Cal

Los cambios de volumen asociados a variaciones en el contenido de humedad **que provocan las arcillas de alta plasticidad** regularmente dificultan el escarificado y pulverizado de elementos gruesos –se requiere conseguir **grumos inferiores** a los 30 mm en capas de terraplén y 20 mm para la corona o capas superiores- la homogenización de la mezcla y la compactación. Sin embargo al suministrar una pequeña cantidad de cal (viva o apagada del 2 al 7%) se reduce su índice de plasticidad, aumenta su índice CBR o capacidad portante, disminuye y aumenta simultáneamente la densidad y humedad óptimas correspondientes, en la práctica de los ensayos Proctor.

Además, la adición de cal al suelo **produce silicatos y aluminatos de calcio** hidratados que al irán ganando **resistencia** a la compresión simple conforme existan en cantidad suficiente como para lograr que se dé ese efecto aglutinante. De la combinación entre ambas propiedades cementantes será la magnitud de la resistencia alcanzada. **No recomendándose** utilizar la cal para suelos demasiado plásticos o con grava por entorpecer las operaciones de mezclado in situ.

Por otra parte el tipo de equipo del que se disponga, la experiencia probada de los operarios y las condiciones ambientales; principalmente **el viento**, influirán de manera directa sobre la elección de un sistema que emplee cal viva o cal apagada. Si las condiciones que imperan durante las distintas fases del proceso, sobre todo aquellas que tienen que ver con el extendido y mezclado son automatizadas entonces la **cal viva** dará mejores resultados, por el contrario si lo que abunda es la mano de obra y se tienen ciertas medidas de seguridad sobre todo en lo concerniente a posibles quemaduras o bien si el volumen del suelo a estabilizar no es de consideración, resultará ser más eficaz el uso de la **cal apagada**.

En general el espesor de una capa estabilizada con cal suele abarcar únicamente los primeros 25 o 30 cm superiores pues tiende a esponjarse si se supera este límite dificultando su compactador posterior.

Para comprobar que la cantidad de cal haya sido la correcta regularmente se mide el pH del suelo, el cual debe ser aproximado a un valor de 12.4. La forma de hacerlo consiste en adicionar al suelo estabilizado una cierta cantidad de sacarosa para luego neutralizarlo añadiendo ácido bórico.

Un suelo estabilizado con cal también requiere ser curado, esto se consigue ya sea mediante la aplicación de un riego asfáltico (dotaciones del orden de 0.5 a 1.0 kg/m² de acuerdo al tipo de terreno) o bien rociando agua por espacio de 5 a 7 días según lo permita el clima.

| Tipo de cal | Ventajas | Desventajas y consideraciones |
|-------------|---|--|
| Viva | <ol style="list-style-type: none"> 1. Disminuye considerablemente la humedad del suelo 2. Es más densa 3. Contiene más iones calcio que reaccionan mejor con el suelo 4. Ideal para equipos capaces de escarificar, triturar, mezclar, dosificar y extender el material, que cuenten con carcasa protectora, ya que no constituye riesgo alguno para quienes los operan | <ol style="list-style-type: none"> 1. Demanda personal capacitado 2. Suspender extendido en casos de viento 3. Uso de guantes, mascarillas, gafas protectoras y ropa de algodón 4. Botiquín de primeros auxilios en caso de presentarse quemaduras |
| Apagada | <ol style="list-style-type: none"> 1. Seguridad en el manejo de la cal 2. Recomendable cuando se emplean máquinas convencionales 3. Aconsejable para largos tiempos de espera entre distintas fases del proceso | <ol style="list-style-type: none"> 1. Se pueden formar zonas longitudinales con diferentes dotaciones de cal de no tener cuidado con la distribución en sacos al instante de formar cuadrículas 2. Posponer el extendido de cal a causa del viento |

6.5 Ventajas de la estabilización

1. Incremento de la resistencia a la compresión simple y a la flexión
2. Alivio de esfuerzos a tensión al interior de la nueva capa
3. Aumento en la capacidad de carga (medidos a partir de las pruebas de placa expresados en función de módulo k)
4. Disminución de la plasticidad
5. Aumento del índice CBR
6. Disminuye la permeabilidad
7. Pronta apertura al tráfico como consecuencia de la estabilidad inmediata. Como el material tratado tiene un arreglo suficiente entre sus partículas (cohesión) tras la compactación ya no debe experimentarse deformaciones
8. Aumento del ángulo de rozamiento interno

6.6 Cuadro comparativo

| Agente estabilizador | Ventajas | Desventajas |
|----------------------|---|---|
| Cemento | <ol style="list-style-type: none"> 1. El cemento se consigue fácilmente ya sea en sacos o a granel 2. Es más barato que el asfalto 3. Mejora las propiedades de resistencia a la compresión de muchos materiales | <ol style="list-style-type: none"> 1. El agrietamiento es propio de su naturaleza e inevitable 2. Incrementa la rigidez pero resiste menos la fatiga 3. Requiere ser curado apropiadamente |
| Emulsión asfáltica | <ol style="list-style-type: none"> 1. Su empleo proporciona al material características visco-elásticas > fatiga 2. Es un material ampliamente estudiado por lo que se tienen muchos métodos estándar de ensayo y especificaciones | <ol style="list-style-type: none"> 1. Las emulsiones asfálticas no se fabrican en el sitio además de ser costosas. 2. Su curado puede tomar mucho tiempo, por lo que desarrollar su resistencia está condicionado por la pérdida de humedad |
| Asfalto espumado | <ol style="list-style-type: none"> 1. Fácil de aplicar 2. Los materiales tratados con él disfrutan de una buena resistencia tanto a la deformación como a la fatiga 3. Se puede abrir al tráfico inmediatamente a su colocación. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Resulta indispensable contar con un sistema de calentamiento cuando menos similar a los 170°C 2. La calidad del material estabilizado depende de las características de la espuma |

Introducción

Como hemos visto, a lo largo de cada una de las etapas que integran la ejecución del reciclado, participan diversos **equipos especializados** todos ellos, en el quehacer de una cierta actividad. Su selección en número y orden de aparición, depende en gran medida de la magnitud de la obra, la logística de los trabajos (de principio a fin) y la calidad exigida del producto final. Por ello, les dedicamos este capítulo resaltando su importancia y el tipo de funciones que son capaces de desempeñar.

7.1 Dispersores de cemento

También conocidos como distribuidores de conglomerante, se ocupan para aplicar el agente estabilizador en forma de polvo; en este caso, cemento en seco. Sobre la superficie de la carretera. Consisten en camiones-silo que en su parte posterior cuentan con una **compuerta "regulable"** por donde el material sale con cierta imprecisión extendiéndose conforme se desplaza el vehículo o remolque.

Aunque en la actualidad ya existen algunos equipos que disponen de sistemas electrónicos para controlar la dosificación del material (kg/m^2), la velocidad de avance y la distancia recorrida, la emisión del polvo sigue siendo el principal inconveniente de esta práctica.

Los parámetros más significativos de estos equipos son:

- a. Capacidad de almacenamiento del producto: entre 8 y 30 m^3
- b. Ancho variable de reparto: entre 2.2 y 2.9 m –ajustable en función del traslape que sea necesario precisar-

7.2 Equipos recicladores/recuperadores del pavimento

Sin duda, la pieza clave de esta clase de equipos lo constituye el **rotor fresador**; elemento que, provisto de picas o paletas es el encargado de fresar, disgregar y promover la mezcla del viejo material con el agua y cemento que posteriormente se añadirán en cantidad y proporción suficientes. El eje del tambor está montado sobre cojinetes en un extremo dentro de la caja de engranaje y en el otro; sobre un rodamiento axial, sellado con engrase permanente. Como el giro del mismo, fue concebido para "**arrancar de tajo**" el pavimento que encuentre a su paso –gracias a la fuerza centrífuga producida por la gran masa del rotor- la disposición que guardan las picas y paletas es helicoidal de tal forma que existe espacio suficiente para mezclar el material en el caso de trabajar a una gran profundidad favoreciendo así, el escarificado y la homogenización del material en su conjunto.

Cuando se trata de reciclar firmes resulta más apropiado **montar picas con puntas** de widia o tungsteno a los rotores de fresado, que ensamblar puntas trituradoras rectas o en forma de "L" que más bien sirven para llevar a cabo estabilizaciones.



Fig 7.1 Picas o puntas de widia o tungsteno de rápido intercambio

El orden de colocación de las picas posibilita el funcionamiento suave del reciclador, protege los componentes y garantiza la longevidad de la máquina.

Por lo que toca al número de las mismas, estas últimas mantienen una proporción de 2 a 3 veces menor al de las picas. Así por ejemplo encontramos 78 frente a 188, 75 frente a 214, etc por citar sólo algunos ejemplos. Su número identifica el diámetro recubierto por tungsteno.



Fig 7.2 Rotor de recuperación para máxima fuerza de desprendimiento

A mayor dureza del material y mayor caballaje (Hp) será mayor su valor numérico. Como es lógico, dependiendo el material a fresar será necesario reponer una proporción importante de las picas o incluso su totalidad conforme transcurre la jornada de trabajo. Así tenemos que en firmes de áridos calizos o silico calcáreos, con más del 60% de caliza es conveniente **canbiarlas** diariamente **por completo**. **Con materiales más duros y abrasivos**, suele ser necesario **reemplazar** las picas hasta en dos ocasiones durante la misma jornada –a medio día y por la noche- pero si la abrasividad es aún mayor habrá que sustituirlas todas sin excepción disminuyendo el tiempo de espera entre cambio y cambio. Por esta razón, las picas se alojan en los portapicas mediante sistemas a presión (trépanos) lo que facilita su remoción sin necesidad de cortar o soldar(sistema patentado por Wirtgen Group).



Fig 7.3 Reemplazo de rotor fresador

7.2.1 Principales características generales de los equipos:

A. Empleados indistintamente tanto en la estabilización del suelo como en el reciclado de pavimentos (Ej. Wirtgen 2500S, Caterpillar RM350, HammRaco350, Bomag MPH 121)

1. Carcasa protectora de altura regulable, ideal para ajustar el volumen de la "cámara de mezclado" de acuerdo con la profundidad del fresado (0 a 500 mm). A mayor profundidad y mayor volumen, mayor rendimiento.
2. Gracias a un regulador de potencia encargado del control de las revoluciones se facilita el trabajo y el desplazamiento de la máquina en terrenos de difícil acceso (especialmente aquellos con cuestas sin capacidad de soporte)

3. Neumáticos sobredimensionados con tracción independiente
4. Transmisión hidráulica que le permite elegir de entre cuatro velocidades de avance distintas, procurando que el motor trabaje siempre próximo a su par óptimo.



Fig 7.4 Equipos para el reciclado de pavimento (de izq a der. BomagMPH121, HammRaco 350 y Caterpillar RM350)

5. Rotor fresador de gran alcance lateral e inclinación, capaz de adaptarse a condiciones con pendiente transversal, girando en el mismo sentido o a contramarcha.
6. Sistemas independientes de inyección para el suministro de agua y cemento/emulsión al interior de la carcasa.
7. Microprocesador responsable del suministro controlado del conglomerante.
8. Rampa de riego para la salida uniforme de lechada o emulsión conforme al ancho de trabajo.
9. Dispositivos eléctricos para el cierre individual de las toberas durante los trabajos de traslape en tramos paralelos o limpieza de las mismas.
10. Control de todas las funciones operativas mediante un panel de instrumentos lógicos.
11. Tablero funcional que permite leer los siguientes valores –horas de servicio, presión de aceite, temperatura del motor, temperatura del aire de sobrealimentación, temperatura del aceite, temperatura del engranaje (rodillo), número de revoluciones del motor, nivel de depósito de diesel, grado de obstrucción de los filtros-.
12. Anchos de fresado entre 2.438 y 3.048m
13. Potencias máximas del orden de 300 a 1200 HP.
14. Instalación eléctrica compuesta por un equipo de 24V, con alternador y dos baterías de 12V necesarias para arrancar el motor, enchufes, bocinas e iluminación interior.
15. Compuerta trasera para la salida del material
16. Anillas de sujeción ideales para su amarre, manipulación y carga mediante grúa hacia trailers de "camas bajas".
17. Garantía de contar con refacciones cuando éstas se requieran localmente o en 48hrs vía aérea (soporte técnico) que representa un importante ahorro de tiempos muertos.



Fig 7.5 Equipos para el reciclado de pavimentos II (de izq a der. Wirtgen 2500S, 2500SK y eq. Kenworth-Goldhofer)

B. De reciclado derivados de las fresadoras de pavimentos (Ej. Wirtgen 2200 SM, Alemania)

1. Cámara de mezclado donde se aloja el rotor fresador, provista de un sistema doble de toberas para entrada de líquidos.
2. Cuñas deslizantes situadas por delante de la cámara; responsables de impedir que penetren en la misma las placas que se forman al recuperar el pavimento, sobretodo cuando el ligante yace demasiado agrietado o envejecido.
3. Sin fin ajustable localizado en la parte posterior de la máquina encargada de distribuir la salida del material.
4. Regla vibrante de precompactación, de inclinación también ajustable.
5. Microprocesador, de quién depende el suministro de agua y emulsión, cemento-emulsión o simplemente lechada.
6. Regulación de la velocidad de avance en función de la resistencia (oposición) del material encontrado por el equipo y la profundidad.
7. Potencias del orden de 600 HP y ancho de trabajo de 2 m
8. Máxima profundidad recuperada: 40 cm



Fig 7.6 Equipos derivados de fresadoras de pavimentos montados sobre orugas

C. Que realizan por separado las operaciones de fresado y mezcla
(Ej: ARC 700 Francia)

1. Escarificado del firme mediante rotor compuesto por picas de widia o tungsteno
2. Eje longitudinal al interior del equipo dotado de paletas, encargado de la mezcla e independiente del rotor.
3. Sin fin posterior que distribuye el material.
4. Regla de nivelación
5. Potencia del motor 750 HP y ancho de trabajo igual a 2 m
6. Máxima profundidad recuperada: 33 cm

7.3 Dosificadoras de cemento en forma de lechada

En principio esta clase de equipos resultan adecuados cuando las condiciones del sitio demandan:

1. Un alto grado de precisión en la tasa de aplicación del cemento
2. Abatir la contaminación que por acción del viento (nubes de polvo) se producen cuando se esparce cal o cemento sobre un suelo a estabilizar o cuando se recicla en frío con equipo común.

Gracias a su diseño innovador las dosificadoras de cemento actuales combinan sin ningún problema de manera simultánea agua y cemento en cantidad y proporción exactas en función del peso del material tratado, la velocidad de avance, la densidad del material y la profundidad a recuperar.

Así por ejemplo equipos como Wirtgen WM1000 que cuentan con una salida máxima de 1000 litros de lechada de agua/cemento por minuto, son capaces de suministrar el producto necesario para estabilizar espesores de hasta 300 mm con 4% de cemento y a una velocidad de avance superior a 10 m/min con una sola cuba de 25 m³ de cemento y un tanque de agua de 11000 litros.



Fig 7.7 Dosificadora de cemento en forma de lechada

Claro que si la humedad del firme está muy próxima a la de compactación será conveniente suspender la aportación de lechada mientras se orea el material a reciclar. La mezcladora de lechada está diseñada en forma de contenedor, montada sobre un trailer compuesto por 5 ejes capaces de soportar y transportar los tanques que "generosamente" dimensionados almacenan el agua y cemento. Un microprocesador es el encargado de integrarlos de manera predeterminada para luego ser bombeados hacia la recicladora que los irá solicitando conforme avance sobre el terreno en cuestión.

En un tren de reciclaje compuesto de asfalto/cemento en lugar que ocupa la dosificadora es siempre detrás del carrotrunque de asfalto quien encabeza el contingente y por delante como ya dijimos del equipo reciclador.



Capítulo VIII **CONCLUSIONES**

Como acabamos de ver, implementar estrategias de recuperación a través del reciclado in situ con cemento Pórtland es una medida que si bien resuelve aquellos problemas que aquejan a la estructura con resultados muy alentadores, requiere también de la comprensión y difusión del conocimiento necesarios para su puesta a punto, haciendo de esta práctica un proyecto bastante ambicioso.

No obstante, las innovaciones tecnológicas que en materia de equipos se ha venido presentando fomenta su preferencia versus otras formas convencionales de estabilización y mejora de la calidad y capacidad portante del firme siendo quizá las más importantes aquellas relacionadas con la profundidad del rescate y el impacto que genera hacerlo con el mismo material.

El aprovechamiento óptimo de las características que posee el firme inicial más la correcta ejecución de los trabajos serán un factor decisivo en la obtención de un producto final, con la calidad suficiente como para cumplir con las expectativas que desde un principio se tenía contemplado satisfacer.

Referencias Bibliográficas

- Atkins, Harold. Highway material, soil & concrete. Ed. Reston Publishing Co Inc. Prentice-Hall. Ontario, Canadá 1980
- Crespo Villalaz, Carlos. Vías de comunicación. Caminos, Ferrocarriles, Aeropuertos, Puentes y Puertos. Ed. Limusa México. Capítulo IX Estabilizaciones.
- Especificaciones generales y técnicas de construcción. Capítulo X. Fabricación y colado de concreto. D.D.F. Secretaría de Obras y Servicios. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. México. 1980.
- Garnica, Gómez y Sesma. Mecánica de materiales para pavimentos. Publicación Técnica No. 197. 2002 Sanfandilla, Querétaro. México S.C.T
- Guide to selection and use of Hydraulics Cements ACI 225R-85, E.U.A.1985.
- Jofré, Carlos. La Técnica del reciclado de firmes con cemento. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. Salamanca, España. 1er Simposio Internacional sobre estabilización de explanadas y reciclado in situ de firmes con cemento. 1 al 4 Octubre 2001.
- Juárez, E. Rico, A. Mecánica de suelos. Fundamentos. Tomos I y II. México. Ed. Limusa.
- Laboratory Study of Full-Depth reclamation mixes. Transport. Research Record 1813. PCA. Skokie, Illinois, E.U.A
- London, AA & Partners. Cold deep in place recycling: Technical Recommendations and application specification, publication. Sudáfrica. 1995.
- López Agüi, Juan C. Gállego Estevéz, José M. Manuales y recomendaciones. Manual de firmes con capas tratadas con cemento. Instituto Español del cemento y sus aplicaciones CEDEX. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Ministerio de Fomento. IECA. 2003. España.
- López, Bob. Prusinski, Jan. Carreteras recicladas con cemento. Cement & Concrete Council of Texas PCA. 1998.
- Manual del constructor. Cemex Concretos. México. 2003. Capítulos IV Fabricación y propiedades del cemento Portland VI Pavimentos de concreto Hidráulico
- Martínez Muro, José E. Rojo López, Julián. Teoría y práctica de la compactación de suelos. Dynapac. España. 1988.
- McKeen, R. Gordon. Relation of field cracking to layer stiffness of cold in situ recycled materials. Transportation Research Record 1684 paper No. 99-1243. University of New Mexico. Albuquerque NM. 1996.
- Monilla Abad, Ignacio. Control de calidad en obras carreteras. AIPCR. SEOPAN. PIARC. Asociación Española de la carretera. Madrid. Octubre 1989.
- Oglesby, Clarkson. Ingeniería de carreteras. Ed. Continental. México 1969. Capítulo XVI Bases.
- Proctor, R.R. The Design and Construction of Rolled Earth Dams. Engineering News Record. Vol. 111, No. 9. E.U.A
- Pavimentos de concreto, diseño y construcción. Juntas, sobrecarpetas y apertura rápida al tráfico. American Concrete Pavement Association. 1994.
- Proyecto de pavimentación con suelo cemento. Gerencia Nacional de Infraestructura y Vías Terrestres. Cemex México. Marzo 2004.
- Rivera, Gustavo E. Reciclado de pavimentos en frío empleando emulsiones asfálticas catiónicas. Ed. Alfa-omega. México. 1997.
- Recycling Failed Flexible Pavements with Cement. Concrete Information. PCA. Skokie, Illinois. E.U.A
- Wirtgen GmbH. Cold deep in place recycling. 2nd Ed. Review. Alemania. Septiembre 2001