

300615

12  
29



**UNIVERSIDAD LA SALLE**

ESCUELA DE INGENIERIA

INCORPORADA A LA U. N. A. M.

**“ APLICACION DEL CONCRETO COMPACTADO CON  
RODILLOS (CCR) A LA PAVIMENTACION ”**

**TESIS PROFESIONAL**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

**I N G E N I E R O   C I V I L**

P R E S E N T A

**SERGIO MANUEL MARQUEZ VALENZUELA**

Director de Tesis: M. en I. Francisco Javier Ribe Martínez de Velasco

MEXICO, D. F.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

1990



## **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 está 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.

## I N D I C E

	introducción.....	1
I	Aplicaciones actuales del concreto compactado con rodillo.....	6
I.1	Generalidades.....	7
I.2	Aplicaciones en América.....	10
I.3	Aplicaciones en Europa.....	26
II	Características del concreto compactado con rodillo.....	29
II.1	Generalidades.....	30
II.2	Características importantes.....	33
II.3	Ventajas y desventajas.....	41
II.4	Comparación de concreto contra asfalto.....	48
III	Pruebas de laboratorio para concreto compactado con rodillo.....	55
III.1	Ensayos característicos en laboratorio.....	56
III.2	Ensayos característicos en obra.....	61
IV	Método constructivo de pavimentos de concreto compactado con rodillo.....	66
IV.1	Aspectos generales de construcción.....	67
IV.2	Pavimento de CCR en la autopista México-Cuernavaca.....	78

V	Control de calidad para el concreto compactado con rodillo.....	96
V.1	Programa de control de calidad.....	97
V.2	Elaboración de mezclas de CCR y pruebas realizadas.....	102
V.3	Control de CCR en la obra.....	107
	Conclusiones.....	109
	Referencias.....	115

**I N T R O D U C C I O N**

La industria de la construcción, afectada por el difícil panorama económico que cursa el país, ha estado investigando e implantando nuevos sistemas y procedimientos constructivos, que permitan la ejecución de grandes obras de una manera eficaz, segura y económica.

Por lo anterior, una de las técnicas que empiezan a tener éxito en la construcción de importantes proyectos de infraestructura nacional es la del concreto compactado con rodillos, (CCR).

El concreto compactado con rodillos (CCR), es un material que está teniendo gran aceptación sobre todo, en pavimentación, debido a las pesadas cargas que es capaz de soportar y a su bajo costo.

El término "pavimento de CCR" se refiere normalmente a instalaciones donde el concreto compactado con rodillos es la superficie de rodamiento, sin la aplicación de ninguna otra capa de material.

Se ha observado en varios países como Australia, Canadá, Estados Unidos, España y otros más, que la técnica del concreto compactado con rodillos (CCR), se ha aplicado con éxito en la construcción de pavimentos, áreas de estacionamiento y patios de maniobras que cumplen con determinados requisitos de seguridad y calidad.

En México se han invertido en el periodo 1983-1987, más de 670,000 millones de pesos, para la reconstrucción y conservación del 70% de la red carretera nacional y el 25% de los caminos rurales, por lo que es necesario implementar técnicas de diseño y construcción que permitan lograr mejores pavimentos; una de estas técnicas es sin lugar a dudas, la técnica del concreto compactado con rodillos (CCR).

El campo de las repavimentaciones es actualmente muy importante puesto que en muchos países las redes principales están construidas y muchas veces deterioradas, y lo que se está haciendo son refuerzos de esas redes. En estas obras, los concretos compactados son buenos competidores de otras alternativas.

En los pavimentos de concreto compactado con rodillos, en los que el mezclado, transporte y tendido de material se realiza con maquinaria de uso corriente, sin necesidad de utilizar cimbras, juntas de colado ni acero de refuerzo, el costo inicial es comparable al de un pavimento asfáltico de la misma capacidad de carga, en tanto que su costo de mantenimiento a lo largo de la vida útil de un camino equivale a la décima parte de lo que cuesta mantener el pavimento asfáltico.

Por otra parte, es preciso considerar que en los costos de los pavimentos asfálticos no se hace mención a que el asfalto es un producto subsidiado en nuestro país y que, si se desea entrar en una modernización real, es necesario eliminar los subsidios innecesarios.

Una serie de ventajas del tipo económico, la no necesidad de maquinaria especial, la posibilidad de apertura inmediata a la circulación, y un abanico variado de aplicaciones son las causas principales del nuevo gran interés por este material de construcción, tanto para la construcción de presas como para pavimentos para resistir grandes cargas, su economía se debe en gran parte a que se transporta y se coloca en grandes cantidades en poco tiempo y con mano de obra mínima mediante el uso de equipo para movimiento de tierras. La mezcla que es de cero revenimiento es colocada con maquinaria para asfalto ( Finisher ), y es compactada con rodillos vibratorios.

En países sin tradición de construcción de pavimentos de concreto, los contratistas estaban equipados para la ejecución de pavimentos asfálticos y no tenían posibilidades económicas de comprar equipo también para hacer concreto. Con esta tecnología del concreto compactado con rodillos (CCR), tuvieron la facilidad de aplicar la misma maquinaria de extendido y compactación con que ya contaban las empresas constructoras.

El concreto compactado con rodillos (CCR), se elabora -- con agregado grueso, arena, cemento, agua y aditivos (si -- son necesarios). La principal diferencia con el concreto -- convencional es que el CCR tiene una consistencia seca con revenimiento cero, y una apariencia similar a la de una base estabilizada con cemento. Esta última tiene menos cemento que el CCR y requiere de una protección contra la abrasión del tráfico, mientras que el CCR tiene que ser lo suficientemente rico en cemento para proporcionar una resistencia igual o mayor que la del concreto convencional, sin requerir de una superficie extra de protección.

Hasta ahora la técnica de pavimentar con concreto compactado con rodillos ha sido empleada exitosamente en áreas -- de estacionamiento para maquinaria pesada, áreas de almacenamiento y caminos para camiones de carga pesada. Recientemente se ha usado en áreas de estacionamiento para aeronaves en aeropuertos, sin embargo, el potencial de esta técnica pudiera ser extendido para cubrir mucho más de lo que -- hasta la fecha se ha visualizado.

El uso del concreto compactado con rodillos puede proporcionar un ahorro significativo en tiempo y costo de construcción cuando se le compara con el concreto convencional. Recientes investigaciones indican que el concreto compactado con rodillos puede proporcionar alta capacidad estructural.

ral, excelente durabilidad y una textura superficial aceptable.

C A P I T U L O I

"APLICACIONES ACTUALES DEL CONCRETO COMPACTADO  
CON RODILLO".  
(CCR).

## I.1: Generalidades

Una técnica relativamente nueva para construir caminos - de bajo volumen de tráfico se está volviendo popular. Empleando concreto hidráulico con una consistencia tan seca - que puede ser colocado con equipo convencional para movimiento de tierras o equipos para pavimentación asfáltica, - la técnica del concreto compactado con rodillos puede proporcionar un ahorro significativo en tiempo y costo de construcción cuando se le compara con el concreto convencional.

En países sin tradición de construcción de pavimentos de concreto, los contratistas estaban equipados para la ejecución de pavimentos asfálticos y no tenían posibilidades económicas para hacer de concreto; esta tecnología permitió emplear la misma maquinaria de extendido y de compactación -- que ya tenían las empresas constructoras.

El CCR es una mezcla de agregados, cemento, ceniza volante si está disponible y agua; cuya consistencia es muy semejante a la de los concretos de revenimiento cero. Por otra parte, el agua que se utilice debe ser la suficiente para hidratar el cemento portland y por otra, la necesaria para que el equipo de compactación a base de rodillos lisos vibratorios, pueda lograr la máxima densidad de la mezcla.

Aunque existen aplicaciones documentadas de algo parecido al CCR desde los años cuarentas, no es sino hasta mediados - de los setentas, cuando se organiza y estructura esta tecnología, tanto en sus aplicaciones en presas como en pavimentos.

Hasta ahora la técnica de pavimentar con concreto compactado con rodillo (CCR), ha sido empleada exitosamente en -- áreas de estacionamiento para maquinaria pesada, áreas de almacenamiento y carreteras para camiones de carga pesada. recientemente se ha usado en zonas de estacionamiento para

aeronaves en aeropuertos, una posible área de aplicación es la construcción de caminos secundarios o de bajo volumen de tráfico.

En realidad, la utilización del hormigón seco en carreteras constituye un retorno a los orígenes de los pavimentos de concreto. Se pueden citar como ejemplo a este respecto - el caso de Francia, en donde la puesta en servicio de la -- primera auténtica carretera de concreto se remonta a 1925, -- cerca de Arras. El pavimento se construyó en aquella oca--- sión mediante compactación con rodillo, de forma análoga a una calzada de material granular.

**1.2: Aplicaciones en América**

SUS APLICACIONES EN ESTADOS UNIDOS

El uso del concreto se ha diversificado en el mundo entero con excelentes resultados; sin embargo, la utilización - que de él se hace en un país no siempre es similar a la de otros. Así sucede que muchas aplicaciones del concreto en - los Estados Unidos no son directamente aplicables en México. Por ello es necesario escribir acerca de la industria del - concreto de los E.U.A. para que así sea posible establecer comparaciones con las condiciones mexicanas.

Cuáles son los principales usos del cemento en los Estados Unidos?

a) En pavimentación y transportación se utilizó un 22% (Carreteras, aeropuertos, ferrocarriles, calles, y caminos locales y pavimentos industriales.)

b) Construcción de edificios bajos 51% (Edificios de menos de 4 pisos de altura, incluyendo tiendas, fábricas, edificios comerciales, residencias y trabajos aplanados alrededor de las estructuras.)

c) Construcción ingenieril 15% (Edificios altos, puentes, instalaciones de defensa).

d) Instalaciones para agua y deshechos 8% (Presas, tuberías, alcantarillado, tratamiento de aguas, -- plantas generadoras de energía eléctrica).

e) Usos misceláneos 4% (Agrícolas, pozos petroleros, minería, etc.).

A continuación veremos algunas de las aplicaciones específicas del concreto en el pasado, en la actualidad y en el futuro, de acuerdo con los mercados particulares.

El primer mercado por analizar es el de pavimentos y -- transportación. Este es un mercado que puede ser muy inten-

sivo en cuanto al uso del concreto, es decir, que la cantidad de concreto utilizado por cualquier cantidad de dinero dada puede ser mayor en comparación con otros usos. La competencia desde luego, es de asfalto y es intensa. Pero el factor principal que determina la toma de decisiones es si la vida más duradera y el menor costo de mantenimiento del concreto pueden justificar su pequeño costo adicional inicial.

Por lo general, el concreto es el material con el costo más bajo por el ciclo de vida, debido al alto costo de mantenimiento y frecuente reparación de las superficies de asfalto.

El concreto de consistencia seca puede colocarse y compactarse in situ igual que el asfalto con la excepción de que no necesita calentamiento.

En Alemania se diseñó un nuevo equipo que se está utilizando en Estados Unidos. Tiene vibradores en los separadores que proporcionan una distribución más pareja del material para el compactado final. El concreto compactado con rodillos ha sido utilizado con éxito en pavimentos para servicio pesado, tales como parques para contenedores y patios de aserraderos donde la textura de la superficie no es importante. El proyecto más grande de concreto compactado con rodillos, hasta la fecha, se está llevando a cabo en Port Drum, Nueva York; cubriendo una extensión de 420,000 yardas cuadradas.

Probablemente muy pocos saben que el concreto compactado con rodillos se originó tal vez en el otoño de 1923 en el camino de Sheridan en Chicago; donde se construyó una losa de concreto de ocho pulgadas de espesor, construida con la técnica conocida como pavimento de concreto comprimido --

"Armorplated". Este histórico método de construcción se anunciaba de la siguiente manera:

"El pavimento de concreto comprimido Armorplated se construye bajo un proceso científico mejorado que se deriva del método vibrolítico de comprimir el aire y el exceso de agua de un concreto plástico utilizando la combinación de fuerzas de vibración y presión aplicadas simultáneamente, lo cual deja una losa con una relación agua-cemento lo más baja posible, y produce un pavimento de resistencia y densidad máximas".

Todas las operaciones de campo del cuerpo de ingenieros del Ejército de Estados Unidos, están recurriendo actualmente al CCR en sus pavimentos; ya que se puede lograr un ahorro en el costo debido principalmente a los procedimientos de construcción, producción, colocación y compactación seleccionados.

El interés del cuerpo de ingenieros del ejército en el empleo de concreto compactado con rodillos para pavimentos, principió en 1970 siguiendo el éxito del uso de CCR para presas. La presa Willow Creek, en Oregon, construida en 1982 contuvo alrededor de 400,000 yardas cúbicas (306,000 metros cúbicos) de concreto compactado con rodillos y fué construida a casi un tercio del costo de una presa de concreto convencional.

#### Pavimento en la estación experimental de vías fluviales.

El primer uso del concreto compactado con rodillos hecho por el cuerpo de ingenieros fué en 1975, cuando una sección de un camino de 105 pies (32 metros) de largo, por 12 pies (3.7 metros) de ancho, fué construido en la estación experimental de vías fluviales en Mississippi; como un estudio de factibilidad; el concreto tenía un tamaño máximo de agregado de 1½ pulgadas (37.5 mm.) con 307 kg. de cemento por metro -

cúbico y una relación agua-cemento de 0.33; mezclado en planta, transportada en camiones de volteo y extendida usando una pavimentadora para asfalto. La compactación se realizó con 6 a 8 pasadas de un rodillo vibratorio, con ruedas de acero o rodillo de llantas. Suficiente agua fué agregada a las llantas de acero del rodillo en las últimas dos pasadas para crear una superficie aceptable en textura. El pavimento fué curado durante 7 días. Después de casi 11 años de servicio, la sección se mantiene en buenas condiciones.

Camino para tanques en Fort Stewart.

En Fort Stewart, Georgia, dos pequeñas secciones de pavimento compactado con rodillo fueron construidas como caminos para tanques, usando la labor de las tropas. La primera sección de 234 pies (71.3 m.) de largo por 20 pies (6.1 m.) de ancho se construyó en 1983. La segunda sección, una serie de 6 secciones de pruebas, se construyó en 1984 como parte de un estudio para evaluar la efectividad en el costo de pavimentos sujetos a tráfico vehicular sobre orugas o carriles.

El concreto usado para ambas secciones tenía tamaño máximo de agregado de 1.5 pulgadas y arena natural con 362 kg. de cemento por metro cúbico y una relación agua-cemento igual a 0.33. Después de dos años de servicio con tráfico de tanques, el pavimento de concreto compactado con rodillo está en buenas condiciones.

Area para tanques construida en Fort Hood.

El primer pavimento importante de CCR en Estados Unidos, fué construido en Fort Hood, Texas, en agosto de 1984 por el Fort Worth District del cuerpo de ingenieros, con la ayuda

da de la estación experimental de vías fluviales. Se trata de una gran área de estacionamiento para tanques y otros - vehículos de orugas, alrededor de un taller de reparacio-- nes y mantenimiento. El colado comprendió un área de - - - 15,050 m<sup>2</sup>. de pavimento con 25.4 cm. de espesor en una so- la operación a un costo aproximado de 76 dólares por cada metro cúbico colado.

La mezcla de CCR contenía 178 kg. de cemento portland y 95 kg. de ceniza volante por cada metro cúbico. La mayor - parte del CCR tenía un agregado de tamaño máximo de 1.5 -- pulgadas con agregado fino separado. Este tamaño de agrega do sí planteó algunos problemas. Se observó una tenden---- cia a la segregación durante el manejo y el acabado de la superficie no era tan bueno como el que se había obtenido, con agregado de tamaño menor. En una área pequeña se em-- pleó agregado de tamaño máximo de 3/4 de pulgada y esta -- mezcla pudo manejarse mucho mejor.

El clima también causó problemas; una temperatura de -- 38°C con fuertes vientos, hizo difícil evitar el secado ex cesivo de la superficie.

#### Patio de carga del puerto de Tacoma.

A principios de la primavera de 1985, el puerto de Taco ma, en Washington, se inició la construcción de la primera de tres áreas de carga a lo largo de las vías férreas en - los muelles teniendo cada una de 29,263 a 41,805 m<sup>2</sup> de pa- vimento de CCR de 30 a 43 cm de espesor. Estas áreas pavi- mentadas se diseñaron para almacenamiento de grandes conte nedores de carga, estacionamiento de remolques y para la - operación de gruas de marco con cargas de eje de 93 tonela das, para el manejo de los contenedores de carga.

Los dos primeros proyectos de CCR en los muelles de Tacoma fueron construidos con equipo similar al que se había venido utilizando, pero en el tercer proyecto se utilizó una nueva pavimentadora alemana de reciente ingreso a los Estados Unidos. La máquina es similar a las pavimentadoras estadounidenses, pero funciona para trabajo más pesado y es capaz de colar un área de 30 cm de espesor de CCR ya compactado; esta equipada con dos llanas apisonadoras que pueden compactar al 94 o 95 % de la prueba Proctor modificada, conforme sale de la pavimentadora.

#### Aeropuerto Internacional de Portland.

A principios de 1985, el aeropuerto de Portland, Oregón, solicitó cotizaciones para la construcción de 34,500 m<sup>2</sup> de plataforma de estacionamiento de aeronaves Jumbo 747. Debido a las condiciones de carga de larga duración, se consideraron como alternativa del concreto asfáltico, tanto concreto de cemento portland como CCR. Cuando recibieron las cotizaciones, las autoridades del aeropuerto seleccionaron la propuesta de CCR, que era aproximadamente 25% más económica que la cotización más baja de concreto asfáltico.

El pavimento de 35.5 cm. de espesor se coló en dos etapas sobre una base granular de 4 a 6 pulgadas. La mezcla consistía en lo siguiente:

- 221 Kg de cemento portland.
- 54 Kg de ceniza volante.
- 119 litros de agua.
- 1931 Kg de agregado de tamaño máximo de 3/4 de pulgada.
- La relación agua-cemento era de 0.43.

Las dos capas iguales se colaron con una pavimentadora similar a la utilizada en Tacoma; ya descrita con anterioridad, La plataforma rectangular fué pavimentada longitudinal

mente con anchos que variaban de 5.5 a 7.3 m. Cada carril longitudinal estaba dividido en tres secciones, de manera que la pavimentadora podía regresar al principio del carril que estaba pavimentado para comenzar a colocar la capa superior antes que la capa inferior tuviera 60 minutos de colocada según lo requieran las especificaciones.

#### Calles del Condado Multnomah.

El bajo costo y el producto terminado de pavimento de CCR en el Aeropuerto Internacional de Portland, permitió a los ingenieros del Condado de Multnomah el considerar la posibilidad de pavimentar las calles del condado con CCR.

Una sección de dos bloques (150 m.) de este proyecto -- fué seleccionada como sección de prueba de CCR para evaluación del condado; así el primer camino público en los Estados Unidos en utilizar el CCR como superficie final -- de pavimento, se realizó en 1985. El tráfico se permitió en el camino después de siete días de la pavimentación.

El condado exigió que los agregados a usarse fueran en las graduaciones estandars y facilmente disponibles; el curado se realizó con la aplicación de una membrana preferentemente en lugar de agua. El material o método de construcción no fué exótico o difícil de reproducir.

Además el condado aprobó la colocación de una mitad -- del proyecto sin compactación, mediante el uso de la pavimentadora con el mecanismo de compactación integrado.

Basados en las experiencias con estas secciones de -- pruebas, el condado planea especificar el CCR como una alternativa en varios proyectos futuros para sus caminos.

### SUS APLICACIONES EN CANADA

Aunque Estados Unidos estaba progresando lentamente en -- los años setentas con las presas de CCR, solo una pequeña -- sección de pavimento de prueba de CCR había sido instalada -- en la estación experimental de vías fluviales del ejército -- en Mississippi en 1975. Sin embargo, algunos ingenieros y con-- tratistas de Columbia Británica, Canadá, estaban obteniendo excelentes resultados empleando pavimento de CCR como base -- con una delgada superficie de desgaste de concreto asfáltico para construir, pavimentos de uso pesado en áreas de estacio-- namiento de muelles de carga.

#### CCR en Caycuse, Columbia Británica.

El patio de selección de troncos en Caycuse, construido -- en el otoño de 1976, comprendía 1.62 hectáreas de pavimento de CCR de 35 cm. de espesor, colocado en una maniobra de dos capas sobre una base de roca triturada de 15 cm. En 1979 se le agregaron dos hectáreas más. Se empleo grava en bruto de la localidad con tamaño máximo de 3/4 de pulgada. La capa in-- ferior de 20 cm. tenía un contenido de cemento de 8% y la ca-- pa superior, de 15 cm, fué elaborada con un contenido de ce-- mento de 12% (alrededor de 5.2 sacos por metro cúbico).

Cerca del sitio de la construcción se erigió en dos días una planta de mezclado continuo, fácilmente transportable. -- El mezclado se efectuó en una amasadora de doble gusano. El agregado se alimentó a la mezcladora mediante una banda -- transportadora con controles volumétricos (rejillas) sobre -- la banda. El cemento se alimentó de un silo, hacia la cinta de agregado de la banda, mediante un alimentador de paletas. El agua fué medida y se alimentó a la mezcladora mediante -- una barra de aspersión. Una segunda banda transportadora re-- cogía el CCR mezclado desde el lugar de descarga de la mez--

cladora y lo elevaba hasta el punto de carga de los camiones. Una tolva de transferencia de reja pequeña, situada en el extremo de la banda, reducía la segregación en el punto de descarga de la banda y permitía que los camiones cargaran sin tener que detener la planta.

Los camiones transportaban el concreto hasta el sitio de la obra y descargaban dentro de la tolva de una pavimentadora convencional de asfalto de autopropulsión. La pavimentadora esparcía el CCR en un colado uniforme de acuerdo con la línea e inclinación requeridas, con una superficie "acabada" lista para ser compactada mediante pesados rodillos vibratorios de ruedas de acero. Por lo general, después de los rodillos vibratorios seguían rodillos de llantas y luego una última pasada de rodillos no vibratorios de ruedas de acero. Se proporcionaba una reducida compactación mediante las llanas vibratorias de la pavimentadora. usualmente el curado solía aplicarse mediante rociadores adicionados a un sistema de irrigación que era continuo durante un lapso de catorce días.

Puesto que las pavimentadoras convencionales de asfalto solo podían colar capas de 25 cm. de espesor de CCR, cualquier espesor mayor tenía que colarse en dos capas. La secuencia especificada de colado en dos capas requería la colocación de la segunda a más tardar una hora después de la primera capa, pero sin tratamiento alguno de la superficie de esta. Cada carril del pavimento fué colado inmediatamente adyacente al carril anterior; la junta longitudinal de construcción se formó dejando una franja de 30 a 45 cm, sin compactar con rodillos en el borde del carril precedente y compactándola después de colar el siguiente carril junto al anterior. Cuando la operación tenía que suspenderse durante la noche, el borde del último carril se recortaba con una motoconformadora, hasta dejar una cara vertical; el nuevo carril se empalmaba con esta cara el día siguiente.

Cuando se inspeccionaron estos pavimentos en diciembre de 1983 y de nuevo un año después, los pavimentos de Caycuse -- se encontraban en excelente estado, a pesar de las severas -- condiciones de servicio. Los mayores apiladores de troncos aplican cargas hasta de 109 toneladas sobre ejes de dos ruedas, y los camiones que transportan los troncos tienen peso bruto de 120 toneladas. Además el pavimento es sometido a -- intensa abrasión cuando los troncos son empujados sobre la -- superficie.

Los núcleos tomados del pavimento mostraron resistencias a la compresión de 210 a 351 kg/cm<sup>2</sup>, con la mayoría de los -- resultados, entre los 280 y 295 kg/cm<sup>2</sup>.

#### CCR colado en áreas de clima severo.

El primer pavimento importante de CCR construido en clima realmente severo fué un camino de arrastre de 11 millas de -- largo desde la mina de carbón Bull Moose hasta una terminal férrea en Tubler Ridge, la población más reciente de Canadá. Además del camino había también un área de carga de aproxi-- madamente dos y media hectáreas en la terminal, construida -- a fines del otoño de 1983 sobre sub-bases extremadamente pobres. El área de carga tiene 17 cm. de espesor de CCR sin re-- cubrimiento alguno. El camino, de 16 cm. de espesor de CCR -- más 3.8 cm. de recubrimiento de asfalto; fué diseñado sin -- base, y en muchas áreas de sub-bases muy pobres, el contratista colocó una base granular como plataforma de trabajo.

La mezcla de CCR tenía 12% de material aglutinante por -- peso, la mitad de cemento portland y la otra mitad de puza-- lana natural de fuentes locales. Fué diseñado para una resis-- tencia a la flexión de 32 kg./cm<sup>2</sup> a 56 días. Dos pavimentado-- ras operaban escalonadas a unos 45 m. una de otra en carri--

rriles adyacentes. El curado se realizó con pipas de agua - durante las primeras horas, seguidas de una aplicación de e mulsión asfáltica. Gran parte del CCR se congeló por comple to durante la primera noche después de concluido el colado.

En el verano de 1985 se inspeccionó esta obra por el gran interés existente en cuanto a la durabilidad del pavimen--- to de CCR colocado en una zona con un clima sumamente deteriora do en grado considerable, pero el CCR se comportó muy bien y solo existen puntos de deterioro donde el apoyo de la sub base era en extremo pobre. En el área de carga, donde el -- CCR está expuesto sin recubrimiento alguno, parecía estar - en perfectas condiciones sin mostrar deterioro alguno por - congelación y deshielo. El camino es utilizado por camio-- nes de 7 ejes para el transporte de carbón, con una carga - bruta de 80 toneladas que operan durante 24 horas todo el - año.

#### SUS APLICACIONES EN MEXICO.

Una de las aplicaciones iniciales que tuvo el concreto -- compactado con rodillos (CCR), en México, fue la construc-- ción del rompeolas poniente del puerto petroquímico petro-- lero en Dos Bocas, Tabasco, a finales de 1980.

El objetivo del rompeolas es proteger contra la acción -- del oleaje esperado una determinada área costera, un puerto y un atracadero. Además de crear la calma suficiente en la zona para lograr seguridad en el ataque, operación y mañejo de barcos.

La especificación para el CCR marcaba lo siguiente: "Con-- creto rodillado para desplante de  $f'c = 200 \text{ Kg/cm}^2$  a 28 días revenimiento máximo de 3 cm, colocación en capas de 25 cm,-

compactación con rodillo liso vibratorio de 5 toneladas y -vibrador convencional". El volumen de CCR para una longitud de 3 km. del rompeolas fué de aproximadamente 16,000 metros cúbicos.

La construcción de cortinas de CCR ha evolucionado en la última década con bastante rapidez.

En el periodo 1985-1987 se construyeron dos obras de concreto compactado con rodillos en México. La primera obra se encuentra ubicada en el estado de Chiapas y es un relleno - de la obra de desvío del proyecto Hidroeléctrico Peñitas de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), el volumen de -- concreto que se compactó fué de 50,000 m<sup>3</sup>. La segunda obra se encuentra ubicada en el estado de Guanajuato, entre León y Silao, y es la Presa la Manzanilla de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). En ambos proyec-- tos se construyeron terraplenes y bordos de prueba previos a la construcción definitiva, con el propósito de obtener - información relacionada con el procedimiento constructivo - y para verificar o modificar las especificaciones marcadas por el proyecto.

En el periodo de 1987-1988 se construyeron dos obras más usando el mismo procedimiento. La primera se encuentra ubicada en el estado de Jalisco, y es la Presa Trigomil de la SARH, el volumen de concreto que se compactó fué de aproximadamente de 340,000 m<sup>3</sup> con una altura de 100 m. La segunda obra se encuentra localizada en el estado de Colima y se -- trata de una presa de 50 m. de altura propiedad del Consorcio Minero Benito Juárez "Peña Colorada", el volumen de con-- creto que se compactó fué de 500,000 m<sup>3</sup>. el mayor de todos hasta el momento en México.

CCR en la autopista México-Cuernavaca.

El Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), presentó una propuesta a la Dirección de proyectos de Carreteras de la Dirección General de Carreteras Federales de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), para participar en el diseño y la supervisión de la construcción -- del pavimento de los túneles de La Venta de la carretera -- México-Toluca utilizando la técnica del CCR; desafortunadamente el tiempo para desarrollar el programa de pruebas de laboratorio fue muy corto y no se concluyó el proyecto del pavimento de CCR. Finalmente el IMCYC expuso a la Dirección Técnica de Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos, una alternativa para construir un tramo de pavimento de CCR de 30 m. en el Km. 23.30 de la autopista México-Cuernavaca, dicha alternativa fué aceptada y el primer tramo fué construido el 13 de julio de 1988.

La importancia de este proyecto radica en que el CCR ofrece ventajas económicas sobre otras alternativas de pavimentación, ya que el mantenimiento anual es un porcentaje bajo de la inversión inicial, posee gran durabilidad, y es rápido de colocar utilizando el equipo de pavimentación tradicional.

El tramo de pavimento tiene una longitud de 30 m. un ancho de 3.10 m. y un espesor compactado de 15 cm. El tendido de la carpeta de CCR se realiza con una pavimentadora, pero en este caso por tratarse de un tramo muy pequeño de CCR, - el tendido de este se realizó a mano.

En esta investigación se tuvieron resultados importantes, en cuanto a la producción, tiempo y distancia de acarreo a la obra, equipo de transporte, equipo de compactación y curado.

Pavimento de CCR en Ciudad Juárez, Chihuahua.

Una segunda experiencia fué la pavimentación de dos carriles en el acceso a un patio de una premezcladora ubicada en Ciudad Juárez, Chihuahua, en diciembre de 1988.

El pasado 19 de diciembre de 1988, el IMCYC y las empresas Cementos de Chihuahua, S.A.; Concretos del Norte S.A. de C.V. y materiales Colonia S.A.; participaron en la construcción -- de un tramo experimental de pavimento utilizando la técnica - del concreto compactado con rodillos.

Se construyeron dos carriles de 158 m2. cada uno con una sección de 48 m. de largo por 3.30 m. de ancho y un espesor - compactdo de 17 cm. entre ambos carriles se construyó una --- junta longitudinal.

La mezcla fué elaborada en camiones mezcladores utilizando dos centrales dosificadoras estacionarias ubicadas a 7 km. de la obra.

El concreto se tendió en una capa de 21 cm. sueltos para - lo cual se empleó una pavimentadora de 4.20 m. de ancho. La - compactación fué realizada con un rodillo vibratorio y un com - pactador de neumáticos. Finalmente el curado del pavimento -- fué a base de agua durante un periodo continuo de dos días.

Se tiene un programa de extracción de corazones y vigas -- de concreto para evaluar las propiedades mecánicas del pavi - mento, así como un programa para observar su comportamiento a largo plazo.

La técnica del CCR está avanzando rápidamente en nuestro - país. Próximamente, se construirá un tramo de pavimento de -- 1 km. de longitud, a base de CCR con la finalidad de observar

algunas variables a lo largo de su vida útil.

Las aplicaciones del CCR en cuanto a pavimentos se refiere se han centrado hasta ahora para pavimentos a ser usados por vehiculos pesados, viajando a baja velocidad.

El CCR para la pavimentación de calles y carreteras, está ganando interés en algunas áreas, pero la preocupación para lograr una superficie de rodadura aceptable; permanece aún sin resolverse. Las superficies mejorarán conforme la industria gane experiencia.

**I.3: Aplicaciones en Europa**

### SUS APLICACIONES EN ESPAÑA

En España, las primeras aplicaciones de las que se tienen datos se realizaron alrededor de 1970 en la provincia de Barcelona. Se trata de pavimentos sometidos fundamentalmente a tráficos ligeros, situadas en urbanizaciones residenciales, vías urbanas y caminos rurales.

La primera realización en este campo la constituyó el pavimento del túnel del Cadí, en la provincia de Barcelona, - construida en Septiembre de 1984. Posteriormente se ha empleado tanto en obras nuevas (polígono industrial de Alcobendas y calles del parque Tierno Galván, en Madrid; variantes de Lbdio y Aguilas), como en aplicaciones de obras --- existentes (carril adicional en CN-II, en Madrid), o en refuerzos (Villasinta, Bétera, Santiponce, Alcaniz). Puede estimarse que hasta este momento se han construido con concreto compactado con rodillos, unos 300,000 m2 de carreteras.

### SUS APLICACIONES EN FRANCIA

En Francia, el desarrollo moderno de la técnica del concreto compactado con rodillos se ha iniciado en realizaciones para tráficos poco importantes, pero los buenos resultados obtenidos, por un lado, y la búsqueda de soluciones que permitan economizar productos petrolíferos, por el otro, -- han hecho que tanto su empleo como su campo de aplicación, -- hayan ido en aumento, utilizándose ya incluso para refuerzos de carreteras nacionales importantes bajo circulación - con tráficos T1 que son tráficos de entre 750 y 2000 vehículos pesados por día.

Incluso como contraste, aunque no se disponía de datos - sobre la calidad del concreto empleado, había tramos en la misma carretera hechos con concreto tradicional, los cuales se encontraban en muy malas condiciones.

SUS APLICACIONES EN OTROS PAISES EUROPEOS

Países como Noruega y Suecia están comenzando a utilizar el concreto compactado con rodillos en forma regular, mientras que en otros casos (Argentina, Japón, Alemania, Checoslovaquia), se han construido o se van a construir en un corto plazo los primeros tramos de dicho material.

No cabe duda que falta mucho trabajo por realizar en el desarrollo del concreto compactado con rodillos, estudios adicionales de sus propiedades y acumulación de datos de efectos a largo tiempo en el campo, serán auxiliares en el incremento del uso del CCR en estructuras de todo tipo.

Finalmente, podemos mencionar que el CCR se puede aplicar en áreas de maniobras de muelles marítimos, en algunos subsistemas de aeropuertos; tales como estacionamiento para aeronaves, calles de rodaje, plataformas y obras complementarias, etc.

C A P I T U L O   I I

"CARACTERISTICAS DEL CONCRETO COMPACTADO  
CON RODILLO."

**II.1: Generalidades.**

Existen avances en la tecnología, que se realizan con el fin de buscar nuevos y mejores productos a más bajos costos. Esto es especialmente interesante cuando el producto es ampliamente usado por el público y les permite un ahorro de dinero. El pavimento de concreto compactado con rodillos -- (CCR), es uno de esos productos. Empleando materiales y técnicas conocidas, el pavimento de CCR posee las ventajas y durabilidad de los pavimentos de concreto, con el bajo costo de un pavimento flexible o pavimento asfáltico tradicional.

No solo los costos establecen diferencias entre el CCR y otros pavimentos. Difiere del suelo-cemento común en que -- tiene agregados gruesos y de las bases tratadas con cemento en que su contenido de cemento es menor, y a su vez se diferencia de ambos en que constituye una superficie de rodamiento que soporta las acciones del tránsito y del clima.

Muchos pavimentos de CCR han sido construidos sobre bases granulares y otros directamente sobre la subrasante; en ambos casos para conseguir una adecuada densidad, el CCR -- debe ser construido sobre una superficie estable y bien consolidada.

En muchos proyectos donde se requieren alternativas para establecer costos, el CCR ha mostrado economías del 20 al 30% sobre el pavimento convencional de concreto; igualmente la comparación con superficies asfálticas resulta muy a favor del concreto compactado con rodillos.

El CCR que se emplea para pavimentos es un material seco de concreto de cemento portland, que se compacta mediante vibración externa con rodillos vibratorios pesados u otro equipo similar. Por lo general es más seco que el de una consistencia sin revenimiento y debe ser lo bastante rígido

para soportar el equipo de compactación. El CCR para construcción de pavimentos se suele colar por medio de una pavimentadora de asfalto u otro equipo similar, modificada para acomodar la consistencia rígida del CCR y los colados de mayor espesor. Las primeras máquinas utilizadas fueron equipadas solamente con planchas vibradoras, de modo que la mayor parte de la compactación era provista por el rodillo vibratorio. Hoy en día se usan pavimentadoras con reglas compactadoras y vibradoras, especialmente aptas para el CCR.

Todos los autores coincidieron en definir el CCR como -- una tecnología constructiva que utiliza una mezcla de concreto con revenimiento cero, bajo contenido de cemento ( de 80 a 100 kg. por metro cúbico), relación agua-cemento muy baja, buena graduación de agregados con tamaño máximo del orden de 3 pulgadas, que generalmente se mezcla en plantas de proceso continuo y se transporta y coloca usando equipos para movimiento de tierras, en capas del orden de 15 cm. y sometiendo cada capa a compactación con equipo vibratorio.

Se trata de una mezcla homogénea de áridos, agua y conglomerante que se pone en obra de forma análoga a una grava-cemento, aunque su contenido de cemento es similar al de un pavimento de concreto vibrado.

No es posible establecer reglas de tipo general pero puede estimarse que el costo del CCR es del orden del 80% del concreto tradicional, pero dependerá en cada caso particular del equipamiento de la empresa, de las condiciones locales, etc.

**II.2: Características importantes.**

El límite entre el concreto seco y el convencional no es fácil de establecer, debido que lo único que cambia son las proporciones en que las materias primas están presentes en ambos tipos de concreto. Se podría fijar arbitrariamente -- que son concretos secos aquellos que tienen una relación - agua-cemento menor que 0.35.

Aunque el equipo para dosificación, alimentación y mezclador se ha desarrollado a partir del que se usa en carpetas, el CCR para pavimentos requiere mejores controles en la dosificación.

La diferencia más importante entre el pavimento de CCR - y el de bases tratadas con cemento, o el suelo-cemento es - que el CCR está diseñado para ser un verdadero pavimento de concreto de cemento portland con resistencia estructural -- por lo menos comparable a la del concreto convencional de cemento portland, y con frecuencia superior. El pavimento de CCR también está diseñado para tener resistencia a la abrasión por el tránsito, durabilidad en su exposición a climas severos, desgaste de superficie y tolerancia en la nivelación con escantillón para los requerimientos usuales del tránsito involucrado.

El CCR para pavimentos difiere significativamente del -- CCR para presas en que es tan solo una forma de concreto masivo de bajo contenido de cemento. Las mezclas para pavimento de CCR tienen un contenido mucho más elevado de cemento y de pasta, y el agregado grueso es de tamaño mucho menor.

Se hace énfasis en la necesidad de una compactación adecuada mediante equipo pesado y capas suficientemente delgadas de CCR, de 15 a 25 cm. Las características del CCR son esencialmente las mismas que las del concreto normal, pudiendo usarse materiales marginales con granulometrías, ---

plasticidad, u otras características que normalmente no se aceptarían en concreto normal.

Por la baja relación agua-cemento y la alta densidad, el CCR tiene una permeabilidad muy reducida que lo hace ideal para condiciones de congelación y descongelación en zonas ubicadas en climas extremos. El CCR permite obtener la misma resistencia que el concreto normal, pero con un contenido más bajo de cemento.

Es evidente que una de las bondades del CCR es el ahorro del cemento, aunque esto no cobra tal importancia si el pavimento de concreto compactado con rodillos, no se construye correctamente.

En cualquier caso, el espesor mínimo a utilizar no debe ser inferior a 15 cm, por razones constructivas. Si por cálculo resultase un espesor inferior a 15 cm, puede disminuirse la resistencia adoptada como dato de partida reduciendo el contenido de cemento. Si por razones de regularidad superficial se proyecta una capa superior de algunos centímetros de aglomerado, puede contarse entonces con una pequeña reducción en el espesor del hormigón compactado.

En relación con el diseño de espesores, por ahora se usan los métodos del concreto convencional, aunque los resultados parecen indicar un mejor comportamiento.

Si los pavimentos tuvieran un peso despreciable, el alabeo sería función de la longitud, pero como tienen un peso importante, el alabeo real es independiente de la longitud. Cuando las losas se alabean, el peso de la parte central mantiene apoyada la losa y se despegan solo sus extremos.

En el caso del CCR tienen las losas una longitud prome---

dio de 18 m; podría suponerse que la zona central de contacto estará por el orden de los 15 cm, por lo que es posible suponer que en los concretos secos se pueda reducir el espesor en relación a los tradicionales, lo que significaría una reducción del costo importante.

Una encuesta efectuada en 1985 por la Portland Cement Association, mostró que había en Estados Unidos más de 236,000 -- metros cuadrados de pavimento terminado de CCR. No menos de 12 proyectos adicionales estaban bajo una consideración activa en ese país.

Una cualidad que fué preocupante cuando por primera vez -- se consideró el CCR para pavimentos fué su durabilidad cuando este fuera colocado en zonas de congelación y deshielo. Hasta la fecha nada ha demostrado que el CCR tenga algún problema -- respecto a su durabilidad en congelación y deshielo.

Los pavimentos de CCR en general tienden a presentar resistencias a la flexión más elevadas que los pavimentos de concreto convencional; esto puede deberse tanto a la menor relación agua-cemento como al elevado grado de compactación del CCR.

En lo que se refiere al tipo de bases a utilizar bajo los pavimentos de concreto compactado, en principio parece que deberían así mismo mantenerse las mismas que figuran en los catálogos para pavimentos de concreto vibrado. Sin embargo, es posible que un conocimiento más profundo del comportamiento -- de estos firmes permita en un futuro, rebajar las exigencias actuales.

Por lo que respecta a los materiales a utilizar, se puede anotar lo siguiente:

Conglomerante:

El conglomerante estará compuesto por cemento o por una mezcla de cemento y cenizas volantes; en este último caso, - las proporciones relativas de ambas se fijarán mediante un estudio de laboratorio, y se recomienda que la mezcla se suministre ya efectuada.

Cemento:

Los tipos de cemento que se podrán utilizar son:

- Cementos portland con adiciones activas.
- Cementos siderúrgicos o de alto horno.
- Cementos pozolánicos.
- Cementos mixtos, obtenidos por la trituration conjunta

de:

- Clinker de portland, en proporción comprendida entre el veinte y sesenta por ciento en masa.
- Carga mineral caliza, en proporción no superior al -- cinco porciento en masa.
- Cenizas volantes y/o escorias de alto horno.

El contenido de cemento debe estar entre 230 y 330 Kilo--gramos por metro cúbico.

Cenizas volantes:

Deberán utilizarse cenizas volantes silicoaluminosas. en todo caso, deberán cumplir la siguiente prescripción:

- Que sus características químicas sean constantes.

Agregados: La granulometría de los agregados combinados - deberá de ser continua.

El agregado utilizado en la producción de CCR, se suministrará fraccionando, al menos en dos tamaños, teniendo un tamaño máximo de 25 mm, y ser un producto de trituration, con el fin de asegurar una densidad y una capacidad, de soporte altas.

Agua: El contenido de agua de mezcla de los concretos compactados con rodillo debe estar entre el 4% y el 7%. Se elige aquel contenido que haga que la mezcla en estado fresco se pueda compactar, a la máxima densidad seca, con la energía del ensayo Proctor Modificado.

Aditivos: Pueden utilizarse aditivos que mejoren ciertas características de la mezcla. Así, mediante el empleo de --- plastificantes es posible conseguir las densidades requeridas con menores contenidos de agua, lo que se traduce en un aumento de las resistencias.

Otro tipo de aditivos cuyo empleo suele ser imprescindible, salvo si la temperatura de puesta en obra es baja, son los retardadores de fraguado para aumentar el plazo de trabajabilidad del material.

La temperatura a tener en cuenta para el plazo de trabajabilidad será la media ambiente prevista entre las once y las catorce horas (11 a 14 hrs).

Se entiende por trabajabilidad del CCR, su facultad de -- conservar durante un periodo de tiempo su aptitud para la -- compactación.

A medida que se desarrolla el fraguado del material, el CCR pierde progresivamente su trabajabilidad. El agua libre se combina con el cemento, perdiendo su papel de lubricante; mientras que los enlaces cemento-agregado que empiezan a desarrollarse rigidizan de forma paulatina el material.

Si estas operaciones se realizan cuando el fraguado ya se ha iniciado, no solo se dificultan las mismas, sino que además las resistencias del material pueden verse seriamente -- perjudicadas, al destruirse los enlaces entre los agregados.

En la tabla 1 se indican los plazos mínimos de trabajabilidad del CCR de acuerdo al tipo de obra a realizar.

NUEVAS OBRAS O REFUERZOS SIN CIRCULACION	
1. Ejecución por ancho completo sin necesidad de refino posterior.	5 horas.
2. Ejecución por semianchos.	7 horas.
3. Ejecución por ancho completo con refino posterior.	7 horas.
4. Refuerzos bajo circulación.	9 horas.

Tabla 1- plazos mínimos de trabajabilidad del concreto -- compactado con rodillo en función del tipo de obra a ejecutar.

Limitaciones a la ejecución: La compactación del concreto seco es muy sensible al agua. Un exceso de agua, producido por lluvia, puede producir colchoneo, aparte de lavado superficial. Incluso una lluvia fuerte recién abierto al tráfico, puede ser nociva. Por estas razones no debe ejecutarse esta unidad de obra con lluvia.

Si el cemento utilizado es un cemento lento; el periodo, durante el cual el material es sensible al hielo aumenta.

Por esta razón se recomienda no ejecutar esta unidad si se pronostican heladas durante el periodo de endurecimiento, salvo que se hayan utilizado cementos rápidos.

textura superficial: Con objeto de obtener una textura --

antiderrapante, hay que dar algún tratamiento a la terminación que produce el paso de los rodillos vibratorios o compactadores de neumáticos.

Si la regularidad superficial es buena, es suficiente un tratamiento superficial con ligantes modificados. Si por el contrario, deja que desear, habría que acabar con una capa de aglomerado asfáltico de composición bien estudiada que suele ser de pequeño espesor.

Medición y abono: El hormigón compactado se abonará por metro cúbico realmente construidos, medidos con arreglo a las secciones tipo que figuran en los planos. No se abonarán las operaciones necesarias para reparar las superficies que acusen irregularidades superiores a las tolerables o que presenten aspecto defectuoso.

### **II.3: Ventajas y desventajas**

Dependiendo del tipo de obra, el CCR proporcionará diferentes ventajas, entre las que podemos mencionar:

- Fabricación en plantas continuas de grava-cemento o centrales de hormigón discontinuas.

- Puesta en obra con la maquinaria utilizada para las gravas-cemento o con la utilizada para los aglomerados asfálticos.

- Contenido en cemento similar al de un concreto clásico; el cemento puede ser con alto contenido en cenizas volantes o escorias, en proporciones que dependerán del cemento y de la ceniza.

Para evitar el realizar una serie de ensayos previos que nos garanticen la mezcla, es aconsejable la utilización de cementos tipo puz-II.

- El contenido de agua es bajo, apenas el suficiente para que la hidratación del cemento se dé, por lo que la consistencia del concreto es áspera y su capacidad de soporte es alta lo que hace que el pavimento se pueda poner en servicio inmediatamente se alcance la compactación recomendada. Además el bajo contenido de agua se aproxima mucho al del óptimo del ensayo proctor modificado; también reduce el contenido de cemento para conservar la relación agua-cemento.

- Con el CCR se produce una figuración menor que en el concreto convencional.

- Las características estructurales del CCR son similares a las de los concretos convencionales por lo que no se requiere desarrollar nuevos métodos de diseño para obtener el espesor de los pavimentos.

- El tiempo de construcción de un pavimento de CCR es menor por la tecnología de su colocación.

- Debido a que la resistencia exigida en el CCR es similar a la del concreto convencional y a que su relación agua-cemento es baja, el contenido de cemento para lograr dicha resistencia, es menor.

- También debido a que el contenido de agua es menor, la retracción es baja, por lo que las juntas de contracción están entre 15 y 18 metros, esto es, están más espaciadas que en el concreto convencional.

- La dosificación del concreto seco admite cementos con altos contenidos de adiciones, debido a que la mayoría de los controles se hacen a 90 días y no a 28.

- No se requiere el uso de cimbra.

- No se requiere acero de refuerzos.

- El trabajo se realiza con pequeñas cuadrillas de mano de obra.

La definición deja claro que se trata de una técnica conjunta entre las bases tratadas y los pavimentos de concreto convencional. La atención que se viene prestando a la misma no debe extrañar si se considera que gracias a ella es posible salvar una serie de limitaciones que presentan las técnicas de las que se deriva:

a) Con respecto a las bases tratadas o gravas-cemento:

- Al disminuir la relación agua-cemento, la retracción hidráulica es menor. Ello se traduce, en general, en una separación entre fisuras bastante superior a la habitual en las gravas-cemento.

- Al aumentar el contenido de conglomerante, las variacio

nes del mismo originadas por los sistemas de dosificación -- (sobre todo en plantas de tipo discontinuo), tienen una menor influencia en las resistencias alcanzadas por el material.

b) Con respecto a los pavimentos de concreto vibrado:

- La no necesidad de maquinaria especial, lo cual representa un menor costo de ejecución.

- La posibilidad de apertura inmediata a la circulación. Con ello en el caso de refuerzos de carreteras de bajo tráfico, la mejor forma de usar el concreto es con esta tecnología.

En lo que se refiere al costo del CCR, contra pavimentos de concreto convencional, la mayoría de los ahorros logrados en el CCR se deben a que se colocan grandes volúmenes de concreto en un relativo corto periodo de tiempo, con mínima labor y equipo.

Ahorros adicionales son posibles porque el pavimento de CCR utiliza de un tercio a la mitad del cemento contenido en los pavimentos de concreto convencional.

En la tabla 2 se muestra una comparación entre los costos de pavimentos equivalentes: de asfalto, concreto convencional, suelo-cemento y CCR, resultando este último el más económico y señalando la ventaja de que el pavimento se puede usar inmediatamente después de terminada la compactación.

T A B L A " 2 "

ALTERNATIVA	COSTO BASICO UNITARIO PLS. US/M2.		
	Costo inicial	Costo anual de mantenimiento estimado	Costo estimado a lo largo de la vida útil. (1).
Concreto asfáltico mezcla caliente, 30 cm. - de espesor.	\$17.92	\$1.95	\$40.53
Concreto hidráulico -- convencional, 25 cm. - de espesor.	\$29.86	\$0.15	\$31.57
Concreto compactado -- con rodillos, 30 cm. - de espesor.	\$19.11	\$0.19	\$21.31
Suelo-cemento 30 cm. - de espesor.	\$ 9.56	\$2.09 (2)	\$33.53

(1).- Suponiendo vida útil de 20 años, intereses al 6% anual e inflación del 5% anual.

(2).- Sustitución de toda la capa a los cinco años; más bacheo.

Tabla 2: Costos durante la vida útil de diferentes alternativas de pavimentos.

Se ha llegado a afirmar que "es dudoso que una tecnología de pavimentación haya tenido nunca el potencial para -- unos ahorros tan significativos así como un potencial para unas aplicaciones tan variadas como la tecnología del concreto compactado con rodillos".

Por supuesto, este material presenta algunas limitaciones, que por el momento no han podido ser superadas, y entre las que se pueden mencionar las siguientes.:

- Es difícil conseguir una buena regularidad superficial extendiendo con motoniveladora o motoconformadora. Hace falta una base extendida con hilo y extendedora con patín para el concreto seco. El acabado superficial de menor calidad - dá como resultado un pavimento menos comfortable.

- Para vías de tránsito veloz, debido a la desventaja anteriormente anotada, se puede necesitar de una capa de material asfáltico para darle una mejor superficie de rodadura; perdiendo de esta manera, las ventajas de luminosidad del concreto.

- Cuando se trata de repavimentación, no se puede eliminar el tránsito, sumado al tiempo de espera por el periodo de endurecimiento normal del concreto.

- Requiere un número elevado de pasadas del rodillo para lograr la compactación necesario y bases con buena capacidad portante para que no se disipe la energía de compactación. Por lo anterior, necesita sistemas de control de densidad in situ rápidos.

- Son delicadas las compactaciones en los bordes, en las

Tabla 2: Costos durante la vida útil de diferentes alternativas de pavimentos.

Se ha llegado a afirmar que "es dudoso que una tecnología de pavimentación haya tenido nunca el potencial para -- unos ahorros tan significativos así como un potencial para unas aplicaciones tan variadas como la tecnología del concreto compactado con rodillos".

Por supuesto, este material presenta algunas limitaciones, que por el momento no han podido ser superadas, y entre las que se pueden mencionar las siguientes.:

- Es difícil conseguir una buena regularidad superficial extendiendo con motoniveladora o motoconformadora. Hace falta una base extendida con hilo y extendedora con patín para el concreto seco. El acabado superficial de menor calidad - dá como resultado un pavimento menos confortable.

- Para vías de tránsito veloz, debido a la desventaja anteriormente anotada, se puede necesitar de una capa de material asfáltico para darle una mejor superficie de rodadura; perdiendo de esta manera, las ventajas de luminosidad del concreto.

- Cuando se trata de repavimentación, no se puede eliminar el tránsito, sumado al tiempo de espera por el periodo de endurecimiento normal del concreto.

- Requiere un número elevado de pasadas del rodillo para lograr la compactación necesario y bases con buena capacidad portante para que no se disipe la energía de compactación. Por lo anterior, necesita sistemas de control de densidad in situ rápidos.

- Son delicadas las compactaciones en los bordes, en las

uniones y cuando se hacen por bandas; cuando las bases son granulares, de limitada capacidad portante y de una gran flexibilidad, la energía de compactación se disipa al suelo y los dos o tres centímetros inferiores quedan con menor densidad.

- El concreto compactado se ejecutará cuando las condiciones ambientales permitan esperar que no se producirán heladas durante el periodo de endurecimiento. En caso de lluvia deberán suspenderse las operaciones.

- Es muy sensible frente a las variaciones de humedad y compactación obtenidas.

- Un exceso o defecto de agua, así como una densidad in suficiente, disminuyen notablemente las resistencias mecánicas. Por otra parte, una falta de humedad suele llevar consigo riesgos de segregación y de aparición de zonas con defecto de fraguado, así como dificultades de compactación mientras que un exceso de agua se traduce en una regularidad superficial defectuosa (colchoneo del material al ser compactado). Estos defectos pueden manifestarse incluso -- con variaciones de +/- 0.5% de la humedad con respecto a la óptima.

**II.4: Comparación de concreto contra asfalto.**

A continuación se realiza una comparación entre el concreto y el asfalto para un trabajo de pavimentación, de acuerdo a siete factores que son importantes y que deben ser tomados en cuenta antes de decidirse por cualesquiera de las dos formas de pavimentar.

Los siete factores a considerar son:

- 1.- Economía.
- 2.- Servicio.
- 3.- Diseño.
- 4.- Mantenimiento.
- 5.- Construcción.
- 6.- Consumo de energía.
- 7.- Seguridad.

Una vez analizados los factores antes mencionados se podrá tener una mejor idea de cual de estas dos alternativas es mejor para pavimentar.

#### 1.- ECONOMIA

##### Concreto

Su costo inicial es moderado para diseños iguales.

Requiere poco mantenimiento.

Existen distribuidores de cemento en casi todas las poblaciones.

##### Asfalto

Su costo fluctúa de acuerdo con el precio del petróleo.

Mantenimiento continuo; reparaciones costosas.

Hay que transportarlo de lugares lejanos.

Requiere menos consumo de energía para iluminación; -- por requerir especificaciones para alumbrado menores.

Costo menor a mediano plazo ya que no se requiere de mantenimiento permanente.

Se reduce el mantenimiento del vehículo.

Los costos de iluminación, son mas elevados ya que se requiere de mayor alumbrado.

Costo inicial posiblemente menor pero requiere de mayor mantenimiento.

Los surcos o baches -- dañan el vehículo.

## 2. SERVICIO

### Concreto

Su comportamiento es duradero.

Puede ser diseñado para resistir ataques de substancias químicas, aceites y el interperismo.

Soporta sobrecargas con pocas cimentaciones.

Resiste las fallas del firme, ya que distribuye las cargas.

No le afecta el calor; no se vuelve viscoso o fluido.

### Asfalto

Duración en servicio limitado, hay que repararlo.

Lo afectan aceites, -- químicos y el climas.

Los vehículos pesados lo dañan.

Las cargas pesadas de los camiones le producen fallas.

El calor causa viscosidad, pérdida de materiales y superficie irregulares.

Tiene mejor comportamiento en áreas difíciles donde son comunes cargas pesadas con paradas y arranques continuos.

Comúnmente falla en áreas difíciles: calzadas con pendiente, áreas de recolección de basura, etc.

### 3. DISEÑO

#### Concreto

Excavación mínima, usualmente se usa sobre la base existente.

Requiere de menores estándares de iluminación.

Puede diseñarse para las cargas especificadas.

Su resistencia aumenta -- con la edad.

La guarnición y la cuneta se integran.

No requiere contratistas especializados.

#### Asfalto

Requiere materiales adicionales.

Requiere mayores estándares de iluminación.

Incertidumbre en la resistencia de diseño.

Flexible, no gana resistencia.

La guarnición y cuneta son separados del pavimento.

Requiere contratistas y equipo para asfalto y concreto.

### 4. MANTENIMIENTO

#### Concreto

Costo anual bajo, no requiere presupuesto adicional para

#### Asfalto

Requiere sellado, bacheo y rellenado rutinario.

mantenimiento.

Requiere poco servicio - de limpieza; y puede lavarse.

Las reparaciones pueden hacerse uniformes, nítidas con facilidad.

Requiere de menos equipo y mano de obra especializada.

Requiere barrenarse, las - depresiones acumulan suciedad.

Reparaciones irregulares - requiere selladores de asfalto líquido.

Requiere más equipo y mano de obra.

#### 5. CONSTRUCCION.

##### Concreto

La obra se termina rápidamente en una sola operación.

Hay plantas de premezclado en todas partes.

La construcción es más - fácil, sencillamente se cue-  
la.

Con equipo sencillo.

##### Asfalto

Sistema de construcción a base de capas múltiples.

No hay plantas de asfalto en todas partes, puede haber demoras.

Sólo puede colarse en clima caliente.

Requiere de plantas y maquinaria costosas.

#### 6. CONSUMO DE ENERGIA.

##### Concreto

##### Asfalto

Se produce con materiales locales.

Las reparaciones pueden hacerse con materiales locales, no requieren selladores

La mezcla de concreto no se requiere calentar.

Se hace a base de petróleo

Las reparaciones se hacen con materiales a base de petróleo y requiere periódicamente selladores y recubrimientos.

Requiere mayor consumo de energía para iluminación por ser pavimentos de color negro.

#### 7. SEGURIDAD

##### Concreto

Excelente reflexión de la luz, se logra mayor visibilidad a mayor distancia.

Tiene mayores resistencias a los derrapes.

El escurrimiento evita el deslizamiento.

Puede ranurarse para mejorar el escurrimiento.

Menor presencia de baches.

##### Asfalto

La poca reflexión del asfalto, hace que se pierda visibilidad de noche.

Cuando está mojado es -- más resbaloso.

Los surcos retienen el agua.

No puede ranurarse adecuadamente.

La presencia de baches lo hacen más peligroso.

Estas son algunas características del concreto y del asfalto en cuanto a pavimentación se refiere, y es conveniente tenerlas en cuenta antes de tomar una decisión entre estas dos alternativas; para así elegir la que mejor convenga

a todas las variables incluidas en el desarrollo del trabajo.

**CAPITULO III: "PRUEBAS DE LABORATORIO PARA CONCRETO  
COMPACTADO CON RODILLOS"**

**III.I: Ensayos característicos en laboratorio.**

Sin duda, uno de los aspectos que más importancia tienen en el concreto compactado con rodillos, son las pruebas o ensayos en el laboratorio; ya que de estos depende en gran parte el éxito o fracaso de la obra construida con CCR y por esta causa se debe poner mucha atención en el desarrollo de las pruebas de laboratorio.

Los ensayos previos en laboratorio se realizan antes de comenzar el colado, para establecer la dosificación a la vista de los materiales disponibles y de las condiciones de ejecución previstas.

Para la elección de las distintas dosificaciones a ensayar deberá establecerse, en primer lugar, la relación entre su humedad y su densidad según la norma proctor modificado. Se recomienda elegir las dosificaciones de mayor compacidad y menor sensibilidad a las variaciones de humedad.

Para cada dosificación ensayada deberá controlarse la resistencia a tracción indirecta a veintiocho (28) días de probetas compactadas con la humedad óptima correspondiente al ensayo "proctor modificado". Con objeto de conocer la evolución de su resistencia a edad temprana, deberá controlarse también la resistencia a siete (7) días.

En caso de utilizarse como conglomerante mezcla de cemento con cenizas volantes, los ensayos a veintiocho (28) días se deberán sustituir por ensayos a noventa (90) días.

Los ensayos de resistencia se llevarán a cabo sobre probetas procedentes de cuatro (4) mezclas diferentes, confeccionándose series de dos (2) probetas por cada mezcla. Dichas probetas se ensayarán a tracción indirecta obteniéndose el valor medio de las roturas el cual deberá superar la resistencia mínima especificada; con margen suficiente para

esperar que, con la dispersión introducida por la puesta en obra, la resistencia media real sobre pase también la especificada.

Deberá determinarse igualmente el plazo de trabajabilidad del material.

La determinación del plazo de trabajabilidad es complicada. Los laboratorios de Ponts et Chaussees en Francia, han desarrollado un método consistente en medir el tiempo de propagación del sonido a lo largo del eje longitudinal de una probeta de material recién compactado. Al irse rigidizando la probeta, la velocidad de paso del sonido va aumentando. Se considera como plazo de trabajabilidad el periodo en el que el tiempo de propagación de los ultrasonidos disminuye hasta un 60% del inicial.

El plazo de trabajabilidad varía con la temperatura a la que se efectúan los ensayos, por lo que estos deben realizarse en una sala a temperatura constante o bien equipada con un recinto termostático. Para establecer la dosificación de producto retardador de fraguado, que normalmente es imprescindible para alcanzar los plazos de trabajabilidad requeridos, habrá que tener en cuenta la temperatura a la que se vayan a realizar las obras. Los ensayos deben efectuarse a la temperatura media prevista en obra entre las 11 y 14 horas. Por ello, durante la ejecución deberá controlarse la temperatura en el extendido, efectuando en caso necesario los oportunos ajustes en la dosificación del retardador de fraguado. Esta suele variar entre un 0,5% y un 1% en peso del conglomerante.

La dosificación del conglomerante no deberá ser inferior al diez por ciento (10%), en peso, del total de materiales secos.

Una vez elegida la dosificación, deberá comprobarse la -- sensibilidad de su capacidad de soporte inicial a las variaciones de humedad. Deberá también comprobarse la sensibilidad de la resistencia a tracción indirecta a veintiocho (28) días o en su caso, a noventa (90) días, frente a las variaciones de humedad, y los defectos de compactación, determinando dicha resistencia:

- En probetas cuya humedad difiera de la óptima "proctor modificado" en medio (1/2) punto porcentual, en más y en menos.

- En probetas con la humedad óptima, pero a las que se haya aplicado la energía de compactación necesaria para obtener densidades iguales al noventa y cinco y noventa y siete por ciento ( 95 y 97 % ) de la máxima "proctor modificada".

Al ser complicada la confección de probetas prismáticas - para su ensayo en flexión, las resistencias a exigir deben - referirse al ensayo a tracción indirecta (ensayo brasileño), sobre probetas cilíndricas de 15 cm. de diámetro. En lo que se refiere al método de confección de dichas probetas, se -- prescribe el empleo del martillo vibrante, obteniéndose así probetas de 18 cm. de altura, fabricadas en tres capas. No - obstante, tanto este método como el de la maza proctor pre-- sentan el inconveniente de una posible rotura de los áridos en el caso de que estos no sean muy duros, con lo cual se altera la granulometría del material. Por ello parece más adecuado el método del consistómetro VeBe, en el que las probetas de 15 cm. de diámetro y 30 cm. de altura, se confeccionan en tres capas mediante vibrocompresión. Cada capa es compactada mediante el efecto combinado de un contra peso de 20 libras (9.07 kg.) dejando libremente sobre su superficie, y de la vibración del consistómetro durante un tiempo de 35 -- segundos.

**III.2: Ensayos característicos en obra.**

Estos ensayos serán preceptivos en todos los casos, para comprobar que los medios disponibles en obra permitan obtener, un concreto compactado de las características exigidas.

La humedad de fabricación de la mezcla deberá ajustarse de forma que en la puesta en obra del concreto compactado, teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas y la distancia de transporte, la humedad de la mezcla esté comprendida entre la óptima proctor modificado y medio (1/2) punto porcentual menos.

Para cada dosificación elegida a partir de los ensayos previos en laboratorio, se llevarán a cabo ensayos de resistencia sobre probetas procedentes de seis (6) mezclas diferentes, confeccionándose series de dos (2) probetas por cada mezcla. Dichas probetas se ensayarán a tracción indirecta a (7) días, obteniéndose el valor medio o promedio de las roturas de las probetas.

Si la resistencia media no fuera inferior al noventa (90) por ciento de la resistencia a siete (7) días obtenida en el laboratorio se podrá proceder a la realización de un tramo de prueba con la dosificación elegida. En caso contrario, se introducirán los ajustes necesarios en la dosificación hasta conseguir que se cumplan las exigencias estipuladas.

En el tramo de prueba deberán conseguirse los siguientes grados de compactación, referidos a la densidad máxima proctor modificado obtenida en laboratorio:

- Media de la capa no inferior al noventa y siete por ciento 97%.

Fondo de la capa no inferior al noventa y cinco por ciento 95%.

- Cada uno de los ensayos individuales que componen las medias anteriores podrán bajar hasta dos (2) puntos porcentuales de la media indicada.

Se realizará un mínimo de veinte (20) medidas con el equipo que se tendrá posteriormente para el control en obra, repartidas aleatoriamente sobre toda la superficie del tramo.

Se fabricarán, al menos, cinco (5) probetas de mezclas diferentes, que se ensayarán a los siete (7) días a tracción indirecta, comprobándose que en todas ellas se supere la resistencia especificada.

Se comprobará también, si es idóneo el proceso a utilizar en el curado y la protección del concreto compactado fresco.

Si los resultados no fueran satisfactorios, se procederá a la realización de sucesivos tramos de prueba, introduciendo las oportunas y respectivas variaciones en la fabricación y puesta en obra hasta obtener las calidades exigidas. Si mediante los ensayos característicos se hubiese comprobado la efectividad de otras dosificaciones, podrá sustituirse la empleada en el primer tramo de prueba por alguna de estas con la aprobación previa del director de obra.

Una vez realizados los ensayos previos en laboratorio y característicos en la obra con resultados satisfactorios, el director de obra aprobará la correspondiente fórmula de trabajo.

El esfuerzo mayor debe ponerse en los controles previos de equipos y materiales, y durante la obra en los sistemas de información en tiempo real (registros continuos de pesadas de agregados y cemento, humedad, etc.). De esta forma es posible la intervención oportuna y rápida si se producen

anomalías. Los controles durante la ejecución se centran -- básicamente en la comprobación en fresco de espesores y de densidades. En lo que se refiere a los espesores, se recomienda su control cada 10 metros de extendido, sobre el material sin compactar, teniendo en cuenta la disminución que sufrirá el material al compactarse. Si para una mayor precisión se efectúan los controles sobre el material compactado, deberá recurrirse a métodos alométricos.

Para el control de la densidad se recomienda el empleo - de sondas nucleares, efectuándose determinaciones en emplazamientos aleatorios, con unas frecuencias mínimas de una - medida por cada 100 m2. de superficie de capa. Puede emplearse también el método de la arena para la comprobación de la densidad "in situ", aunque este sistema es considerablemente más lento. De ser posible, deberán instalarse en los compactadores equipos gráficos de registro contínuo; para - así controlar su velocidad de avance, la frecuencia de vibración, el tiempo de trabajo y la distancia recorrida.

Además deberán efectuarse medidas de la humedad "in situ" en emplazamientos aleatorios, en correspondencia con las efectuadas en el control de fabricación. En general, los contenidos de humedad deberán estar comprendidos entre la óptima y esta misma disminuida en dos puntos porcentuales. Las zonas donde se haga manifiesto un incidente, se corregirán debidamente.

Finalmente debe controlarse, con regla móvil de tres metros, la regularidad superficial, Este es uno de los puntos que pueden ser críticos en la tecnología de concretos compactados con rodillos o concretos secos. Si los resultados no son buenos, hay que extender una capa de aglomerado, --- (normalmente basta con 4 cm.). Los mejores resultados de regularidad superficial se han obtenido extendiendo la base - con hilo y el concreto seco con extendedora con patín, so--

bre todo, si se utilizaron equipos modernos con doble tamper, como es el caso de la extendedora alemana descrita en el primer capítulo de este mismo trabajo: que pueden asegurar una precompactación del orden del 94 o 95 % de la densidad proctor modificada, con lo que el rodillo apenas provoca asentamientos de la superficie.

**CAPITULO IV: "METODO CONSTRUCTIVO DE PAVIMENTOS  
DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO"**

**IV.1: Aspectos generales de construcción.**

En este capítulo se presentará primero los aspectos generales para la construcción de pavimentos de CCR; y en seguida se describirá el proceso utilizado en México para la construcción de un tramo de carretera realizado de CCR, ubicado en el km. 23 de la autopista México-Cuernavaca; citando todos los pasos o fases de la construcción de dicho tramo.

En esta sección se presentarán algunas recomendaciones generales para la construcción de pavimentos de CCR.

#### Preparación de la subrasante-base:

Los principios utilizados en la preparación de la subrasante y/o la base para recibir el pavimento de CCR son los mismos que los utilizados en los pavimentos de concreto convencional.

Al asimilarse los concretos tradicionales, los criterios de proyecto respecto a espesores, resistencias a flexotracción y tipos de base a utilizar pueden ser los mismos que los utilizados para los concretos convencionales.

Cualquier área blanda en la subrasante debe ser reemplazada con material bien graduado compactado a la densidad requerida.

#### Mezclado del concreto y producción:

Para el mezclado de los materiales se utilizan normal y preferiblemente las mezcladoras tipo amasadoras (pugmill), de producción continua o discontinua, similares a las empleadas para concreto asfáltico; pero como es un material muy sensible a las variaciones en el contenido de cemento y de agua, se exige adicionalmente que la dosificación de cemento se realice en peso.

En las plantas automáticas de cintas de alimentación con tinua con sistemas de pesada automática, la información se centraliza en un computador el que mediante el peso de la cinta y la velocidad de avance, determina exactamente cual es la cantidad de cada material, registrando y controlando directa y automáticamente la dosificación empleada.

El agua se agrega con unos rociadores continuos que entregan la cantidad exacta de agua que se necesita.

#### Tiempo de trabajo:

Se ha definido como el intervalo que va desde el amasado hasta el comienzo del fraguado, dentro del cual, se deben realizar las tareas de colocación y computación. Este tiempo de trabajo es lo que en el capítulo II se citó como trabajabilidad, en dicho capítulo se presenta una tabla con los plazos máximos de tiempo de trabajo o trabajabilidad de acuerdo al tipo de obra a realizar. Es recomendable tener tiempos de trabajo no superiores a 90 minutos (45 minutos en clima cálido).

#### Transporte:

La transportación del CCR se ha llevado a cabo exitosamente en camiones de volteo, que pueden verter el concreto directamente en la tolva de la pavimentadora. Hay que tener cuidado con la segregación; por esto, la carga de los camiones debe realizarse desde tolvas intermedias, con altura de caída lo más limitada posible. En condiciones climáticas adversas, puede ser necesario utilizar lonas para proteger el concreto de la lluvia o de la desecación durante el transporte.

Es importante respetar los tiempos límite de trabajabilidad, por lo que se recomienda que el tiempo de acarreo no debe ser mayor de 15 minutos ni la distancia mayor de dos

millas.

#### Colocación del concreto:

La colocación del CCR se ha ejecutado exitosamente con motoniveladora o con extendedora (Finisher). Recientemente el uso de pavimentadoras de alta capacidad, fabricadas en Alemania Occidental; y ya citadas con anterioridad en el capítulo I de este trabajo, han probado ser la mejor opción para obtener altas densidades en pavimentos de CCR.

La motoniveladora puede ser la indicada para la colocación del CCR en áreas de geometría compleja (urbanizaciones, estacionamientos), para carreteras en las que la exigencia de regularidad superficial no sea muy alta (carreteras secundarias) o carreteras con CCR recubierto de asfalto.

En otros casos, es recomendable el uso de extendedoras.

Además, para espesores fuertes, (mayor de 20 cm.) son preferibles las modernas extendedoras provistas de pisones y reglas vibratorias que producen una precompactación importante lo que permite conseguir una regularidad superficial de bastante buen nivel.

El espesor del pavimento se puede construir a base de capas de seis a diez pulgadas, dependiendo del diseño específico.

Si se utiliza motoniveladora para la colocación del CCR, el refino posterior es imprescindible para conseguir un buen acabado. Por tanto, para evitar las aportaciones en capa delgada, que no tienen buena adherencia y producen problemas, el concreto debe colocarse con espesor superabundante (después de una primera compactación la rasante debe quedar 1 o

2 cm por encima de la teórica), refinándolo a base de eliminar siempre material, que puede reutilizarse si el plazo de trabajabilidad es suficiente.

A fin de evitar las juntas longitudinales, la mezcla debe extenderse por anchos completos, siempre que esto sea posible. En caso contrario, deberá obtenerse el ancho total -- dentro del plazo de trabajabilidad del material primeramente colocado en obra; si no se emplean retardadores de fraguado, no debe haber más de una hora de diferencia entre los momentos de colocación de las respectivas colocaciones de dos --- franjas contiguas.

El ancho del pavimetno puede ser crítico para la compactación y texturas superficiales en las orillas del concreto, particularmente si las secciones son mayores de 14 pies de ancho. El material tiende a segregarse en las orillas, debido al efecto de la hélice que distribuye la mezcla en la pavimentadora.

La base deberá mantenerse húmeda durante la colocación -- del CCR.

Compactación del CCR:

La principal ventaja de consolidar el CCR con rodillos vibratorios es que las mezclas pueden ser usadas económicamente; con menos agua se podrá usar menos cemento. Una baja relación agua-cemento es benéfica para la resistencia temprana además las mezclas secas bien consolidadas se pueden abrir -- más pronto al tráfico.

La compactación debe ser tal que garantice una densidad -- mínima del 97% de la máxima proctor, para no obtener resistencias del orden del 15% menos que la obtenida para la den-

sidad máxima. Es conveniente construir un tramo de prueba -- para determinar el número de pasadas necesarias del equipo.

Para los casos habituales puede usarse un equipo compuesto de un rodillo liso vibrante pesado (carga estática sobre la generatriz no inferior a 30 kg/cm) y un compactador de -- neumáticos pesado (carga por rueda no inferior a tres toneladas con presión de inflado no inferior a 8 kp/cm<sup>2</sup>) para cerrar la superficie.

El orden de intervención de los equipos de compactación -- deber ser: en primer lugar, el rodillo vibrante sin vibración para no estropear la calidad de la regularidad superficial; a continuación el rodillo con vibración, finalizando -- con el compactador de neumáticos. Un número de pasadas frecuente es del orden de 8 de rodillo vibrante y de 15 del de neumáticos.

En caso de que se considere necesario efectuar un refino, (sistema que hasta el momento parece proporcionar los mejores resultados en cuanto a regularidad superficial), este debe -- realizarse después de obtener una densidad del orden del 95% proctor. Después que se retiren todos los productos procedentes del refino. Se da paso a la compactación (puede ser necesaria una humectación previa).

Durante la compactación hay que mantener húmeda la superficie mediante riego con agua finamente pulverizada que contrarreste la evaporación superficial. También es aconsejable humedecer la base antes de extender el hormigón. Para conseguir buenos resultados en la compactación, la capacidad de -- soporte de la base debe ser buena.

La compactación de los bordes es un punto sensible. Los -- mejores resultados se consiguen si previamente existe una --

contención lateral, por ejemplo, mediante bordillos colocados. Si no es este el caso, se recomienda extender previamente el material del arcén y posteriormente compactar conjuntamente; si se está extendiendo por semianchos, se recomienda dejar - sin compactar, en la primera banda, un cordón de 40 o 50 cm. de ancho para que actúe de contención lateral, el cual se compactará conjuntamente con el segundo semiancho; produciéndose una junta longitudinal fresca.

Mucho mejores resultados se pueden obtener si el mismo -- número de pavimentadoras que de carriles se hacen correr paralelamente una tras de otra, para crear en forma inmediata una junta fresca. En el caso de tratarse de un solo carril, primero se compactan las orillas y luego el centro, trasladando las pasadas. Aproximadamente se requieren cuatro pasadas de un rodillo vibratorio de 10 toneladas con doble tambor para lograr una consolidación completa del CCR, sin embargo, esto no constituye una regla y la densidad de compactación debe ser verificada siempre.

#### Ejecución de juntas de construcción:

Existen dos tipos de juntas de construcción:

-Junta fresca: Se presenta cuando el concreto es colocado y compactado dentro de los 90 minutos posteriores a la compactación del carril adyacente. Para obtener una junta fresca debe dejarse sin compactar en el borde una franja de 40 a 50 cm., para colocar el carril adyacente y luego compactarlas simultáneamente.

-Junta fría: Ocurre cuando el concreto se ha endurecido - antes de colocar la banda vecina. Las juntas frías longitudinales se deben evitar en calzadas de dos carriles por facilidades constructivas. Siempre que se forme una junta fría, es muy probable que esta desarrolle una baja adherencia.

Cuando la pavimentación se hace a todo lo ancho, no se -- cortan juntas, pues hasta el momento no se ha observado que se formen espontáneamente. Cuando el pavimento se coloca por capas, la colocación de la capa superior debe hacerse antes de transcurridos 60 minutos después de haber compactado la -- capa inferior.

Las juntas transversales frías llamadas también de fin de jornada exigen un cuidado especial, el borde debe dejarse -- vertical, por lo que hay que retirar el material de la cuna de acceso de los rodillos.

- JUNTAS DE CONTRACCION: Las juntas longitudinales de con -- tracción no se necesitan en pavimentos de CCR. En cuanto a -- las juntas transversales, si el pavimento va a terminarse -- con capa de rodadura asfáltica, la tendencia actual es permi -- tir que se formen espontáneamente. Los pavimentos de CCR su -- fren grietas de contracción de 30 a 70 pies, de donde en oca -- siones se desprende el concreto; esto se alivia formando una junta de contracción a distancias prefijadas aserrando el -- concreto en forma profunda (3/4 del espesor).

Si por efecto estético se quieren disponer juntas, estas se serrarán a distancias entre 10 y 15 metros. La edad a la que hay que efectuar el corte no suele ser crítica, pudiendo serrarse a la práctica a las 48 horas. En algunas obras se -- ha observado incluso que la primera fisura ha aparecido en -- un plazo de 15 a 30 días después de la ejecución, dependiendo de la temperatura y del clima.

#### curado del CCR:

La superficie del concreto seco tiene que protegerse de -- la desecación, puesto que debe asegurar una buena capacidad de adherencia de la capa de rodadura (especialmente en el ca

so de tratamientos superficiales). A tal efecto, debe mantenerse constantemente húmeda mediante pulverización fina de agua, que no produzca ningún encharcamiento, el cual daría lugar a problemas en la compactación. Al final de estas operaciones - de extendido y compactación -, hay que extender un tratamiento de curado.

Casi todos los tipos de curado se han intentado con el CCR. Sin embargo, no existen reportes de una evaluación cuantitativa de los efectos de diferentes métodos de curado. En la mayoría de los casos se aplica por lo menos durante siete días, agua por aspersión o mantas húmedas. Con un método por aspersión automático se obtienen mejores resultados. En trabajos pequeños, el curado se puede hacer cubriendo el pavimento con arena húmeda, lo que proporciona mucho mejores resultados que otros métodos.

Si el tráfico va a darse inmediatamente, este tratamiento debe consistir en un riego con emulsión. En los casos en que el tráfico no vaya a ser dado de inmediato, se han utilizado como productos de curado unos látex con polímeros que, a parte de preservar la humedad, han reaccionado con el concreto de los milímetros superficiales, produciendo unos morteros más duros y resistentes. Esta solución es preferible a las emulsiones, pero no puede utilizarse si se dá tráfico inmediato.

El producto de curado que se emplea normalmente es una emulsión; algunos fabricantes de aditivos han desarrollado productos especiales para los concretos secos compactados, que además de crear una película superficial, son aceleradores de endurecimiento de la superficie.

Al cabo de una o dos semanas, o incluso si es posible, un mes, se coloca la capa definitiva. Este suele ser un trata-

miento superficial mono capa con doble engravillado con productos asfálticos. El producto así acabado parece visualmente pavimento asfáltico.

La operación de curado del CCR debe realizarse antes de transcurridas doce horas desde el final de la compactación. Este plazo ha de ser reducido con tiempo cálido y seco.

#### Textura final del pavimento de CCR:

La calidad de la textura superficial en un CCR depende -- del tamaño máximo del agregado grueso, así como de otras características de la mezcla. El uso del compactador neumático después del de rodillos vibratorios puede ayudar a obtener una textura más cerrada, pero un exceso de compactación puede provocar grietas de arrastre.

Salvo en los casos de pavimentos en los que se vaya a --- circular a baja velocidad, la práctica más usual es la extensión de una capa de rodadura.

En los casos en que la regularidad superficial no se puede conseguir con los medios de extendido, conviene acabar -- con una capa delgada de aglomerado asfáltico que corrija los defectos de regularidad. Los mejores resultados se consiguen extendiendo esta capa después de unas semanas de tráfico.

El entendimiento de las características del CCR por parte de los contratistas es primordial para obtener buenos resultados.

La regularidad superficial de cada lote de concreto compactado se controlará dentro de las veinticuatro horas (24 hrs) siguientes a la ejecución. Cuando el incumplimiento de las tolerancias sea debido exclusivamente a la existencia de

puntos altos, estos podrán eliminarse mediante abrasión con el uso de discos de diamante.

En el caso de vías de baja velocidad en las que se quiera dejar la terminación en concreto puede procederse de la siguiente manera:

- Después de realizada la compactación pueden darse unas pasadas adicionales, previa la extensión de una lechada de cemento que cierre totalmente el pavimento.

- Las dos primeras pasadas con rodillo estático, manteniendo en todo el proceso los rodillos húmedos.

- Pasadas posteriores con rodillos de recubrimiento con caucho.

- Efectuar las últimas pasadas con rodillo metálico estático y terminar con rodillo neumático.

Este acabado es solo recomendable para velocidades inferiores a 40 km/hr, como suele ser el caso de urbanizaciones residenciales, estacionamientos industriales, patios de manobras, etc.

#### **IV.2 Pavimento de CCR en la autopista México-Cuernavaca.**

ESTÁ TRUCO 79  
SALA DE LA BIBLIOTECA

Como se mencionó con anterioridad en el capítulo I, una de las aplicaciones del pavimento de concreto compactado con rodillos en México, fué la construcción de un tramo en el -- km 23 de la autopista México-Cuernavaca, con el objetivo de difundir y aplicar la técnica del CCR en la construcción de pavimentos en México.

A continuación se describe el proceso constructivo utilizado en este tramo, se cita la secuencia de diseño y los resultados obtenidos, así como observaciones y recomendaciones pertinentes a la construcción de pavimentos de CCR.

#### PROPUESTA:

El Instituto Mexicano del Cemento Y del Concreto (IMCYC), expuso a la Dirección Técnica de Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos; una alternativa para construir un tramo de pavimento de CCR de 30 m. de longitud en -- el km. 23.00 al 23.30 de la autopista México-Cuernavaca, esta fué aceptada y el primer tramo fué construido a partir -- del 13 de Julio de 1988.

#### DESCRIPCION DE LA INVESTIGACION:

En el diagrama de flujo No. 1 se indican los pasos que se siguieron en el desarrollo de la investigación.

#### PROGRAMA DE PRUEBAS DE LABORATORIO:

##### - Materiales empleados:

Las gravas y las arenas que se utilizaron para la elaboración del CCR necesario en este proyecto, son de origen andesítico y son provenientes de la zona oriente de la ciudad de México.

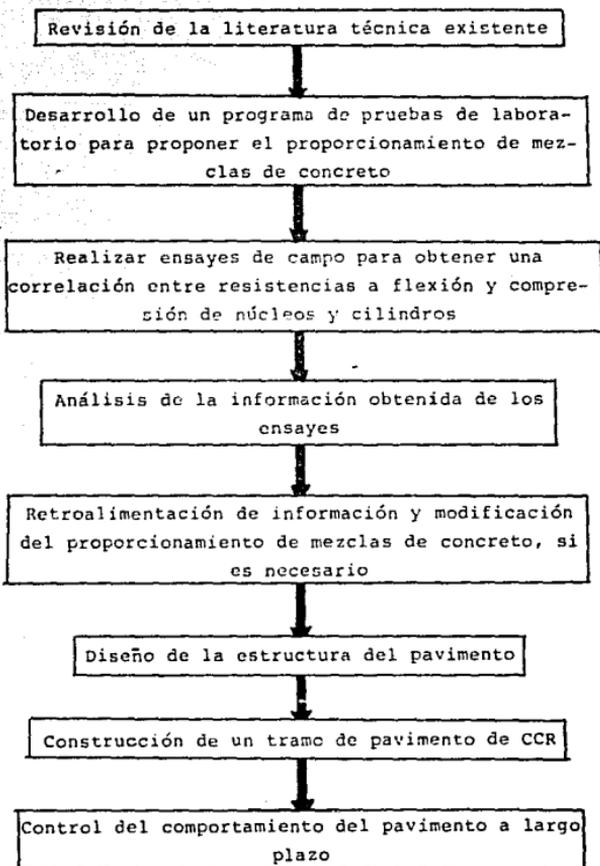
El cemento utilizado en la producción de las mezclas de concreto fué cemento portland tipo 1, el agua que se utilizó fué limpia, libre de impurezas y cuerpos extraños.

- Pruebas de laboratorio:

Se elaboraron diez mezclas de concreto, cuatro de ellas se compactaron utilizando la prueba proctor modificada, y las otras seis se compactaron utilizando el método neumático. La energía especificada que se proporcionó a cada espécimen en el segundo método fué la misma que se utilizó en la prueba proctor modificada, es decir:

$$Ee=27.36 \text{ kgcm/cm}^3.$$

## DIAGRAMA DE FLUJO No. 1



El objetivo de realizar estas pruebas fué verificar si existe una correlación entre los resultados que se obtienen utilizando, la prueba proctor modificada y el procedimiento neumático, además de utilizar dicha información como base para el diseño del espesor de pavimento.

El proporcionamiento de las mezclas empleadas en el laboratorio se muestran en la tabla no. 1.

La relación de arena en los agregados fué 35% en volumen absoluto. Los métodos de ensaye que se utilizaron siguen las normas oficiales mexicanas (NOM). Las pruebas que se efectuaron a las mezclas de concreto fresco fueron; peso volumétrico húmedo, contenido de humedad, contenido de aire y la prueba VeBe modificada. A los especímenes de concreto endurecido se le practicaron las siguientes pruebas: resistencia a compresión simple, resistencia a tensión indirecta, módulo de ruptura y módulo de elasticidad a 7 y 28 días. Para cada edad se ensayaron un par de especímenes.

		Proctor modificada				Procedimiento neumático					
		Mezcla No.				Mezcla No.					
No.	Material	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6
1	Cemento, Kg / m <sup>3</sup>	296	289	283	277	296	289	286	283	280	277
2	Arena, Kg. / m <sup>3</sup>	665	650	635	621	665	650	642	635	628	621
3	Grava, Kg. / m <sup>3</sup> TMA 3/4"	1236	1207	1180	1153	1236	1207	1193	1180	1166	1153
4	Agua, Kg. / m <sup>3</sup>	93	114	134	153	93	114	124	134	143	153
5	Densidad, Kg. / m <sup>3</sup>	2290	2260	2232	2204	2290	2260	2245	2232	2217	2204
6	Agua, / Densidad, %	4	5	6	7	4	5	5.5	6	6.5	7
7	Agua / Cemento	0.31	0.39	0.47	0.55	0.31	0.39	0.43	0.47	0.51	0.55

- Propiedades del CCR en estado fresco:

En la tabla No. 2 se presentan las propiedades de las --- mezclas de concreto en estado fresco empleando la prueba proctor modificada y el procedimiento neumático.

No.	Material	Proctor modificada				Procedimiento neumático					
		Mezcla No.				Mezcla No.					
		1	2	3	4	1	2	3	4	5	6
1	Peso volumétrico húmedo compacto kg. / m <sup>3</sup>	2158	2268	2294	2317	2047	2230	2365	2398	2395	2383
2	Peso volumétrico seco compacto, Kg. / m <sup>3</sup>	2055	2155	2152	2137	1938	2088	2203	2220	2209	2189
3	Contenido de humedad, %	4.5	5.3	6.6	8.4	5.6	6.8	7.4	8.0	8.5	8.9
4	Contenido de aire, %					N	2.7	N	2.2	2.5	2.3
5	Prueba VeBe modificada, seg Inicial (1 = 0) Final (1 = 25 min.)					-	60	60	33	24	26
	N = no se efectuó la prueba					-	N	N	59	42	N

Utilizando el procedimiento neumático se obtienen pesos volumétricos secos mayores hasta de 2220 kg/m<sup>3</sup>, esto se debe posiblemente a que el material grueso se trituró por la energía de compactación del equipo utilizado.

El contenido de aire de las mezclas de concreto varió de 2.2 al 2.7%; en otros ensayos se ha observado hasta un 1.25%. La prueba VeBe modificada se efectuó inmediatamente después de elaborar la mezcla para obtener su consistencia; esta --- prueba se repitió nuevamente a los 25 minutos. El equipo uti

lizado para realizar dicha prueba fué el convencional, lo único que se modificó fué sobre peso de la placa de apoyo, el -- que se incrementó de 3.41 kg. a 10.97 kg.

- Propiedades del CCR en estado endurecido:

Las propiedades de los especímenes en estado endurecido -- a 7 y 28 días, de acuerdo a los dos procedimientos (proctor -- modificada y neumático), se muestran en las tablas No. 3 y 4 respectivamente.

TABLA 3.- PROPIEDADES DEL CCR EN ESTADO ENDURECIDO.PROCTOR MODIFICADA						
No.	Tipo de ensaye	Edad Días	% de humedad			
			4	5	6	7
1	Compresión simple, Kg / cm <sup>2</sup>	7	194	281	251	268
		28	211	350	281	303
2	Tensión indirecta, Kg / cm <sup>2</sup>	7	-	-	27.2	28.8
		28	-	-	28.9	32.4
3	f <sub>cb</sub> / f'c, %	7	-	-	10.9	10.7
		28	-	-	10.3	10.7

TABLA 4. - PROPIEDADES DEL CCR EN ESTADO ENDURECIDO. PROCEDIMIENTO NEUMATICO								
No.	Tipo de ensayo	Eddo - Dias	4	5	5.5	6	6.5	7
1	COMPRESION SIMPLE, Kg. / cm <sup>2</sup>	7	40	192	266	304	297	310
		28	60	160	330	394	365 (1)	329
2	TENSION INDIRECTA, Kg. / cm <sup>2</sup>	7	5.5	20.2	-	27.0	-	25.6
		28	12.5	22.2	-	27.6	-	27.1
3	MODULO DE RUPTURA, Kg. / cm <sup>2</sup>	7	-	40.0 (2)	-	40.8	-	39.3
		28	-	36.0	-	39.8	-	41.2
4	MODULO DE ELASTICIDAD, Kg. / cm <sup>2</sup>	7	15,603	88,602	88,738	107,889	103,343	98,450
		28	-	65,542	102,891	109,596	110,077	103,780
5	$E = K \sqrt{t \cdot C}$ K =	7	2,467	6,394	5,441	6,188	5,997	5,592
		28	-	5,182	5,664	5,521	5,762	5,722
6	f <sub>tp</sub> / t °C, %	7	13.8	10.5	-	8.9	-	8.3
		28	20.6	13.9	-	7.0	-	8.2
7	MR / t °C, %	7	-	20.8	-	13.4	-	12.7
		28	-	22.5	-	10.1	-	12.5
8	$MR = C \sqrt{t \cdot C}$ C =	7	-	2.89	-	2.34	-	2.23
		28	-	2.85	-	2.01	-	2.27

(1) se ensayó un cilindro                      (2) se ensayó una viga

Las resistencias a compresión simple obtenidas con el --- procedimiento neumático a 7 y 28 días son mayores que las de la prueba proctor modificada. Además, el contenido de humedad del 8% para la resistencia máxima de 394 kg/cm<sup>2</sup> a 28 días, obtenida con el procedimiento neumático, coincide con la humedad óptima del peso volumétrico seco máximo. Sin embargo, el contenido de humedad del 5.3% para la resistencia máxima de 350 kg/cm<sup>2</sup> a 28 días obtenida con la prueba proctor modificada, es menor que la humedad óptima del peso volumétrico seco máximo que es del 6%. De acuerdo a los resultados de la prueba proctor modificada, el agua requerida para obtener la máxima resistencia es menor que la del peso volumétrico seco máximo. No hay que perder de vista que lo que nos interesa es ob-

tener pesos volumétricos altos, ya que la resistencia inicial del pavimento está dada por la energía de compactación. De -- aquí que los diseños de mezclas de CCR estarán relacionados -- con el contenido óptimo de humedad.

El esfuerzo de tensión debido a flexión (módulo de ruptu-- ra) se obtuvo ensayando vigas con carga en los tercios, y se encontró que dicho esfuerzo varió del 10 al 20% de la resiste-- ncia a compresión simple del concreto. Una prueba alternativa -- podría ser la de tensión indirecta, en la que el esfuerzo a -- tensión varió del 7 al 14% de la resistencia a compresión -- simple.

El módulo de elasticidad de las mezclas de CCR para el con-- tenido de humedad óptimo es de aproximadamente 110,000 kg/cm<sup>2</sup> a 28 días. Este módulo es bajo si es comparado con los módu-- los de elasticidad obtenidos en concretos convencionales a ba-- ses de agregados andesíticos.

#### PROGRAMAS DE PRUEBAS DE CAMPO:

Antes de construir el pavimento de CCR, se realizaron en -- campo seis mezclas de prueba de 300 lt cada una y se compacta-- ron con equipo vibratorio manual DYNAPAC PR-8.

El objetivo fué verificar algunos puntos importantes tales como:

- Eficiencia del equipo mezclado.
- Uniformidad de la mezcla de concreto y tiempo de mezcla-- do.
- Rendimiento de la mezcla de concreto.
- Segregación del material durante el transporte.
- Pérdida de humedad por temperatura ambiental.

- Contenido de humedad del CCR utilizando horno eléctrico y parrilla de gas.

- Espesores abundados y compactos.

- Número de pasadas del equipo para lograr el grado o porcentaje de compactación deseado.

Las mezclas se diseñaron para contenidos de humedad del 5.0, 5.5, y 6.0%. El proporcionamiento para la mezcla del 6.0% fué:

- 85 kg. de cemento.

- 115 kg. de arena.

- 389 kg. de grava.

- 41 lt. de agua.

La relación grava-arena fué de 1.86, cabe aclarar que en el proporcionamiento se tomó en cuenta el contenido de arena en la grava.

Después de elaborar la mezcla se observó que existía una ligera segregación en la descarga y en el transporte del material; esto se puede evitar con tolvas receptoras que se abren periódicamente para que la descarga del material no sea directa en el equipo de transporte. Otras variables que ayudan a evitar la segregación son el tamaño máximo del agregado, el que se limita a 19 mm. (3/4"), y el contenido de finos, que es mayor en comparación con el concreto convencional.

La compactación se realizó en tres etapas:

- a) En la primera se dieron dos pasadas (una pasada se considera ida y vuelta) con rodillo estático para armar el cuerpo de la mezcla de CCR;

b) En la segunda etapa se dieron de 4 a 6 pasadas con rodillo vibratorio para el acomodo del material granular;

c) Y finalmente en la tercera etapa se dieron dos pasadas con rodillo neumático para cerrar la textura de la superficie. (Fotografía No. 1).

En la mezcla de CCR no se utilizaron aditivos retardantes, ya que el tiempo de dosificación, mezclado, transporte y colocación estuvieron comprendidos en el lapso de una hora, tiempo especificado para que el concreto no pierda sus propiedades mecánicas.

De las mezclas compactadas se extrajeron corazones de --- 2" x 4" (Fotografía No. 2), y se ensayaron a compresión simple, y los resultados se dan a conocer en la tabla No. 5.

TABLA 5.- RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE DE CORAZONES			
No.	W, %	Edad, días	f'c, Kg. / cm <sup>2</sup>
1-1	6	31	456
2-1	5	31	420

DISEÑO DEL ESPESOR DEL PAVIMENTO:

El pavimento de CCR se consideró como un pavimento rígido, ya que gran parte de la capacidad estructural es proporcionada por la losa. El espesor del pavimento fué diseñado de --- acuerdo a los procedimientos tradicionales.

La información relacionada con la clasificación vehicular registrada en la estación maestra CPI 01 (Topilejo), así como el número de ejes sencillos y tándem, fué proporcionada por

Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos. El tránsito diario promedio anual de ambos carriles y la tasa de crecimiento observados de 1982 a 1985 fueron consultados en el manual de datos Viales 1986 de la Dirección General de Servicio Técnicos de la Subsecretaría de Infraestructura de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

El pavimento de CCR está apoyado en una sub-base granular de 12 cm. de espesor tratada con cemento. El módulo de ruptura fué de 40 kg/cm<sup>2</sup> a 28 días, y se estima que la vida del pavimento será de 30 años.

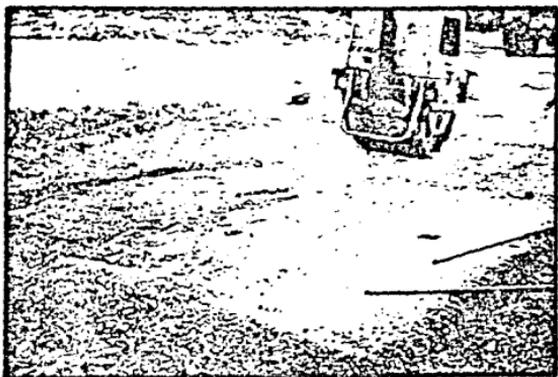


Foto 1: Compactación  
de mezclas de CCR --  
con rodillo manual --  
en campo.



Foto 2: Extracción  
de corazones de --  
CCR en tramos de --  
prueba.

### CONSTRUCCION DE UN TRAMO DE PAVIMENTO DE CCR:

El tramo de pavimento que se construyó tiene una longitud de 30 m. por un ancho de 3.10 m. y un espesor de 15 cm. Se encuentra apoyado sobre una sub-base granular de 12 cm. de espesor tratada con cemento al 3%. La proporción grava-arena fué de 55-45.

El peso volumétrico alcanzado en la sub-base fué del 94% de la prueba porter estándar. Cabe aclarar que la subrasante del pavimento de CCR quedó constituida por la anterior sub-base de un pavimento rígido y por el terreno natural. Por otra parte, a nivel de subrasante se encuentra un conjunto de ductos que alimentan de energía a las casetas de pago de cuota en la mencionada autopista.

### Producción:

Los agregados que se utilizaron en la producción del CCR se almacenaron en dos compartimientos; uno para material cuyo tamaño fué de 3/4" -No.4-, y otro para tamaños que pasan la malla No.4. El cemento portland tipo 1 se almacenó en un silo y el agua que se utilizó fué limpia y libre de impurezas. El volumen total de material a utilizar antes de iniciar la construcción fué del 100%.

La planta de mezclado que se empleó en la producción del CCR es de las que cuentan con bache trepadora, equipo que proporciona un mezclado enérgico. La dosificación de los ingredientes fué por peso y la producción de 12 a 15 m<sup>3</sup>/hr; el transporte de la mezcla se realizó por medio de camiones de volteo de 6 m<sup>3</sup> de capacidad; la distancia entre la planta de mezclado y la obra eran 11 km.

### Colocación:

El tendido de CCR puede ser mediante una pavimentadora --

(Finisher) o una motoconformadora; a utilizarse de preferencia el primer equipo. En este caso, por ser un tramo de pavimento de 30 m. de longitud no se justificó el transporte de la pavimentadora y la mezcla de CCR se tendió a mano. Previo al tendido de la mezcla se dió un ligero riego de agua a la sub-base.

El espesor del pavimento de CCR fué de 15 cm. compacto, - para lo que se consideró un porcentaje de abundamiento del - 30%.

Compactación:

La compactación se inició con dos pasadas de un compactador estático de 10 ton, posteriormente se dieron de 4 a 6 pasadas en un compactador DYNAPAC vibratorio de 10 ton.

Por último, se dieron dos pasadas con el equipo neumático de 7 ton. Para perfilar y controlar la pendiente del pavimento se utilizaron niveles a cada lado de las guarniciones. En zonas de difícil acceso se utilizó un compactador manual para alcanzar el peso volumétrico compacto de proyecto.

Curado y puesta en operación:

El curado de la superficie del pavimento de CCR se realizó con agua por un periodo de una semana, y no fué aplicado tratamiento adicional; un aspecto de la textura de rodamiento se muestra en la fotografía No. 3.

El carril fué abierto al tráfico después de 60 hrs. de haber sido construido.

### Pruebas de calidad:

Antes de iniciar la producción del CCR se verificó la granulometría de los materiales y se calculó el contenido de humedad natural de los agregados, para corregir el proporcionamiento de la mezcla de CCR. Posteriormente se obtuvo el contenido de humedad del CCR en la planta y en el sitio de la obra para verificar la pérdida de humedad durante el transporte, y se elaboraron cilindros con la prueba proctor modificada para obtener la resistencia a compresión simple a 7 y 28 días.

Se verificó la uniformidad de la superficie del pavimento con una regla de 3 m. de longitud, pues la profundidad de las depresiones permitidas son menores a 1 cm.

### COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO A LARGO PLAZO:

El pavimento no presentó agrietamiento después de 72 horas, debido a que la longitud del tramo es muy pequeña (30 m.). Además, a 15 m. se instaló un equipo que detecta el número de ejes de los vehículos que circulan por dicho tramo. El patrón de agrietamiento que siguen las juntas de contracción transversales del pavimento de CCR es de 15 a 20 m.

Por otra parte, a los 21 días de la construcción se presentó una ligera pérdida de finos en la superficie del pavimento. Esto se debe a que se dió un pequeño riego de material fino (sellado) después de la compactación final.

Además se estableció un programa de extracción de núcleos del pavimento de concreto compactado con rodillos para analizar la resistencia a lo ancho de la sección y para verificar el espesor real del pavimento.

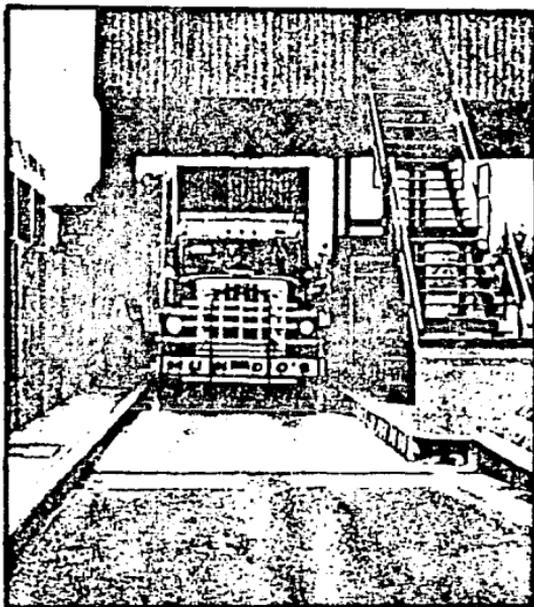


Foto 3: Tramo de pavimento de CCR puesto en operación.

**RECOMENDACIONES:**

De acuerdo a la experiencia obtenida se pueden dar las siguientes recomendaciones:

1. Para obtener el proporcionamiento óptimo habrá que -- realizar diferentes mezclas de CCR en laboratorio y -- en campo.
2. El módulo de ruptura se obtendrá mediante el ensaye -- de vigas con carga en los tercios.
3. El tiempo de elaboración de la mezcla de CCR, trans--

- porte, tendido y compactación no deberá ser mayor a una hora.
4. No se debe sobrecompactar el pavimento de CCR, ya que esto en lugar de beneficiarlo lo perjudica.
  5. La compactación en zonas de difícil acceso se podrá realizar con equipos manuales y dentro del tiempo especificado.
  6. No realizar riegos de material fino en la superficie del pavimento después que ha terminado la compactación, pues al abrir el pavimento al tránsito pueden perderse. Lo que se deben buscar son mezclas uniformes y evitar al máximo la segregación.
  7. El tiempo de curado del pavimento es muy importante y será benéfico que se mantenga durante un plazo de una semana.
  8. Es conveniente obtener relaciones previas entre el peso volumétrico compacto del lugar y el número de pasadas del equipo de compactación, con el fin de lograr el peso volumétrico seco máximo, ya que de lo contrario tendrán que utilizarse equipos nucleares cuyo costo es muy elevado.
  9. Es conveniente realizar algunos ensayos utilizando la pista circular de pruebas, para así obtener y proponer ayudas de diseño.
  10. Es importante seguir el comportamiento del pavimento a lo largo de su vida útil, a fin de corregir deficiencias en proyectos futuros.

**CAPITULO V: "CONTROL DE CALIDAD PARA EL CONCRETO  
COMPACTADO CON RODILLO"**

**V.1: Programa de control de calidad.**

En cualquier tipo de obra que vaya a construirse se deberá seguir un programa de control de calidad, con el objeto de definir los puntos vitales de la construcción y ejercer en ellos una vigilancia razonable y científica, para que las obras cumplan determinados requisitos de seguridad, calidad, economía y tiempo.

Algunos aspectos importantes de un programa de control de calidad se presentan en la tabla No. 1.

En la definición del conjunto de especificaciones se encuentran las generales y las complementarias o particulares del proyecto.

Las especificaciones generales son normas elaboradas por instituciones o dependencias oficiales, están orientadas a la construcción de obras civiles, toman en cuenta el clima y el procedimiento de construcción.

Las especificaciones complementarias son elaboradas para obras específicas que se adaptan precisamente a casos particulares y son formuladas en función de las características específicas de los materiales de la zona de construcción, están apoyadas en el proyecto. lo que hace que estas sean las más importantes.

Las especificaciones generales pueden ser contractuales, constructivas y técnicas; y las especificaciones complementarias incluyen únicamente normas constructivas y técnicas. -- Las especificaciones contractuales son las que relacionan al contratista con el contratante. Finalmente podemos decir que las especificaciones constructivas Y Técnicas si se pueden estandarizar. (Ver tabla No. 2)

En la tabla No. 3 se presentan algunas características -- que deben cumplir las pruebas de laboratorio.

ASPECTOS IMPORTANTES DE UN PROGRAMA DE CONTROL DE CALIDAD.

\* Definición previa del nivel de calidad requerido en la construcción.

¿Que se desea?

¿Como puedo ordenar y programar las actividades?

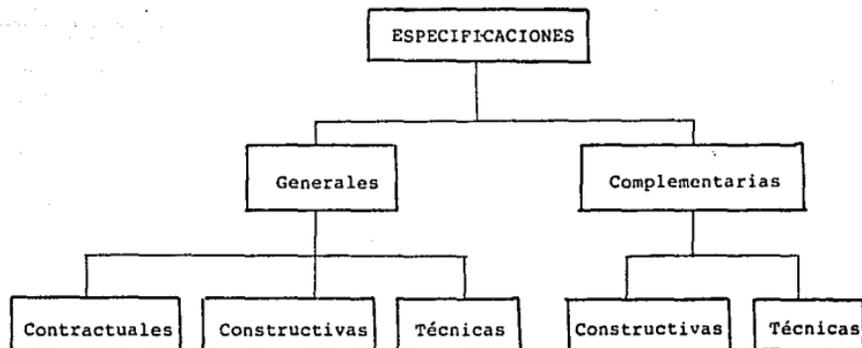
¿Como determinar que está bien?

\* Definición del conjunto de especificaciones de construcción que se van a utilizar.

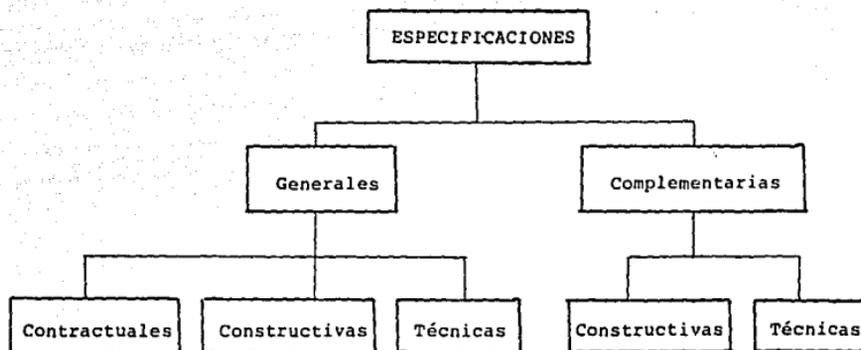
\* Definición del conjunto de pruebas de laboratorio que son la base metodológica y técnica del programa de control de calidad.

\* Criterio con el que habrá de manejarse el volumen de información que resulte de las pruebas de laboratorio.

T A B L A 1.



T A B L A 2.



T A B L A 2.

CARACTERISTICAS DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO

- \* Estar dirigidas a la comprobación.
- \* Ser sencillas y estandarizadas.
- \* Ser rápidas en su realización.
- \* Fácil de interpretar.
- \* Requerir equipo económico.

**V.2: Elaboración de mezclas de CCR y pruebas realizadas.**

El material que será utilizado para elaborar las mezclas de CCR deberá seleccionarse mediante un muestreo aleatorio y de acuerdo a lo que marcan las normas vigentes, además -- los agregados deberán protegerse para que no pierdan su humedad natural.

La granulometría típica que constituye el material para el CCR se puede apreciar en la gráfica 1, y es comparada con la granulometría típica del material que es utilizado en -- las mezclas de concreto convencional. Para agregados grandes las curvas se mueven hacia la izquierda y para tamaños pequeños se mueven hacia la derecha. Ambas curvas permiten una variación pero las mezcla de CCR generalmente dupli--- can el rango de las mezclas de concretos convencionales. Se puede apreciar también, que la cantidad de finos no plásticos en el CCR puede variar de un 5% a un 10%.

Las mezclas de CCR pueden ser compactadas con un contenido de vacíos de solamente 0.5% a 1.5%, esto siempre y cuando se utilicen granulometrías que aseguren suficientes partículas de cada tamaño para ocupar los espacios que dejan -- las partículas de tamaño mayor. Los finos deberán tener tam bién una adecuada granulometría por debajo de la zona de la malla 200.

Si el porcentaje de finos no es incluido, el contenido -- de vacíos será mayor y habrá problemas en la compactación -- a menos que se incluya una ceniza volante o cemento extra.

La curva de CCR presentada en la gráfica 1, es similar a la de 11 presas entre las que se encuentran: Copperfield, -- Willow Creek, Kerville y Galesville. La granulometría del -- concreto convencional es comparable con presas tales como: Little Goose, Lower Monumetal y Lower Granite.

Después de realizar el proporcionamiento de acuerdo al di

seño especificado, se procedió a mezclar el material en una revolvedora convencional de 1/2 saco o 1 saco de capacidad. Como se manejan mezclas muy secas, se tendrá especial cuidado de que en la parte inferior no se acumulen los finos - de la mezcla.

Del volumen aproximado de 200 a 220 lt se realizaron las siguientes pruebas a los especímenes de CCR: resistencia a la compresión simple, resistencia a la tensión indirecta y cálculo del módulo de elasticidad. De la mezcla de CCR fresca se obtuvo el peso volumétrico compactado y el concreto - para verificar expansiones o contracciones del material.

Para compactar el concreto de los cilindros se utilizó - un pisón de impactos neumático que proporcionó de 1550 a -- 1750 golpes por minuto. Es importante contar con un lubricador para el equipo neumático.

Los cilindros contenido el CCR se compactaron en tres capas en un cilindro de P.V.C. de 15 x 30 cm., ubicado dentro del molde metálico. Aproximadamente cada capa de los especímenes de CCR se compactó en un lapso de 15 a 20 segundos.

Las actividades para elaborar los cilindros de CCR; 24 - aproximadamente por cada mezcla; para calcular el contenido de aire y obtener el peso volumétrico compactado de la mezcla de CCR se realizaron simultáneamente. Esta sincronización es muy importante debido a que el contenido de humedad de la mezcla de CCR es muy bajo, y puede perderse fácilmente con la temperatura del medio ambiente.

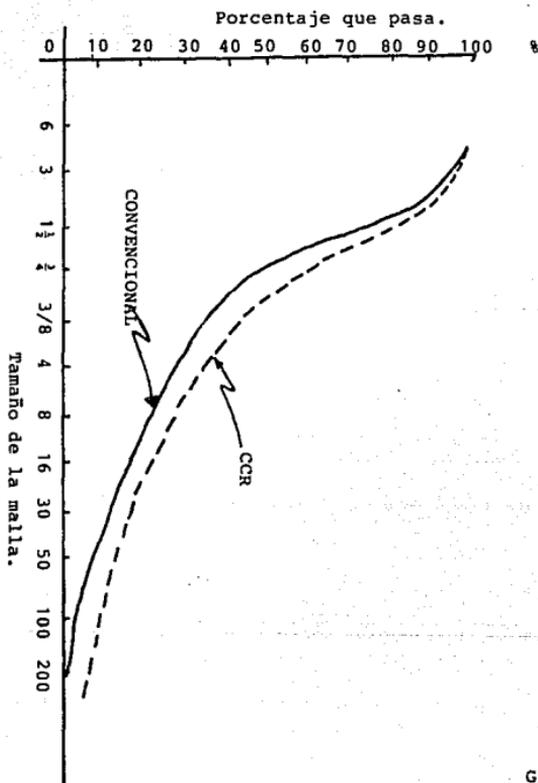
Cuando se llegó el momento de ensayar los cilindros a -- cierta edad, se extrajeron del cuarto de curado y se procedió a retirar el forro de P.V.C. para facilitar la operación de descimbrado. Posteriormente los cilindros fueron cabeceados y finalmente ensayados a compresión simple en la -

máquina universal, o ensayados a tensión indirecta.

El descimbrado de las barras de CCR debe realizarse con bastante cuidado y utilizando el equipo destinado para tal operación, ya que de lo contrario los índices pueden aflojarse y en consecuencia no se tendrán resultados satisfactorios (no está permitido reparar las barras).

En caso que no utilizáramos las barras de CCR para controlar las posibles expansiones o contracciones, se recomienda utilizar el método de cambio volumétrico autógeno, que consiste en elaborar un cilindro de CCR de 9 X 18" y obtener -- las lecturas de cambio de volumen.

El volumen de información que se obtiene del conjunto de pruebas de CCR es bastante grande, por lo que se recomienda la utilización de algún sistema de cómputo que sea auxiliar, para procesar la información de los ensayos.



Gráfica 1.  
GRANULOMETRIAS TÍPICAS.

**v.3: Control de CCR en la obra.**

El laboratorio de campo deberá asegurarse que existe suficiente pasta de la mezcla de CCR para llenar todas las cavidades de los agregados y cubrir perfectamente la superficie de las partículas. Por lo anterior es muy importante realizar un control muy estricto en el contenido de agua en la mezcla de CCR.

El tiempo de compactación puede ser utilizado como una medida de la consistencia de CCR y de la eficiencia del equipo de compactación. Algunos investigadores recomiendan un rango de 30 a 60 segundos como tiempo práctico para que el equipo vibratorio sea capaz de realizar una compactación satisfactoria.

El método VeBe modificado es un procedimiento de prueba bastante razonable para verificar la consistencia es el número de segundos que se requieren para compactar un volumen de CCR en un recipiente de 9.5" de diámetro. Por ejemplo, para mezclas plásticas cuyo revenimiento puede ser de 7.5 a 12.5 cm. se requieren de 1 a 3 segundos para compactar la mezcla.

Por otra parte, la densidad del CCR se puede medir en el campo con un "nuclear gauge" de doble sensor. El contenido de humedad se determina con la densidad del CCR a profundidades que varían de 0 a 60 cm. El cálculo de la densidad deberá obtenerse inmediatamente después de la compactación de cada capa de CCR.

Como puede verse, no basta con tener un control de calidad en el CCR solo en el laboratorio, si no que hay que cuidarlo mucho en la obra también, pues hay varios factores que pueden cambiar sus características de un lugar a otro.

**C O N C L U S I O N E S .**

Como se pudo constatar en la realización de este trabajo, la tecnología conocida como Concreto Compactado con Rodillos (CCR), está avanzando rápidamente ya que ofrece una serie de ventajas con respecto a las demás tecnologías; en este caso; para pavimentar nos representa una serie diversificada de bondades con respecto a los pavimentos de concreto convencional y también con respecto a los pavimentos asfálticos.

Es, sin lugar a dudas, una tecnología con un campo de acción bastante amplio, a la que cada día se le trata de aplicar en diferentes tipos de proyectos que se van a llevar a cabo.

En el capítulo I se hace mención de algunas de estas aplicaciones alrededor del mundo, siempre y cuando sean aplicadas a pavimentos, y se puede notar que ya son varios países, incluyendo a México, los que ya están aprovechando las ventajas de esta nueva tecnología para pavimentos de diferentes finalidades como pueden ser:

- Patios de maniobras en muelles.
- Pavimentos urbanos.
- Establecimiento para aeronaves en aeropuertos.
- Instalaciones militares.
- etc.

En este mismo capítulo se puede afirmar que nuestro país tiene amplias posibilidades de hacer un uso más amplio de este sistema de pavimentación, ya que México cuenta indudablemente con los recursos naturales y capacidad tecnológica y humana para sacar el mayor provecho posible y hacer un uso más extenso de esta tecnología y considerarla una opción bastante competitiva para trabajos de pavimentación.

El capítulo II menciona las características del CCR, tanto en sus puntos a favor como sus puntos en contra; entre --

las ventajas que nos ofrece esta nueva tecnología, podemos destacar las siguientes:

- Mayor durabilidad del pavimento.
- Apertura casi inmediata al tráfico.
- No necesita de cimbra.
- Menor contenido de cemento.

También se hace una comparación del asfalto contra el concreto en lo que a pavimentación se refiere, esto considerando siete factores importantes al momento de tener que tomar una decisión; estos siete factores son:

1. Economía.
2. Servicio.
3. Diseño.
4. Mantenimiento.
5. Construcción.
6. Consumo de energía.
7. Seguridad.

Una vez analizados detenidamente estos factores, y también analizadas las características del concreto y del asfalto; se podrá hacer una decisión más acertada acerca del método o material que nos conviene utilizar de acuerdo a nuestro presupuesto y a las características de la obra a ejecutar.

Se puede notar en el capítulo III que son diversas las pruebas que hay que realizar al CCR desde su mezclado, hasta un chequeo periódico una vez estando colocado; estas pruebas se deben realizar con mucho cuidado ya que son las que nos -

van a determinar en gran parte el éxito o fracaso del trabajo que realizemos con CCR.

Es necesario continuar investigando las propiedades mecánicas de los pavimentos de CCR, pues son fundamentales en -- el diseño de la estructura.

Además se ha encontrado que el CCR es muy sensible a la calidad de los agregados utilizados y a su granulometría; -- su densidad, equipo utilizado y experiencia del personal que llevará a la ejecución el proyecto; de todo esto anteriormente mencionado, el capítulo IV de esta investigación, nos da una idea más clara, ya que trata del método constructivo para pavimentos de CCR; y es ahí donde se ve la importancia de los factores anteriormente mencionados. Cada propietario, -- calculista y constructor, deben tener muy en cuenta el reto de balancear estas variables contra el costo cuando se escoge el CCR para sus proyectos.

Los equipos que se utilizan para la colocación del CCR -- van desde las motoniveladoras hasta las pavimentadoras convencionales y últimamente unas pavimentadoras con una pre--- compactación integrada en la misma máquina.

El procedimiento constructivo del pavimento puede ser -- asimilado fácilmente por las empresas constructoras, ya que se trata de técnicas conocidas y que solo requieren seguir -- cuidadosamente las especificaciones constructivas.

Por último, en el capítulo V, se nos habla de los programas de control de calidad convenientes de llevar a cabo en -- el CCR para lograr una mejor supervisión de esta técnica que aunque hasta ahora no ha dado mayores problemas, todavía es indudable que queda mucho por investigar acerca de la misma.

Como toda nueva tecnología, el interés en ella va creciendo y el número de proyectos actuales son varios, además de -- que cada nuevo proyecto contribuye a refinar y mejorar el -- diseño, especificaciones, método constructivo y equipos utilizados en esta técnica del concreto compactado con rodillos.

Naturalmente, el éxito o fracaso de la aplicación del CCR en determinado proyecto, va a depender de varios factores -- que afectan el producto terminado.

Cada día más personas están considerando el CCR como una opción nada despreciable para mayores proyectos tomando en -- cuenta sus ventajas; pero evaluando además los inconvenientes o desventajas de esta tecnología de acuerdo al tipo de -- aplicación que se le piense dar.

Por sus características, el concreto compactado con rodillos (CCR), ha sido utilizado además como material de construcción en presas y los resultados obtenidos han sido excelentes. Este es un campo de acción muy promisorio para la di fusión de las aplicaciones del CCR.

Es sin lugar a dudas, una tecnología a la que cada día -- se le trata de aprovechar en nuevas aplicaciones y que hasta el momento ha proporcionado resultados por demás satisfactorios.

Esta técnica de pavimentación es una posibilidad adicional de construcción de vías de comunicación, y se muestra -- como una alternativa más y no como una sustitución de otras.

Podemos decir que esta es una nueva posibilidad de aplicación del concreto en el área de los pavimentos, que por sus ventajas constructivas y sus menores costos con respecto a -- la pavimentación tradicional, está llamada a convertirse en una solución con un uso muy extenso. Además tiene a su favor

una serie de ventajas que hace que su introducción en el medio sea fácil; no excluye el campo de trabajo de las firmas con equipos de pavimentación con concreto asfáltico, ni a los técnicos que conocen y trabajan con la pavimentación tradicional con concreto; por el contrario, a todos les abre más posibilidades de acción.

Que los pavimentos de CCR prosperen en el futuro, va a depender en gran parte de su comportamiento, funcionamiento y economía cuando se les compare frente a otras alternativas de construcción.

Podemos afirmar que somos afortunados de poder tener en el concreto tal versatilidad, que nos proporciona múltiples usos en múltiples mercados.

Finalmente se puede decir que esta es una tecnología que tiene todo lo necesario para perdurar.

## REFERENCIAS

## R E F E R E N C I A S .

1. Keifer, Oswin. Pavimentos de concreto compactado con rodillos. Revista IMCYC vol. 24, núm. 189, febrero 1987.
2. Pavimentos con hormigón compactado con rodillos (HCR). Boletín del cemento portland Argentino. Año - 19, núm. 121, enero-febrero 1988.
3. Structural desing of roller compacted concrete for industrial pavement. Concrete information. Portland Cement Association. 1987.
4. Hormigones secos compactados con rodillos. Aportes técnicos. Chile, núm. 13, 1985.
5. Schrader, E.K. Compaction of roller compacted concrete. -- Consolidation of concrete. ACI-SP-96, 1977.
6. Hansen, K.D. Roller compacted concrete. A pavement for today and tomorrow. Concrete International. - vol. 9, núm. 2, febrero 1987.
7. Larson, John. Concrete Kaleidoscope. Roller compacted concrete: projects and equipment. Concrete International. vol. 9, núm. 2, febrero 1987.
8. Nieto, R.J. José. La tecnología del concreto compactado -- con rodillos (CCR). Construcción y tecnología. IMCYC. vol. 1, núm. 5, octubre 1988.
9. Figueroa Gallo, Donato. Pavimento de concreto compactado -- con rodillos (CCR). Construcción y tecnología. IMCYC. vol. 1, núm. 5, octubre 1988.

10. Concreto compactado con rodillos. Curso IMCYC, Chihuahua, 1988.
11. Figueroa Gallo, Donato. El concreto compactado con rodillo (CCR) y su control de calidad. Revista mexicana de la construcción. Núm 398, enero de 1988.
12. Jofré, Carlos. Utilización de los hormigones compactados en carreteras. Experiencia española sobre la pavimentación con cemento. ICPC, 1989.