

2 ej.  
127

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**U. N. A. M.**

**APLICACION PRACTICA. EVALUACION DE MEZ-  
CLADO, COLOCACION Y CONTROL DE CALIDAD  
DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS  
DENTRO DE LOS PAVIMENTOS EN LAS CARRETE-  
RAS Y AEROPUERTOS DE MEXICO.**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**  
**INGENIERO CIVIL**  
**PRESENTA:**

**JOSE ANTONIO NIETO RODRIGUEZ**



MEXICO, D. F.

1989

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



## **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.

TITULO : APLICACION PRACTICA, EVALUACION DE MEZCLADO, COLOCACION Y CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS DENTRO DE LOS PAVIMENTOS EN LAS CARRETERAS Y AEROPUERTOS DE MEXICO.

## C A P I T U L O S

1. INTRODUCCION.
  - 1.1 DEFINICION DE C.C.R.
  - 1.2 ANTECEDENTES GENERALES DE APLICACION.
  - 1.3 OBJETIVO GENERAL DE LA TESIS.
  - 1.4 APORTACION.
  - 1.5 CRITERIO EMPLEADO.
2. DISEÑO DE LA MEZCLA DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS (C.C.R.)
  - 2.1 MATERIALES.
  - 2.2 PRUEBAS DE LABORATORIO.
    - 2.2.1 CONTROL DE CALIDAD.
  - 2.3 ANALISIS DE RESULTADOS.
3. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO DE C.C.R.
  - 3.1 VARIABLES EMPLEADAS EN EL DISEÑO.
  - 3.2 TIPO DE PAVIMENTO.
  - 3.3 PROCEDIMIENTO DE LA PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. (P.C.A.)
  - 3.4 PROPUESTA DE LA ESTRUCTURACION.
4. EQUIPO DE CONSTRUCCION.
  - 4.1 CLASIFICACION.
  - 4.2 BREVE DESCRIPCION DEL EQUIPO EXISTENTE EN MEXICO APLICABLE A LA CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS DE C.C.R.
    - 4.2.1 POSIBLES COMBINACIONES DE EQUIPO.
    - 4.2.2 MOTOCONFORMADORAS.
    - 4.2.3 COMPACTADORES.
      - 4.2.3.1 COMPACTADORES NEUMATICOS.
      - 4.2.3.2 COMPACTADORES METALICOS.
        - 4.2.3.2.1 COMPACTADORES METALICOS VIBRATORIOS.
        - 4.2.3.2.2 COMPACTADORES METALICOS ESTATICOS.
    - 4.2.4 CAMION DE VOLTEO.
    - 4.2.5 PAVIMENTADORA.
    - 4.2.6 PLANTA DOSIFICADORA.
    - 4.2.7 EQUIPO OPCIONAL.
      - 4.2.7.1 CARGADORES FRONTALES.
      - 4.2.7.2 MOTOESCREFAS.
5. PROPUESTA DE CONSTRUCCION DEL TRAMO DE EXPERIMENTACION.
  - 5.1 DESCRIPCION GENERAL DE LA OBRA.
  - 5.2 PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO.
  - 5.3 ANALISIS ECONOMICO.
  - 5.4 POSIBLES PROBLEMAS EN CAMPO Y SOLUCIONES.
  - 5.5 PRUEBAS DE LABORATORIO EN CAMPO.
    - 5.5.1 CONTROL DE CALIDAD EN CAMPO.
  - 5.6 ANALISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CAMPO CON LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO.
6. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES.

## 1. INTRODUCCION.

El hombre siempre ha tenido la necesidad de desplazarse de un lugar a otro y para ello ha buscado la manera más conveniente de hacerlo, entendiéndose por esto la conjugación de ahorro de tiempo y esfuerzo, comodidad, velocidad y *economía*.

Consecuentemente, los pavimentos nacieron al mejorar los caminos por donde originalmente circulaban los hombres y animales, y han evolucionado desde la adecuación del suelo natural, por *compactación* y consolidación, hasta el estado de refinamiento técnico donde se encuentran actualmente.

Los pavimentos tienen una clara función social, aunque para el común de las gentes pasan desapercibidos; quizá porque se construyen directamente sobre el suelo y no tienen el atractivo de las estructuras verticales, la espectacularidad de los puentes o la monumentalidad de las presas hidroeléctricas; o simplemente porque el transitar de un sitio a otro es algo tan rutinario que se ha perdido la consciencia de la existencia de las vías y los pavimentos. Sin embargo, no cabe la menor duda de que su importancia es equiparable a la de cualquiera de los ejemplos señalados.

Generalmente los pavimentos han sido clasificados en dos grandes grupos: *FLEXIBLES Y RIGIDOS* y siguiendo con esa clasificación se han estudiado todas sus diferencias. Al hablar de diferencias me refiero a los materiales que los componen, el procedimiento constructivo, costos, etc.. Pero para mi modo de ver las cosas

existiría un tercer tipo de pavimento con muchas ventajas y que se encuentra fuera de dicha clasificación; este es el construido con Concreto Compactado con Rodillos.

El estudio del concreto compactado con rodillos (C.C.R.) generalmente se ha referido en nuestro país a la construcción de presas, lo cual en gran medida ha influido para considerarlo como un material adecuado a comportarse bajo los efectos de presión hidrostática, resistir la descarga de un vertedor por encima de él y nos hace pensar que casi siempre su masa se forma por varias capas colocadas una encima de la otra, hasta alcanzar la altura de proyecto de la cortina. Sin embargo, este material que en la mayoría de los casos, debido a la falta de conocimiento y a su parecido a tierra húmeda es tratado como tal, no ha sido analizado en todo su potencial económico, no solamente en la construcción de presas sino también su aplicación en la construcción de pavimentos. Me refiero al aspecto económico en su totalidad, ya que si bien es cierto que es muy importante tener un costo inicial bajo, también lo es tener un costo de mantenimiento bajo. Esto es de vital importancia en la construcción de carreteras y aeropuertos donde muchas veces es necesario cerrar cierta área de carretera para hacer una reparación. Ahora bien si consideramos lo difícil que resulta dar mantenimiento a una pista aérea y nos encontramos con un procedimiento constructivo que emplea un material muy resistente, el cual nos proporciona una vida útil del pavimento mucho mayor, es obvio que lo tomemos en cuenta desde la elaboración del proyecto.

### 1.1 DEFINICION DE C.C.R.

El Comité 207 del Instituto Americano del Concreto (ACI-American Concrete Institute) define al concreto compactado con rodillos como un material de concreto seco, cuya mezcla formada por grava de tamaño máximo de 3" en presas y 3/4" para pavimentos, arena con finos no plásticos y con puzolanas, cemento y agua. Se coloca con equipo pesado y se compacta mediante vibración externa. El comité 207 del ACI está especializado en concreto masivo, existe el Comité J25-E del ACI que se especializa en *pavimentos de CCR*.

Una forma de diferenciar entre Suelo-Cemento y C.C.R. es que este último contiene agregados gruesos y cuando endurece adquiere propiedades similares a las de un concreto masivo colado en sitio.

Este concreto tiene un revenimiento cero y su proporcionamiento debe hacerse de manera que no se desarrolle presión de poro hidrostática, lo que requiere en comparación con concretos convencionales de la misma resistencia, de mucho menor contenido de agua, permitiendo además el soporte del equipo de compactación.

Generalmente se le confunde por su apariencia de terracería húmeda de gravas bien graduadas, por lo que es muy recomendable que se le recuerde al personal de campo que está manejando concreto.

El procedimiento constructivo consiste en tender capas

continuas de concreto y compactarlas inmediatamente después de su colocación, por lo cual se combinan las propiedades mecánicas del concreto con las propiedades económicas de colocación de terracerías.

El CCR difiere del concreto convencional principalmente en que el primero tiene la consistencia suficiente para soportar un rodillo vibratorio además de la graduación de los agregados y el contenido de cemento adecuados para su compactación mediante el rodillo. Además no requiere cimbras ni juntas de colado. En la mayoría de los casos, ni si quiera es necesario cortar juntas después de endurecido el pavimento.

#### *1.2 ANTECEDENTES GENERALES DE APLICACION.*

El sistema ha tenido diversas aplicaciones. En Paquistán, se utilizó en la reparación de la presa Tarbela. En Gran Bretaña, se construyeron algunas carreteras y en Estados Unidos y Japón, presas que alcanzan una altura hasta de 100 m.

Otras aplicaciones del C.C.R. pueden ser cimentaciones masivas para diversas estructuras, revestimiento de canales y construcción de bordos y diques.

En general, puede decirse que la utilización del CCR comenzó a tener auge a partir de la década del los 70's, cuando se pensó que era tiempo de disminuir los costos de construcción de presas de concreto masivo (Walter H. Price), aunque la fecha de terminación de la primera presa de CCR, Shimajigawa en Yamaguchi, Japón es en 1980.

Existe la creencia de que el CCK se originó tal vez en el otoño de 1923, en el camino de Sheridan, en Chicago E.U.. A donde se construyó una losa de concreto de siete u ocho pulgadas de espesor, construida con una técnica conocida como Pavimento de Concreto Comprimido "Armorplated" (American Vibrolithic Corporation, 1928) y cuya descripción era la siguiente: " 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 la relación agua cemento más baja posible. y produce un pavimento de resistencia y densidad máximas ".

La elevada densidad y resistencia se lograba incrustando una cantidad específica de grandes pedazos de roca triturada, por medio de una plataforma de madera con hule sobre la cual circulaban unos rodillos vibratorios. Posteriormente se daba un acabado a la superficie con cucharas de mango largo distribuyendo uniformemente la delgada capa de mortero que se forma en la superficie debido al proceso de consolidación. La densidad de este concreto se demostraba haciendo retroceder un camión de 10 toneladas (inglesas) sobre el concreto fresco comprimido. Lo anterior, que puede ser considerado como un gran adelanto en la tecnología de pavimentos quedó de repente olvidado en el tiempo. Reportes al terminar los años 50's y 60's indican que el uso de concretos pobres y bases estabilizadas antes populares, empezaron a declinar, tal vez debido a dos razones:

1. El desarrollo de la pavimentadora deslizable para asfalto.
2. El uso extensivo de materiales asfálticos para la construcción de caminos.

Como se mencionó anteriormente, a principio de los años 70's comienza una nueva era en la utilización del concreto y su modificación en cuanto al empleo en pavimentos se vé claramente en el Concreto Compactado con Rodillos (CCR), en un esfuerzo por encontrar nuevas aplicaciones que permitan economizar tanto el costo inicial de construcción de un pavimento así como el costo de mantenimiento del mismo. Sin duda alguna, uno de los pioneros en esta área fue el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers). Como consecuencia se encontró que los pavimentos de CCR podían competir con los pavimentos de Concreto Convencional. El pavimento de CCR resultó rápido de construir y con un ahorro potencial que vá de un cuarto a un tercio del costo de un pavimento de concreto convencional (Pittman y White, 1985). Además hay que tomar en cuenta que la transición entre el Pavimento Asfáltico y el Pavimento de CCR fue relativamente simple ya que se puede utilizar el mismo equipo con un reducido grupo de personas.

Este procedimiento constructivo y su aplicación en pavimentos ha sido recibido exitosamente en varios países, por ejemplo podemos citar algunos de los pavimentos construidos en:

*Tasmania, Australia:*

1. El camino Duncan: Consiste en una capa CCR de 180 mm de espesor.

construida sobre el antiguo camino, el cual se había deteriorado. Posee una resistencia a la compresión de 30 MPa.

2. Los pavimentos TEMCO (Tasmanian Electro-Metallurgical Company Pty Ltd-Compañía Electrometalúrgica de Tasmania): Estos pavimentos tienen particularmente un uso muy severo dado que se transportan minerales que contienen ferro-manganeso muy abrasivo en plataformas muy pesadas. El primero de estos pavimentos se construyó con una planta de mezclado remota, por lo que fue necesario utilizar un aditivo retardador del fraguado en cantidad suficiente que permitiera tener un tiempo límite entre la fabricación y la colocación de dos horas. El pavimento consiste en una capa de 250 mm de espesor y 40 MPa de resistencia a la compresión.
3. El camino Tea Tree: Es un tramo de prueba construido en un camino público cerca de Hobart y mide 800 metros de largo por 7 metros de ancho, fue construido por el Departamento de Caminos Principales de Tasmania (DMR-Department of Main Roads). El diseño de este tramo de prueba tiene un espesor mínimo de 150 mm y una resistencia a la compresión de 30 MPa.
4. La plataforma de la Marina de Hobart: Este proyecto comprende un camino y un estacionamiento de 1500 m<sup>2</sup> y se construyó con una subbase estabilizada con cemento de 100 mm de espesor, una base de CCR de 125 mm de espesor y una resistencia a la compresión de 30 MPa y una carpeta asfáltica de 25 mm de espesor.

*Experiencias del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos.*

(U.S. Army Corps of Engineers):

1. Fuerte Stewart, Georgia: Es un camino de acceso al area donde se encuentran los tanques, se construyó en julio de 1983 y el pavimento tiene 71.3 m de largo por 6.1 m de ancho y el rango en el que varia el espesor va de 230 mm a 330 mm. La mezcla fué compactada con un rodillo vibratorio metálico de 8.6 toneladas.
2. Fuerte Hood, Texas: Consiste en una superficie de 15,180 m<sup>2</sup> y 250 mm de espesor, construido para soportar el peso de vehiculos de 54 toneladas transitando sobre dicha superficie, fue construido en julio de 1984 y el CCR se colocó en capas de 150 mm de espesor con una pavimentadora asfáltica convencional y compactado con un rodillo vibratorio metálico de 9.1 toneladas.
3. Cuartel Harvey; Kitzingen, Alemania Occidental: El proyecto fué para un Área de estacionamiento y se construyó en octubre de 1986 en aproximadamente ocho días y consiste en una superficie de 14,200 m<sup>2</sup> y 180 mm de espesor.
4. Fuerte Campbell, Kentucky: Es un tramo de prueba de 180 mm de espesor, 76.2 m de longitud y 9.1 m de ancho, se construyó como preparación para la construcción de una superficie de 41,800 m<sup>2</sup> para estacionar vehiculos muy pesados.
5. Area de estacionamiento, Aberdeen, Maryland: Es una superficie 17,693 m<sup>2</sup> y 216 mm de espesor.

*Construcción de pavimentos comerciales con CCR en Estados Unidos:*

1. Patio de maniobras de contenedores Piggy-back Burlington-Northern en Denver Colorado: Superficie aproximada 113,714 m<sup>2</sup> con un espesor variable de 367.5 mm a 490 mm.
2. Estacionamiento de Trailers Burlington-Northern en Denver Colorado: Superficie aproximada de 26,756 m<sup>2</sup> y espesor promedio de 147 mm.
3. Patio de maniobras de la Compañía Eléctrica Western Farmers en Hugo, Oklahoma: Superficie aproximada de 30,937 m<sup>2</sup> y espesor de la capa de CCR de 318.5 mm.
4. Puerto Massachusetts en Boston Massachusetts: Superficie aproximada de 63,546 m<sup>2</sup> y espesor de 441 mm.
5. Terminal de las líneas de carga Central en Austin Texas: Superficie aproximada de 72,743 m<sup>2</sup> y espesor variable de 171.5 mm a 196 mm.

Se han desarrollado experiencias similares en caminos, principalmente en España, Suecia y Canadá.

*1.3 OBJETIVO GENERAL DE LA TESIS.*

Debido a las propiedades de resistencia, rapidez y economía que posee este novedoso procedimiento constructivo, es necesario difundir su conocimiento para su aplicación en nuestros pavimentos, ya sea en patios de maniobras de muelles y estaciones de ferrocarril.

en carreteras y en aeropuertos.

#### 1.4 APORTACION.

Esta tesis es una recopilación de información referente a Concreto Compactado con Rodillos y al final se tiene la lista de referencias más amplia en la materia.

#### 1.5 CRITERIO EMPLEADO.

Se elaboró la tesis mediante el diagrama siguiente para tener continuidad entre capítulos ya que todos se relacionan entre sí para poder fabricar CCR.

### 2. DISEÑO DE LA MEZCLA

1. INTRODUCCION    3. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA    5. TRAMO EXPERIMENTAL  
DEL PAVIMENTO

### 4. EQUIPO DE CONSTRUCCION

6. RECOMENDACIONES Y  
CONCLUSIONES

## 2. DISEÑO DE LA MEZCLA DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS (C.C.R.)

Las mezclas pueden hacerse con equipo convencional o por medio de una planta de mezclado continuo. Sin excepción, se dosifica el peso de concreto para cada batchada. La proporción en que se dosifica cada elemento será conforme a los resultados de las pruebas de laboratorio y los obtenidos en los tramos de prueba antes de iniciar la construcción.

La mezcla puede transportarse hasta el sitio de colocación por medio de bandas, camiones de volteo, motoescrepas o una combinación de éstos. Se colocarán indicadores y señalamientos para el control y la identificación de concretos, en cuanto sean mezclados y descargados en los transportes y sitios de colocación, para extenderlos con la ayuda de maquinaria pesada y posteriormente compactarlos mediante un rodillo liso de cualquier clasificación. Dependiendo del tipo del mismo dependerá el número de pasadas.

El concreto se colocará dentro de los treinta (30) minutos siguientes al mezclado, empleando un tiempo mínimo, para impedir la pérdida de agua o que se formen juntas frías. Cuando el material se encuentre en esas condiciones, debe removerse.

No es permitido añadir agua, cemento y agregados a la mezcla, una vez que ésta haya salido de la mezcladora. Debe impedirse que la superficie del concreto se contamine y en caso de lluvia, debe suspenderse la colocación del concreto.

Los cambios volumétricos potenciales ocasionados por la pérdida de humedad o la contracción por secado son significativamente menores en el C.C.R., debido a que contiene mucho menos agua de mezclado que el concreto convencional. Los cambios volumétricos ocurridos por la disipación del calor de hidratación también son reducidos, en razón del menor contenido de cemento y posiblemente el método de colocación, puesto que el concreto convencional se coloca en hiladas de 45 a 60 cm, mientras que el C.C.R. es colocado en capas sucesivas y uniformes, cuyo espesor puede variar entre 20 y 30 cm. Las capas delgadas permiten una mejor disipación de calor.

## 2.1 MATERIALES.

Los agregados para concreto compactado con rodillos son materiales pétreos clasificados como gravas, arenas y puzolanas. Los agregados pueden ser producto de la explotación de depósitos naturales en los cauces de los ríos, o bien producto de la explotación y la trituración de canteras de roca. Las gravas y arenas se almacenan clasificadas, separándolas de manera que no se mezclen entre sí, a fin de obtener la granulometría de proyecto.

Las cenizas volantes, puzolanas subproducto de la utilización del carbón mineral no coquizable en las plantas carboeléctricas, se utilizan en un porcentaje máximo del 6% con respecto al peso de la grava y arena, y generalmente no son sustituto del cemento cuando se usan cementos puzolánicos.

El objetivo principal del proporcionamiento del CCR es el

de dar compactabilidad y estabilidad a la masa de concreto para que esta alcance la resistencia, durabilidad y permeabilidad requeridas por un determinado proyecto.

La selección de los materiales y su proporcionamiento son controlados por los requerimientos de diseño, disponibilidad de materiales en la región y la planeación de los procedimientos de colocación. Uno de los principios de proporcionamiento de la mezcla de concreto masivo es la de tener el máximo de agregados con la mínima cantidad de cemento la cual desarrolle las propiedades requeridas al mínimo costo.

Uno de los objetivos de diseño en CCR es el de obtener una adecuada unión entre las capas. La consistencia seca de CCR, que generalmente se obtiene de mezclas que contienen agregados mayores de 1 1/2 pulgadas, genera problemas en la adherencia del concreto fresco con el endurecido de CCR.

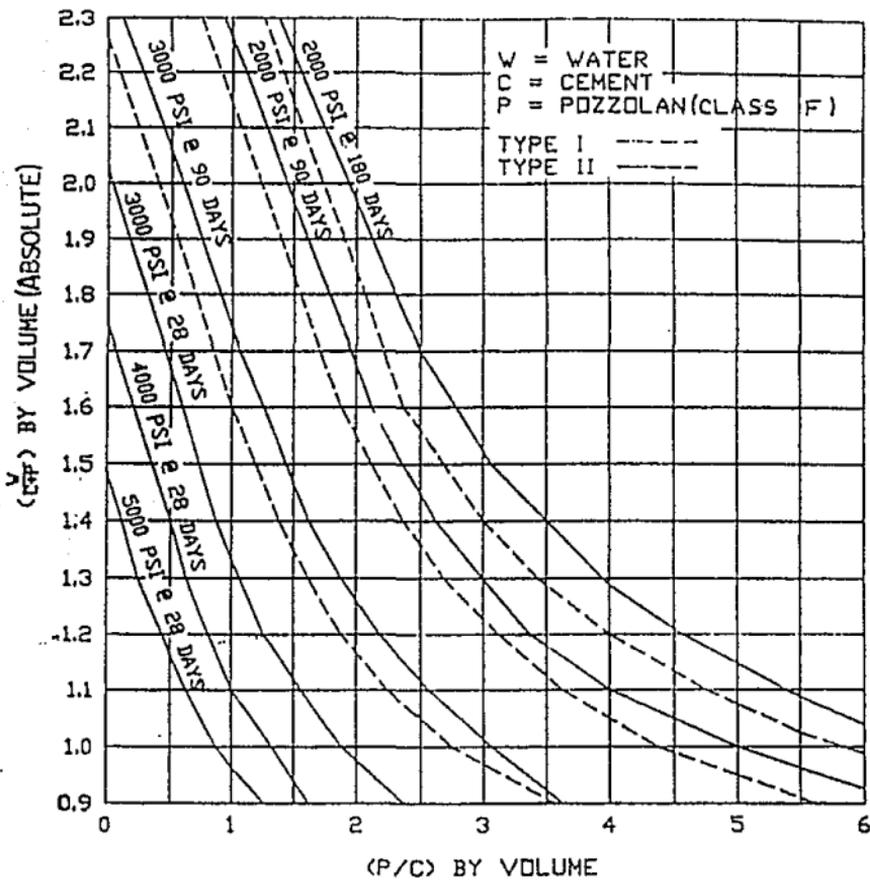
*2.1.1 Información general:* El CCR puede ser fabricado con cualquiera de los tipos básicos de cemento o una combinación de cemento y puzolanas. Para la selección de materiales cementantes con la resistencia química al ataque de los sulfatos y reacciones a la alcalinidad con cierto agregados pueden seguirse los procedimientos del ACI-318 y ACI-201.2R.

La resistencia del CCR, depende primordialmente de la calidad de los agregados; el grado de compactación; y las proporciones de cemento, puzolanas y agua. El tipo de material

cementante tiene un efecto significativo en el grado de hidratación y en el desarrollo de esfuerzos, y como consecuencia tiene efectos significativos que afectan las resistencias a edades tempranas del concreto.

La gráfica (1), puede ser empleada como una guía en el proporcionamiento para la obtención de resistencias iguales variando las cantidades de cemento y puzolanas clase F dentro de los requerimientos ASTM C 618, aunque se pueden obtener resultados similares con otras puzolanas.

Se debe dar cierta consideración a la generación de calor provocada por los materiales cementantes en el CCK. Es recomendable utilizar cementos que generen poco calor de hidratación y la máxima cantidad de puzolanas posible de acuerdo con los requerimientos de resistencia. La eficiencia de las puzolanas en la reducción del calor de hidratación, depende de los requerimientos de resistencia y la capacidad de las mismas para reducir la cantidad de agua requerida así como el contenido de cemento. El beneficio económico de la reducción de calor a través del empleo de puzolanas depende del costo relativo de los materiales, incluyendo su acarreo. Las estructuras con bajos requerimientos de resistencia y sus correspondientes bajos contenidos de cemento quizá no aseguren un beneficio en su resistencia por el uso de puzolanas. Las estructuras que requieren alta resistencia o altos contenidos de cemento y que hayan usado altos porcentajes de puzolanas tienen los dos beneficios economía y menor temperatura.



Gráfica (1) Curvas de Proporcionamiento para Concretos de igual Resistencia.

2.1.2 *Cemento*: El CCR puede ser fabricado con cualquiera de los tipos básicos de cemento Portland. Para aplicaciones de concreto masivo es recomendable el empleo de cemento con características de baja generación de calor.

2.1.3 *Puzolanas*: En general en México no se emplean las puzolanas, pero cabe mencionar que algunas de sus características se encuentran contempladas dentro de las normas del ASTM C 616. Dado que la mayoría de los proyectos recientes de CCR utilizan las puzolanas clase F (Fly ash- cenizas volantes), mencionare algunas de sus propiedades y los propósitos por los cuales se emplean: (1) Como un reemplazo parcial del cemento para reducir el calor de hidratación, (2) Para reducir el costo, y (3) Como un mineral que se adiciona a la mezcla para dar trabajabilidad a las partículas finas.

2.1.4 *Agregados*: La selección de los agregados y el control de la graduación de los mismos son factores importantes que influyen en la calidad y las propiedades del CCR. La variabilidad de los agregados durante la construcción afecta significativamente los requerimientos de cemento y de agua, que a su vez, afectan la resistencia y el rendimiento. Los requerimientos de resistencia a la compresión y de unión en las juntas de construcción son factores que deben ser considerados en las especificaciones de los agregados. Si se requiere una mayor calidad en el concreto, se reflejará en la calidad de los agregados y su adecuada graduación. En situaciones de menor calidad, el CCR que se coloque puede ser fabricado con varias bancos de agregados que inclusive no estén contemplados dentro de las graduaciones del ASTM o los requerimientos de calidad del ACI.

Dependiendo de la obra que se trate y si es un pavimento, empleando los materiales más cercanos dado el volumen que se requiere.

**2.1.4.1 Agregado grueso:** En el CCR normalmente no se tienen ahorros importantes en el costo del material si se emplean tamaños de agregados mayores a 3" (76 mm) ya que estos tienden a segregarse; en general el tamaño óptimo de un agregado para presas es de 1 1/2" y en pavimentos es de 3/4". Si el costo del material es un factor importante dentro de la selección del tamaño máximo del agregado, entonces el costo que se tiene al controlar la segregación debe tomarse en cuenta o las consecuencias de la segregación deben ser tomadas en cuenta para establecer la resistencia, la unión entre capas y los requerimientos de permeabilidad.

Cuando se emplea concreto masivo, el control de la temperatura resulta ser más importante que el costo que se tiene por la selección del tamaño máximo del agregado.

Los requerimientos de graduación de los agregados para diferentes mezclas de CCR varían significativamente de una a otra. Esta variación en los agregados afecta directamente la variación en la consistencia del CCR.

**2.1.4.2 Agregado fino:** La graduación del agregado fino tiene una fuerte influencia dentro de los requerimientos de la pasta de concreto así como en la compactabilidad del CCR. Generalmente se emplean graduaciones de arena que se encuentren dentro de los límites de la norma ASTM C 33. Este tipo de arena requiere mayor cantidad de

material cementante que el que se requiere para una mezcla pobre utilizando agregados con mayor cantidad de partículas finas que los permitidos por la norma ASTM C 33. Cuando no se emplean puzolanas, un incremento del 5 % que pase la malla No. 100 dentro del porcentaje de agregado fino puede resultar muy benéfico para la mezcla.

Los agregados no lavados con un rango mucho mayor dentro de la graduación que el especificado por la norma ASTM C 33 se han empleado satisfactoriamente. La graduación del agregado y el contenido de finos afecta la compactabilidad relativa del CCR y puede influir para tener un mínimo número de pasadas con rodillo vibratorio para obtener la consolidación total de un espesor específico de capa. También afecta los requerimientos de agua y cemento necesarios para llenar los huecos o vacíos en el agregado y envolver las partículas de agregado.

*2.1.5 Proporcionamiento de los agregados:* La cantidad de esfuerzo requerido para compactar la mezcla es directamente proporcional al volumen del agregado grueso. Si existe suficiente pasta de cemento, un rango bastante grande en la graduación de los agregados gruesos y finos no afecta significativamente las densidades del CCR compactado en el lugar con un gran equipo vibratorio. Esto permite el empleo de los agregados que se tengan disponibles en el lugar y producir un CCR aceptable.

La graduación en el agregado fino tiene un efecto que ayudará a tener requerimientos mínimos de pasta de cemento. En

lugares donde no se tengan puzolanas disponibles, puede resultar económico mezclar arena o introducir partículas minerales muy finas para reducir los vacíos del agregado fino.

#### 2.1.6 METODOS DE PROPORCIONAMIENTO DE LA MEZCLA PARA CCR..

2.1.6.1 *Información general:* En general se han empleado un sinnúmero de métodos para el proporcionamiento de la mezcla en las estructuras de CCR a través del mundo, haciendo muy difícil generalizar cualquiera de esos procedimientos como un método estándar. Dichos métodos han diferido significativamente dependiendo de su localización, los requerimientos de diseño de la estructura, la disponibilidad de los materiales, el equipo de mezclado y de colocación empleados y el tiempo de proyecto.

Existen tres diferentes procedimientos de diseño para la mezcla, los cuales se verán brevemente en este capítulo. Dichos procedimientos son: (1) Proporcionamiento del CCR para alcanzar los límites especificados de consistencia. (2.1.6.2); (2) Contar con las mezclas de prueba para seleccionar la combinación de agregados y materiales cementantes más económica. (2.1.6.3); (3) Proporcionamiento del CCR utilizando los conceptos de compactación de susillos. (2.1.6.4)

Otros métodos de proporcionamiento de la mezcla han sido desarrollados por el Ministerio de Construcción Japonesa y por el USCE (United States Corps of Engineers-Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos.).

2.1.6.2 *Proporcionamiento del CCR para alcanzar los límites especificados de consistencia.*

2.1.6.2.1 *Información general:* El proporcionamiento empleado para obtener la trabajabilidad óptima para tener una adecuada compactación se basa en la Prueba de Compactabilidad de Vebe para determinar la trabajabilidad y optimizar la proporción de agregados. (La descripción de esta prueba se presenta en el capítulo 2.2.1 Pruebas de Laboratorio de esta tesis).

2.1.6.2.2 *Contenido de agua:* Las mezclas de CCR con exceso de vacíos se consolidarán aproximadamente al 98 % de su densidad libre de aire. Las variaciones en los contenidos de humedad dentro de la mezcla afectan directamente el esfuerzo de compactación requerido para obtener una total consolidación. (Para obtener el contenido de humedad refiérase al capítulo 2.3 Análisis de resultados de esta tesis).

2.1.6.2.3 *Contenido de cemento:* (Ver capítulo 2.3 Análisis de resultados de esta tesis).

2.1.6.2.4 *Proporcionamiento de agregado grueso para obtener los requerimientos mínimos de mortero:* El proporcionamiento de agregado grueso depende simultáneamente de los efectos combinados de los huecos o vacíos del agregado, el área de los mismos y la forma de las partículas. Cuando se controlan las graduaciones mediante la observación directa y la separación de los agregados dependiendo de

sus tamaños en fracciones, el contenido de vacíos puede ser controlado dentro de los límites permisibles. Las densidades secas y el control combinado de graduaciones dependen sobre todo del proporcionamiento, el número de tamaños que se tienen separados y la variación de la graduación dentro de cada uno de los tamaños.

Una vez provisto satisfactoriamente el control de la graduación, un incremento en el TMA (tamaño máximo del agregado), incrementará la densidad seca y reducirá el contenido de vacíos. La forma de las partículas de los agregados que son fabricados artificialmente es determinada básicamente por dos cosas: Las características de depósito a través del tiempo de la roca madre y el tipo de quebradora. La compactabilidad se incrementa con agregados de aristas redondeadas o en forma de cubo y disminuye con los agregados que tienen formas planas.

Para cualquier TMA, el mínimo volumen de agregado que produzca una consistencia sin revenimiento puede ser establecido mediante el proporcionamiento de la cantidad de mortero que rinda aproximadamente los requisitos de resistencia y ajustando las proporciones de agregado grueso y mortero para asegurar un revenimiento cero. Las proporciones de agregado fino, material cementante y agua deben permanecer en una relación fija durante estos ajustes.

2.1.6.2.5 *Proporcionamiento de agregado fino para obtener los requerimientos mínimos de pasta:* EL contenido de vacíos del agregado fino se determina mediante la medición del peso seco y generalmente

Maximum size aggregate, in.	6	4½	3	1½	¾	¾
Absolute volume, percent of unit concrete volume	63-63	61-63	57-61	52-56	46-52	42-48

Tabla (1) Volumen absoluto de agregado grueso por unidad de volumen de concreto.

Mix type	Maximum size aggregate, in.					
	¾	¾	1½	3	4½	6
	Unit water content, lb/yd <sup>3</sup>					
Interior mass	195	180	165	145	135	130
Bedding mix	215	200	185	—	—	—

Tabla (2) Requerimientos aproximados de agua en la mezcla de CCR sin puzolanas (Agregados explotados en planta quebradora).

varía entre 34 y 42 %. El contenido de vacíos puede ser menor dependiendo de la ineficiencia de la medición. Esto hace una pequeña diferencia desde una cantidad de cemento mínima, puzolanas (si se usan), aire y contenido de agua requeridos para asegurar un volumen sólido que debe llenar todos los huecos del agregado fino y envolver todas las partículas de agregado. El mínimo volumen de pasta puede ser determinado por las curvas de densidad máxima en la misma forma que se determina el contenido óptimo de agua para los suelos. El procedimiento es como sigue:

1. Utilizando la relación agua-cemento de la mezcla, añada agregado fino en incrementos iguales y mida la densidad de los especímenes utilizando los procedimientos de compactación o vibración prolongada.
2. Grafique la densidad contra los volúmenes de pasta calculados.
3. Determine el volumen de pasta que produzca la máxima densidad de los especímenes de mortero. Este volumen de pasta, como proporción del volumen total de mortero, debe ser incrementado en un 5 o 10 % en proporción con las mezclas masivas. Para mezclas especiales como de encamado para juntas de construcción, esta proporción debe ser incrementada un 20 o 25 %.

*2.1.6.2.6 Seleccionando los proporcionamientos de la mezcla para CUR:*  
 La consistencia de mezclas con cero revenimiento proporcionadas de acuerdo con las normas del ACI 211.3, generalmente no soportarán el peso de grandes rodillos vibratorios sin una alteración al procedimiento. El contenido de agua de las mezclas debe estar mucho

mas cerca de la tabla (2) de esta tesis que de la tabla 2.3.1(c) del ACI 211.3. Utilizando el procedimiento ACI 211.3 y el contenido de agua de la tabla (2), una relación agua-cemento máxima de peso de 0.6 es recomendable para mezclas sin puzolanas para asegurar el suficiente volumen de pasta para llenar los huecos de los agregados. Esto producirá resistencias mayores.

Un método alternativo de proporcionamiento de la mezcla que se aproxima a la densidad máxima es el siguiente:

1. Determine el mínimo volumen de pasta como se vió en 2.1.6.2.5, considerando que un porcentaje de vacíos recomendable en el volumen de pasta  $P_v$  varia de 38 a 42%.
2. Seleccione las relaciones  $P/C$  (puzolana/cemento) y  $W/(C+P)$  agua/(cemento+puzolana) de la gráfica (1) para una mezcla de prueba.
3. Determine el volumen de agregado grueso  $V_{ag}$  de la tabla (1) o como se vió en el punto 2.1.6.2.4.
4. Calcule el volumen de mortero sin aire por metro cúbico- $V_m$  asumiendo un 2% de aire atrapado con la fórmula siguiente:

$$V_m = C_v(0.98) - V_{ag}$$

donde  $C_v$  = volumen unitario de concreto.

5. Calcule el volumen de pasta sin aire  $V_{pasta}$  utilizando la relación

seleccionada en el paso 1 como  $P_v$ , con la fórmula:

$$V_{\text{arena}} = V_m (P_v)$$

6. Determine el volumen de agregado fino  $V_{ra}$ :

$$V_{ra} = V_m (1 - P_v) \quad \text{o} \quad V_{ra} = V_m - V_{\text{arena}}$$

7. Determine el volumen de agua de la prueba  $V_w$ :

$$V_w = V_{\text{arena}} \frac{W/(C+P)\delta}{1 + W/(C+P)\delta}$$

8. Determine el volumen de cemento  $V_c$ :

$$V_c = V_w / \frac{W/(C+P)\delta}{1 + P/C}$$

9. Determine el volumen de cenizas volantes o puzolanas  $V_p$ :

$$V_p = V_c (P/C)$$

10. Establezca el peso de los diferentes materiales multiplicando los volúmenes individuales por sus respectivos pesos de los volúmenes unitarios.

11. Revise la consistencia de la mezcla mediante el empleo de la prueba de Vebe (descrita en el capítulo 2.2.1 de esta tesis.) para determinar el mínimo tiempo de vibración externa en segundos necesarios para asegurar la máxima densidad de compactación.

12. Con los volúmenes finales de agregado grueso, elabore dos mezclas adicionales, una con mayor y otra con menor relación  $W/(C+P)$ . Grafique la resistencia contra la relación  $W/(C+P)$  para la selección final de la mezcla.

2.1.6.3 *Proporcionamiento de la mezcla de prueba para obtener la combinación agregado/material cementante más económica.*

2.1.6.3.1 *Información general:* Las mezclas de un número razonable de estructuras de CCR han sido proporcionadas basándose en los resultados de las pruebas físicas de las muestras que se elaboran en las pruebas, utilizando una graduación fija del agregado mientras que se varía los contenidos de cemento y se comparan los resultados. Con base en estos resultados, se elaboran otras pruebas en las cuales se fija el contenido de cemento mientras que se ajusta la proporción adecuada de agregados.

La combinación más económica de material cementante y agregados que proporcione la resistencia de diseño requerida y que se pueda usar en campo es la que se selecciona para el proyecto. El proporcionamiento de estas mezclas da como resultado que el contenido de pasta esencialmente rellene los huecos entre los agregados. Este procedimiento se ha empleado con contenidos de cemento que varían en un rango de 50 a 500 lb/yd<sup>3</sup> que equivale de 19.66 kg/m<sup>3</sup> a 296.6 kg/m<sup>3</sup> con resistencias a un año que varían de 550 a 5300 psi.

2.1.6.3.2 *Contenido de agua:* El contenido de agua se ajusta para

asegurar la adecuada compactación. Este corresponde al nivel de humedad justo debajo del cual se presenten rodadas u ondulamientos de la mezcla fresca durante la construcción y por encima del que el secado de la mezcla cause un incremento en la segregación. La observación del mezclado y acarreo de la mezcla fresca con varias cantidades de agua es necesaria para que nos ayude a establecer el contenido de humedad apropiado para las pruebas. Durante la construcción, el control de el contenido de agua se determina visualmente y se checa mediante la prueba de densímetro nuclear.

2.1.6.3.3 *Materiales cementantes*: El primer proporcionamiento de las mezclas de prueba se elabora sin puzolanas y el segundo se elabora con igual cantidad de cemento y de puzolanas. Se pueden elaborar mezclas adicionales variando la cantidad de puzolanas para determinar la combinación cemento-puzolanas más económica y que llene los requerimientos de diseño. Cuando se tiene la opción de producir agregados finos o se puede tomar como material de préstamo si es que se tiene en la localidad, es necesario elaborar varias series de pruebas para establecer una reducción en cemento o puzolanas, asegurando que se optimice la relación de vacíos del agregado fino. La disminución del 1% de cemento por cada 3% de aumento en los finos se ha llevado a cabo en algunas mezclas dando buenos resultados en otros casos no ha afectado en nada.

2.1.6.3.4 *Agregados*: Utilizando los bancos de materiales que se tengan disponibles, la combinación más económica de material que se pueda emplear para producir una superficie plana dentro de los anchos límites que se presentan en la tabla siguiente y la gráfica (2) se



emplea para fijar la graduación de proyecto.

TABLA DE EJEMPLO DE GRADUACION TIPICA DE CCR

Tamaño de malla	Porcentaje que pasa	Porcentaje retenido acumulado	Porcentaje retenido
4 pulg	100	0	0
3 pulg	98-100	0-2	0-2
1/2 pulg	95-99	1-5	1-3
2 pulg	86-96	4-14	3-9
1 1/2 pulg	75-90	10-25	6-11
1 pulg	63-77	23-37	12-13
3/4 pulg	56-69	31-44	7-8
3/8 pulg	43-53	47-57	13-16
No. 4	33-43	57-67	10
No. 8	25-35	65-75	8
No. 16	19-29	71-81	6
No. 30	14-24	76-86	5
No. 50	10-18	82-90	4-6
No. 100	6-13	87-94	4-5
No. 200	4-10	90-96	2-3

La experiencia ha demostrado que cualquier graduación

dentro de este rango ha producido una buena mezcla de CCR con agregado que varían en su origen desde basaltos, granitos, etc. ya sean naturales o artificiales.

El contenido de agregado fino en CCR usualmente está dentro del rango de 35 a 50 % de la graduación combinada. Se necesita generalmente para minimizar la segregación y el rompimiento del agregado grueso al chocar roca contra roca durante la compactación.

El contenido de finos permisible depende de la plasticidad, la tabla (3) muestra los límites que se han utilizado. Si los finos no son plásticos, se permite una mayor cantidad de ellos. En la mayoría de los proyectos de CCR se ha utilizado un 10% del peso total del agregado.

2.1.6.3.5 *Selección de la mezcla de trabajo:* La selección de la mezcla de trabajo apropiada se basa en las propiedades de las pruebas de resistencia y elasticidad de las diferentes mezclas. Típicamente, estas pruebas incluyen pruebas de resistencia a la compresión y de módulo de elasticidad a los 2, 7, 14, 28, 56, 90, 180 y 365 días. De todos estos datos se debe obtener la mezcla que sobre todas las demás sea la más económica. En general la proporción agua-cemento debe estar entre 0.4 y 2.0, se han obtenido resistencias mayores con menores proporciones agua-cemento pero esto se atribuye a un cambio en el volumen de pasta de cemento.

2.1.6.4 *Proporcionamiento utilizando los conceptos de compactación de suelos.*

Liquid limit	Plastic index	Maximum percent passing No. 200
0-25	0-5	10.0
0-25	5-10	9.0
0-25	10-15	4.0
0-25	15-20	3.0
0-25	20-25	1.5
25-35	0-5	9.0
25-35	5-10	8.0
25-35	10-15	6.5
25-35	15-20	5.0
25-35	20-25	1.5
35-45	0-5	8.5
35-45	5-10	5.5
35-45	10-15	4.0
35-45	15-20	2.0
35-45	20-25	1.5
45-55	0-5	5.5
45-55	5-10	5.0
45-55	10-15	3.5
45-55	15-20	3.0
45-55	20-25	1.5

Tabla (3) Contenido máximo permisible de finos. Nota: La cantidad máxima permisible que pasa la malla No. 200 depende de la plasticidad (ASTM D 4318) de todos los finos (muestra lavada) que pasan las mallas No. 40 o No. 50. La experiencia ha demostrado que los resultados son similares para ambas mallas.

Liquid limit	Plastic index	Maximum percent passing No. 200
0-25	0-5	10.0
0-25	5-10	9.0
0-25	10-15	4.0
0-25	15-20	3.0
0-25	20-25	1.5
25-35	0-5	9.0
25-35	5-10	8.0
25-35	10-15	6.5
25-35	15-20	5.0
25-35	20-25	1.5
35-45	0-5	8.5
35-45	5-10	5.5
35-45	10-15	4.0
35-45	15-20	2.0
35-45	20-25	1.5
45-55	0-5	5.5
45-55	5-10	5.0
45-55	10-15	3.5
45-55	15-20	3.0
45-55	20-25	1.5

Tabla (3) Contenido máximo permisible de finos. Nota: La cantidad máxima permisible que pasa la malla No. 200 depende de la plasticidad (ASTM D 4318) de todos lo finos (muestra lavada) que pasan las mallas No. 40 o No. 50. La experiencia ha demostrado que los resultados son similares para ambas mallas.

2.1.6.4.1 *Información general:* En algunos casos se han obtenido proporcionamiento de mezclas de CCR utilizando los conceptos de compactación de suelos. El procedimiento se ha empleado mucho más en mezclas de agregados pequeños y usualmente mayores contenidos de cemento. Esto requiere que se determine la máxima densidad seca de los materiales utilizando los procedimientos de la prueba proctor modificada y se considera como una extensión de la tecnología de suelo-cemento. El contenido óptimo de agua se establece utilizando el mismo procedimiento que se emplea para obtener el contenido de agua en suelo cemento.

El CCR se proporciona mediante pruebas de laboratorio para medir la compactación de suelos similar a la norma empleada por ASTM D 1557 (Proctor modificada). Se realizan algunas modificaciones, por ejemplo: Se emplea unos moldes de compactación de 6 x 12 pulgadas en lugar de los de 4 x 4.6 pulgadas para poder introducir agregados mayores. La compactación depende de la energía que se aplique al espécimen.

2.1.6.4.2 *Contenido de agua:* El contenido óptimo de agua, necesario para ser empleado en la compactación de suelos dependerá de los agregados empleados, el contenido de material cementante y el esfuerzo de compactación que se aplique. Se tendrá una pérdida en la resistencia si se tiene un contenido de agua por debajo del mínimo (provocado quizá por la presencia de vacíos) o si se está por encima del óptimo de humedad (provocado por una relación alta  $W/(C+P)$ ).

El contenido de agua (pesado) se expresa como porcentaje del peso seco de agregado. Este cambia debido a las variaciones en las gravedades específicas de los materiales y los valores de absorción. Esto hace que sea muy difícil comparar las resistencias de diferentes mezclas dado que se tienen diferentes relaciones  $W/(C+P)$ . El determinar el contenido de agua dependerá del método empleado y puede variar por algunos factores como hidratación, evaporación, contenido de puzolanas, mezclado y absorción.

2.1.6.4.3 *Contenido de material cementante*: El contenido de material cementante se determina mediante el esfuerzo de compresión en diferentes mezclas con un contenido de agua óptimo.

## 2.2 PRUEBAS DE LABORATORIO.

Antes de comenzar a construir es necesario definir el comportamiento del material durante su colocación, así como sus características después del endurecimiento. Esta información es recopilada, primero, a través de pruebas de laboratorio que permiten conocer los valores aproximados de los parámetros de diseño y las características de la mezcla. Posteriormente, son verificados mediante un tramo de prueba.

Entre las características estudiadas en el laboratorio destacan las siguientes: resistencia a la compresión simple, resistencia a la tensión, resistencia al esfuerzo cortante en pruebas triaxiales, módulo de elasticidad y relación de Poisson, resistencia al esfuerzo cortante entre capas, densidad, permeabilidad,

durabilidad y estabilidad dimensional.

Para el caso particular de la presa La Manzanilla, Guanajuato (México), se hicieron pruebas con agregados triturados del banco de roca la Manzanilla y arena del cauce del río Ibarra. Fueron determinadas las granulometrias de ambos materiales, dosificándolos hasta obtener una curva granulométrica que quedara comprendida dentro de los límites fijados por la envolvente de diseño. Gráfica (3).

#### 2.2.1 CONTROL DE CALIDAD.

Un factor importante para el contratista de una estructura es el cumplimiento de los requisitos establecidos en las especificaciones del proyecto. Actualmente algunos proyectos exigen el establecimiento de *Programas de Garantía de Calidad* (PGC) más o menos sofisticados dependiendo de su importancia. Un Programa de Garantía de Calidad consiste en un sistema de procedimientos en el cual se determinan los niveles de calidad de un proyecto o parte de él y se establecen las funciones necesarias para asegurar que dichos niveles sean alcanzados. Un PGC depende del propietario, del diseñador y del constructor e incluye funciones tanto de diseño como de construcción.

El Control de Calidad (CC) y la Aceptación de la Calidad (AC) forman parte de un PGC y dependen del contratista y propietario, respectivamente. El Control de Calidad es un sistema de procedimientos por el cual un contratista registra las propiedades



del trabajo terminado. El Control de Calidad simplemente refleja si se está produciendo un producto de calidad aceptable.

Existe en este tipo de proyectos, relativamente novedosos como el CCR, en los cuales se aplican ciertas innovaciones en las técnicas constructivas y se tienen periodos de construcción cortos, la necesidad de resolver los problemas de calidad en forma inmediata; por lo que es recomendable que el propietario de la obra asigne a un representante de tiempo completo durante la construcción. Dicho representante es el diseñador principal, quien a su vez se encarga de redactar las especificaciones y establece las recomendaciones de control y garantía de calidad, además de proporcionar asesoría inmediata cuando los problemas técnicos requieran solución.

Uno de los problemas que con frecuencia se han encontrado en las obras de CCR (como consecuencia de colocar el CCR con equipo de movimiento de tierras y debido a que el CCR se parece mucho a las terracerías) es el que el personal de construcción no ha estado plenamente consciente de que está manejando concreto. Generalmente no se entiende al concreto y no se tiene cuidado con él. Por otra parte, si se tiene personal de inspección, con gran experiencia en estructuras de concreto convencional, es difícil para ellos aceptar que los requisitos y métodos relacionados con CCR sean menos estrictos.

Por consiguiente, una parte importante de los programas de garantía y control de calidad para CCR son las sesiones de orientación y entrenamiento a supervisores, inspectores y

trabajadores. Tanto las diferencias entre concreto convencional y CCR como la diferencia con la construcción de pavimentos de CUR con los rígidos de concreto convencional y con los flexibles de concreto asfáltico deben tratarse.

Para asegurar la calidad en la construcción de CCR debe darse especial atención al *control anticipado* de los materiales utilizados y a las condiciones de colocación del CCR, a diferencia de colocarlo y depender después de pruebas de aceptación

(Nota: Cuando se tienen elevados ritmos de construcción y grandes volúmenes de producción de concreto, el único sistema efectivo y económico para el control de calidad son los métodos estadísticos.)

Si los agregados son como los especificados por su origen y calidad, los materiales cementantes son pre-ensayados y pre-calificados desde su origen, las técnicas de mezclado, colocación y compactado están dentro de las recomendaciones especificadas, y se lleva a cabo un método apropiado de curado, el producto final de CCR será aceptable.

**GRADUACION DE LOS AGREGADOS.** Los altos ritmos de producción de CCR requieren de una reserva de agregados muy grande, antes de iniciar la construcción. Desde el punto de vista del control de calidad de su graduación esta representa ventajas, ya que el posible material producido fuera de especificación, puede mezclarse en las grandes pilas de

almacenamiento y producir un material aceptable cuando es retirado de la pila. Esto permite ajustes sistemáticos y graduales de la planta sin ocasionar problemas drásticos de producción. Las pilas de almacenamiento también permiten un mantenimiento más fácil de la uniformidad de la humedad (ASTM C566, ASTM C70) y de la distribución de la temperatura en el agregado.

Generalmente, para tener un control eficaz en la producción de agregados para CCR y verificar que dichos agregados coincidan con los agregados de diseño se deben tomar muestras de las pilas (ASTM C136) y dependiendo de los resultados se deben corregir las deficiencias en los tamaños. Durante la construcción, la graduación combinada debe ser reportada para poder graficar los resultados promedio diarios. En la presa Willow-Creek, el material no plástico (ASTM C117, ASTM D431B) pasando la malla No. 200 permisible, fue del 10% a diferencia del 3% para concreto convencional (ASTM C33). En CCR, tales partículas pueden ser benéficas para obtener una mejor compactación.

*CONSISTENCIA DEL CCR.* Normalmente la descripción de la consistencia del concreto mediante ensaves de revenimiento o rigidez se ha utilizado como la medida para controlar la variabilidad del concreto producido. Esto proporciona un nivel general de la trabajabilidad del concreto para su colocación y acabado. El ACI 211.3 considera cuatro métodos para la medición de la consistencia del concreto, clasificándolos desde concretos líquidos hasta extremadamente secos.

En CCR se han propuesto varios métodos para medir su

trabajabilidad y compactación, pero ninguno de ellos se ha aceptado como aplicable para todos los tipos de mezclas.

El ensaye de Mesa Vebec modificado, se ha usado con buenos resultados con algunas mezclas de agregados pequeños y con altos contenidos de cemento y agua. Sin embargo, para mezclas secas con agregados grandes su aplicación no resultó adecuada.

El aparato consiste en una mesa vibradora de frecuencia y amplitud fijas con un molde rígido de 0.01 m<sup>3</sup> unido a esta. La muestra de CCR se coloca dentro del molde aplicando (con una placa de acero rígida) una sobrecarga de 9.0 a 22.5 kg en función de las proporciones de la mezcla, del Tamaño Máximo del Agregado (TMA), del contenido de agua, del contenido de arena y del contenido de finos (menores que la malla No. 200), la mezcla de concreto sube alrededor de la placa de sobrecarga y se consolida totalmente después de un tiempo determinado de vibración (segundos).

Los japoneses adaptaron un molde de mayor tamaño (480 mm de diámetro por 400 mm de largo) usando una sobrecarga de 20 kg para considerar mezclas con tamaños grandes de agregados y contenidos altos de cemento. Se obtuvo una buena correlación entre los ensaves usando este molde con mezclas con tamaños grandes de agregados y usando el molde estándar con muestras frescas de concreto cribadas.

En algunos casos prácticos de aplicación de CCR, (Willow Creek) los resultados de la prueba Vebec no fueron congruentes con los resultados obtenidos en campo, la variación consistió en que las

mezclas practicas fueron demasiado secas. Parte del problema es que existe un secado desde la fabricación, transporte y cribado de la muestra. Durante la construcción en dicha presa, la trabajabilidad del CCR fue controlada por un inspector de campo y como regla general, la mezcla tenía un contenido de humedad adecuado cuando no se formaban ondulaciones bajo la acción de cuatro pasadas de rodillo de compactación.

*CONTROL DE VARIABILIDAD DEL CCR.* Los estándares del AUI requieren de un factor de sobrediseño de resistencia para considerar la variabilidad de una mezcla de concreto. Cuando existe una variabilidad alta en el concreto, la resistencia promedio requerida (resistencia característica) es bastante mayor que la resistencia de diseño. Dicho factor está en función de los resultados de resistencia de cilindros, los cuales generalmente no se tienen disponibles sino hasta pasados ciertos días, semanas o meses después de que el concreto fue colocado. El problema en el caso del CCR es que antes de poder disponer de cilindros que permitan saber la resistencia del concreto y hacer ajustes en caso necesario para cumplir con resistencias de diseño a 90 o más días, grandes cantidades de concreto pueden haber sido colocadas y compactadas.

La apariencia del CCR por si sola, no constituye una forma adecuada de conocer la calidad del concreto producido. En una mezcla con apariencia uniforme, el cemento por ejemplo podría no estar distribuido adecuadamente. Por consecuencia, se requiere de ensaves para evaluar la variabilidad del concreto producido en comparación con los índices permitidos.

Normalmente la calidad del concreto es controlada por ensayos o muestras obtenidos de la primera y última porción del concreto después del mezclado (ASTM C94). El cumplimiento de 5 de los 6 límites especificados (peso unitario, contenido de aire, revenimiento, contenido de agregados gruesos y resistencia promedio del concreto a los 7 días, así como el peso unitario del mortero con cero contenido de aire) clasificará a un concreto como uniforme. Sin embargo, en la construcción de CCR, el procedimiento mencionado no considera los efectos benéficos del remezclado adicional o perjudiciales de la segregación y secado del concreto durante su transporte y colocación. Tampoco es aplicable cuando el CCR se produce con sistemas continuos.

E.K. Schrader, quien es uno de los pioneros en el diseño y construcción de presas de CCR, propone un procedimiento en el cual la variabilidad del concreto se obtiene de un conjunto de pruebas realizadas en mezclas frescas de CCR tan pronto como estas son colocadas y donde la variabilidad se conoce en menos de un día.

Las muestras se toman después de la colocación del concreto pero antes de su compactación. Por turno de colocación de CCR se toman 3 muestras e inmediatamente después se determina el contenido de cemento, el contenido de humedad, el peso unitario del mortero con cero contenido de aire, el peso unitario de toda la mezcla y el contenido de agregados gruesos. Cada una de estas propiedades influye en la resistencia y variabilidad final del concreto en la estructura. De varios proyectos de CCR se encontró que existe una

muy buena correlación entre el coeficiente promedio de variación de los cilindros de resistencia y el coeficiente promedio de variación de las propiedades de la mezcla fresca. Posteriormente se determinan los índices de variabilidad para cada una de estas pruebas y se comparan contra los valores permisibles. Si no se cumple con la variabilidad permitida, deben hacerse ajustes en el proceso o en el tiempo de mezclado.

La precisión del equipo de la planta de concreto y el grado de control de la mezcla durante la producción son aspectos importantes que deben considerarse en las especificaciones del proyecto.

La capacidad de la planta de concreto, se determina mediante un programa de colocación de CCR establecido en función de los estudios de temperatura del concreto (considerando tiempos muertos, ineficiencias y restricciones). En lo que se refiere a medición del peso del cemento, del agua y del agregado grueso, se acepta una variación en los límites de  $\pm 4\%$  (En concreto convencional es de  $\pm 1\%$ ). Debido a los altos requisitos de producción y a que la secuencia de colocación de los materiales es muy importante en el mezclado del CCR, se deben realizar bastantes procedimientos de ensayo y error para determinar la mejor metodología y el tiempo de mezclado mínimo permisible para cada mezcla.

El Ing. Schrader establece que frecuentemente es mejor poner esfuerzo y dinero para reducir los requisitos de variabilidad y sobrediseño, que simplemente incrementar la variabilidad permitida

umentando la resistencia. Particularmente en el CCR más resistencia no significa mejor calidad.

*MONITOR DE CALIDAD DEL CONCRETO (CONCRETE QUALITY MONITOR-CQM)*. El Monitor de Calidad del Concreto MCC es un sistema que utiliza equipo de análisis químico para la determinación del contenido de cemento del concreto fresco. (El sistema se llamó originalmente Kelly-Vall). En algunas mezclas de CCR debe tenerse especial cuidado considerando que el contenido de cemento es bajo y el contenido de finos es alto. El procedimiento consiste en el lavado de la mezcla con un volumen conocido de agua reciclada con una bomba para remover el material más fino de la malla No. 100. Puede ser necesario utilizar un cepillo de alambre doblado para desprender las partículas finas y del cemento de las partículas del agregado. Se obtiene una mezcla del agua del lavado y se le agrega ácido nítrico para disolver las partículas del cemento. Finalmente se colocan varias gotas de esta solución dentro de un analizador electroquímico de calcio. El analizador proporciona un número digital que es un indicador del contenido de calcio. El valor corresponde al contenido de cemento obtenido de los diagramas de calibración previamente determinados para el agua, el cemento, los agregados y los aditivos utilizados en la mezcla.

Existe otra forma de determinar el contenido de cemento mediante la utilización de métodos estándar, los cuales requieren que se envíen muestras del mortero de la mezcla a un laboratorio químico pero con la desventaja de que tarda más de una semana en obtener los resultados.

**CONTROL DE LA DENSIDAD DEL CCR.** La obtención de densidades bajas son el resultado de deficiencias en aspectos tales como: el contenido de humedad, el equipo de compactación, los retrasos en la compactación, la sobrecompactación, la graduación y segregación de los agregados y los ensayos de laboratorio no representativos.

Cada mezcla tiene un contenido de humedad óptimo, el cual corresponde a una densidad máxima de acuerdo con la energía de compactación utilizada y con las condiciones ambientales existentes. La mejor combinación de las características de resistencia máxima y del manejo de la mezcla ocurren aproximadamente con este contenido de humedad.

La fuerza dinámica es aparentemente el factor más crítico en la compactación del CCR, por lo cual se depende de la utilización de rodillos vibratorios. Para proporcionar compactación adecuada a capas de CCR de 15 a 45 cm, se han utilizado con éxito equipos con las siguientes características:

Ancho del rodillo	1.68-2.44 m
Díámetro del rodillo	1.22-1.68 m
Peso estático	9500 kg mínimo
Fuerza dinámica	5.7-9.8 kg/mm del ancho del rodillo
Velocidad	2.4 km/hr máximo
Potencia de la masa excéntrica	93 kw mínima
Frecuencia	1800 V/min mínima
Amplitud	0.6-2.0 mm

La compactación debe realizarse tan pronto como sea posible. El personal generalmente desconoce que si el CCR no se compacta inmediatamente, la humedad disponible para su compactación disminuye debido a la hidratación del cemento y a la evaporación. A diferencia de terracerías, el CCR no puede ser recompactado o rehumedecido. Como regla general se especifica que el CCR debe compactarse dentro de los 30 minutos después del mezclado y dentro de los 10 minutos después de colocado.

En CCR la sobrecompactación puede llevar a menores densidades porque modifica la microestructura del concreto cuando apenas se empieza a tener un fraguado inicial y todavía tiene muy poca resistencia.

Los agregados de mayor tamaño requieren de equipo más grande y de mayor energía de compactación. La compactación y el contenido de vacíos están directamente relacionados con la graduación de los agregados. Normalmente el CCR con contenidos de vacíos de 0.5 a 1.5 por ciento puede compactarse utilizando graduaciones de agregados que aseguren una cantidad suficiente de partículas finas para llenar los espacios dejados por los agregados gruesos. (Por ejemplo del 5 al 10 % de material menor de la malla No. 200). Los agregados mayores de 38 mm presentan una gran tendencia a segregarse.

Los mismos métodos usados para la compactación de CCR se han utilizado para el ensayo de resistencia de cilindros. El molde dentro del cual se compacta el material debe ser rígido y de un

tamaño adecuado (por lo menos cuatro veces el tamaño máximo del agregado). La compactación normalmente se hace en capas más delgadas que las usadas en la construcción real y los compactadores neumáticos que se utilizan usualmente no reproducen el esfuerzo de un rodillo vibratorio de 10 toneladas. En general la compactación puede ser complicada debido a la hidratación y secado de la mezcla durante el proceso de muestreo, transporte al laboratorio, cribado, colocado y compactado por capas, aunque teniendo una adecuada organización para el muestreo, no debe existir ningún problema.

El control de la densidad del concreto puede llevarse mediante un control rutinario del número de pasadas mínimo especificado. Ocasionalmente se realizan algunos ensayos de la densidad real para verificar que se está proporcionando la densidad requerida. Otra alternativa es llevar un control más preciso de la compactación especificando el cumplimiento de una densidad mínima y una densidad promedio sin importar el número de pasadas.

Otra forma de saber la densidad en el CCR, es mediante el empleo del Medidor Nuclear de Densidades (MNU) utilizando el modo de transmisión directo (ASTM D1522-Método B). Se realizan perforaciones en la capa de CCR mediante un martillo y una varilla de punto en cada localización del ensayo, se introduce la varilla de medición del aparato y se toman lecturas a cada 90°. El Promedio de las cuatro lecturas se considera como la densidad en la localización. Es recomendable realizar mediciones cada 2 horas de colocación y no menos de 6 localizaciones por capa. Se presentan los resultados en gráficas de control indicando la densidad promedio, la desviación

estándar y el número de ensayos de cada día. Es posible evaluar las tendencias de comportamiento en lo que se refiere a densidad, utilizando la densidad promedio variable de los últimos 50 ensayos, sin necesidad de estudiar volúmenes de piezas individuales.

*CURADO DEL CCR.* La superficie del CCR debe mantenerse húmeda o se debe evitar que pierda humedad. Esto se puede realizar en forma permanente por medio de camiones o sistemas rociadores de agua. La capa final de CCR debe curarse generalmente por más de 14 días.

### 2.3 ANALISIS DE RESULTADOS.

Conviene hacer notar que los resultados de las pruebas que se realicen en especímenes ensayados en el laboratorio, sólo servirán para el diseño preliminar y de guía durante la construcción. Los resultados deben verificarse con la información obtenida en el tramo de prueba.

Mediante la construcción de un tramo de prueba se pretende determinar: densidad y resistencia y el procedimiento para asegurar la adherencia entre las capas.

*Densidad y resistencia:* Es necesario definir el número de pasadas del equipo de compactación, así como el efecto que tiene el espesor de capa para lograr la calidad de concreto requerida.

Las pruebas se realizarán variando el contenido de agua y cemento, con base en las pruebas preliminares de laboratorio, para

observar el comportamiento del equipo de compactación y los resultados obtenidos.

La selección adecuada del contenido de agua es de vital importancia. El exceso en su aplicación provocará que la mezcla se adhiera al equipo de compactación o que este se atasque. Si la cantidad de agua es insuficiente, se presentarán fallas locales por cortante en la mezcla bajo el rodillo, o el cemento no podrá hidratarse totalmente.

*Procedimiento para asegurar la adherencia entre las capas:* Las capas serán colocadas de una manera uniforme, vigilando la unión entre ellas. Debe definirse el tratamiento más adecuado que se dará a la superficie del C.C.R. cuando se interrumpa la colocación del material por uno o más días. (Ver los cuatro métodos recomendados al respecto en el capítulo 6 de esta tesis).

#### *PROCEDIMIENTO PARA LA PRUEBA DE EVALUACION DEL MEZCLADO Y COLOCACION DEL CCR*

La evaluación se realiza después de que el CCR ha sido colocado pero antes de ser compactado durante la construcción. Se determina el contenido de agua, el contenido de cemento, el contenido de agregado grueso para la mezcla completa y el peso unitario del mortero sin aire incluido. Comparando los resultados de tres muestras tomadas en cada turno de colocación de CCR, se determina la eficiencia del procedimiento de mezclado y colocación, para proporcionar un material uniforme y consistente. El ingeniero

supervisor, puede autorizar la omisión del ensaye para la determinación del contenido de cemento o utilizar algún otro método alternativo. (Ver capítulo 5 inciso 5 PRUEBAS DE LABORATORIO EN CAMPO).

Para cada prueba se calcula un índice de variabilidad para comparar la variabilidad durante cada turno del cemento fresco en el lugar. Si la variabilidad resulta mayor que la permitida por las especificaciones, deben realizarse modificaciones en el tiempo y en el proceso de mezclado.

También se pueden determinar los coeficientes de variación para cada prueba. De preferencia se utilizan los últimos 30 resultados de ensayos individuales. Cada prueba influye en la resistencia y en su variabilidad en la estructura. Puede pensarse que algunas de las pruebas influyen más o menos que las otras, pero no se tienen suficientes datos para establecer si ese es el caso y hasta que grado ello ocurre.

La tabla (4) muestra la variabilidad de cada prueba en las mezclas frescas de varios proyectos de CCR (en presas). También muestra los coeficientes de variación para todos los cilindros de 15 X 30 cm en cada edad de ensaye. Se observa que existe una relación muy importante y razonablemente consistente entre la variabilidad de las pruebas en las mezclas frescas y la variabilidad de los cilindros de resistencia para la mezcla. El coeficiente promedio de variación de los cilindros de resistencia es aproximadamente 2.7 veces el coeficiente promedio de variación de las propiedades de la mezcla

Tabla (4) Coeficientes de Variación para Proyectos de Concreto Masivo usando CCR.

	WILLOW CREEK	COPPERFIELD	GALESVILLE	MONKSVILLE	UPPER STILLWATER*	MIDDLE FORK
<u>CEMENTO + CENIZAS VOLANTES</u> (kg/m <sup>3</sup> )	47+19	80+30	53+51	62+00	80+173	66+00
<u>ENSAYES EN MEZCLA FRESCA</u>						
Peso unitario del mortero sin aire incluido.	2	-	2	1	-	-
Peso unitario de la mezcla completa	1	-	1	1	-	-
Agregado grueso	8	-	8	14	-	-
Contenido de cemento	21	-	16	13	-	-
Contenido de humedad	23	-	13	12	-	-
<u>Coefficiente promedio de variación</u>	<u>11.0</u>	-	<u>8.0</u>	<u>8.2</u>	-	-
<u>CILINDROS</u>						
3 días	26	-	-	22	-	-
7 "	29	-	28	28	19	23
14 "	25	-	28	21	-	27
28 "	28	30	24	24	21	33
56 "	-	-	20	21	-	-
90 "	29	25	20 (170 días)	21	19	16
180 "	27	-	-	26	-	-
365 "	33	-	13	-	-	-
<u>Coefficiente promedio de variación</u>	<u>28</u>	<u>28</u>	<u>22</u>	<u>23</u>	<u>20</u>	<u>25</u>
<u>RELACIONES</u>						
<u>Coef. (cilindros)/coef. (mezcla fresca)</u>	<u>2.55</u>	-	<u>2.75</u>	<u>2.80</u>	-	-

\* En base a datos disponibles a la fecha (Abril 1987) para colocaciones de concreto entre 1985 y 1986.

fresca. Aplicando este valor a la variabilidad de los resultados de ensayos en la mezcla fresca, puede predecirse un factor de sobrediseño apropiado para la resistencia de cilindros última que desee obtenerse.

El factor de 2.7 podría basarse en la relación de la variabilidad de la mezcla fresca a la variabilidad de núcleos en lugar de cilindros; sin embargo, a la fecha no se tiene datos suficientes para hacer dicha evaluación. Puede no ser muy adecuado utilizar la relación con cilindros, pero esto es consistente con las recomendaciones del ACI y del ASTM, las cuales suponen que la variabilidad de los núcleos es similar a la de los cilindros. Es generalmente aceptado que la resistencia a largo plazo de los cilindros de 15 X 30 cm hechos de concreto con agregados de tamaño máximo de 50 mm, alcanzarán (aunque un poco inferior) la misma resistencia que los núcleos del mismo tamaño extraídos de la estructura (si el concreto fue colocado y curado adecuadamente). En forma general las mezclas con resistencias mayores tienen ligeramente menores relaciones de resistencia núcleo a cilindro.

Lo expuesto en el párrafo anterior es aplicable a concreto convencional; sin embargo, datos recientes demuestran que para mezclas de CCR la relación entre núcleos y cilindros no sigue una regla definida. En algunas mezclas de CCR con alto contenido de cemento se encontró que altas resistencias en cilindros no son las mismas del concreto in situ.

*CRITERIOS PARA REQUERIMIENTOS DE RESISTENCIA.*

1. El factor de sobrediseño y la resistencia promedio mínima requerida deben calcularse estadísticamente en base a los últimos 30 resultados de los ensayos de la mezcla fresca.
2. No más del 25% de los resultados deben estar por debajo de la resistencia de diseño.
3. No más del 4% de los resultados serán menores del 25% de la resistencia de diseño.
4. No más del 1% de los resultados serán menores que el 50% de la resistencia de diseño.
5. Deben señalarse las causas de ensayos erróneos y sus datos no deben incluirse en el análisis.

\*\* (A continuación se describe el procedimiento paso a paso para la evaluación del mezclado y colocación del CCR).

2.3.1 *INFORMACION GENERAL.* Las pruebas para la evaluación del mezclado se utilizan para establecer los tiempos de mezclado mínimos permitidos para concreto convencional o para determinar la variabilidad de una mezcla después de una duración especificada de mezclado. Normalmente el procedimiento consiste en mezclar un tamaño de batch (batch) especificado en un tiempo determinado, obteniendo

muestras del material de diferentes lugares de la mezcladora y comparando los resultados de los ensayos de cada muestra para observar su variación.

2.3.1.2 El procedimiento usualmente sigue el método de ensaye del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos CRD-C 55 o el método especificado en el anexo A1 de ASTM C-94. A continuación se describen brevemente los ensayos:

El CRD-C 55 está basado en tomar tres muestras de una bacha. Se evalúa el contenido de agua, el contenido de cemento, el peso unitario del mortero sin aire incluido y el contenido de agregado grueso. Se requiere aproximadamente de una semana para obtener los resultados de los análisis y que se tengan datos disponibles del contenido de cemento determinado por el método químico en mortero endurecido. La mayor parte del ensayo se realiza en una porción de mortero de la mezcla después de cribada.

El ASTM C-94 está basado en tomar dos muestras de una bacha. Se evalúa el revenimiento, el contenido de aire, el contenido de agregado grueso, el peso unitario de la porción de la mezcla menor de 1 1/2", la resistencia a la compresión a los 7 días y el peso unitario del mortero sin aire incluido. Esto requiere de una semana antes de que se tengan disponibles todos los resultados y no se utiliza la mezcla completa en todos los procedimientos de ensayo.

2.3.1.3 Cada uno de estos procedimientos (ASTM y CRD) fue desarrollado para mezclas de concreto convencional y cada uno evalúa

la eficiencia de la mezcladora. El mezclado de materiales de Concreto Compactado con Rodillos puede afectarse en forma importante durante las operaciones de transporte, manejo y tendido. Generalmente, puede esperarse un beneficio adicional de remezclado, aunque con prácticas inadecuadas se puede ocasionar una segregación. Este mezclado adicional puede ser considerado, tomando las muestras del área de colocación en diferentes tiempos durante un turno, a diferencia de tomarlas de una bacha en la mezcladora.

Usando esta técnica, se considera el efecto compuesto tanto de la variabilidad dentro de una bacha como la variabilidad entre bacha y bacha. Consecuentemente, la variabilidad máxima permisible de las muestras ensayadas se incrementa en comparación con los valores típicos utilizados cuando solamente el ensaye es hecho en una bachada.

2.3.1.4 Una ventaja adicional importante de tomar muestras en el lugar en vez de en la mezcladora es que las muestras frescas se utilizan en los ensayos. En CRD-C 55 se obtienen al mismo tiempo las tres muestras para su ensaye. En la práctica la tercera muestra puede ensayarse horas después de la primera y los resultados pueden estar adversamente afectados.

2.3.1.5 Otra ventaja importante de la obtención de muestras en el lugar de la colocación de CCR es la compatibilidad con mezcladoras continuas.

2.3.1.6 El procedimiento que se describe aquí, también utiliza un

análisis químico rápido para la determinación del contenido de cemento, y todos los resultados del procedimiento de ensaye se tienen disponibles normalmente al inicio del siguiente día de ensaves.

### 2.3.2 MUESTREO

2.3.2.1 Después que se ha establecido un tiempo de mezclado conservador, se le permitirá a un turno de colocación trabajar con esa mezcla hasta que se realicen los ensaves. Si en los documentos del contrato no se especifica un tiempo inicial de mezclado, este deberá ser de 1 minuto para mezcladoras con una capacidad de 3 yardas cúbicas (2,300 litros).

Para mezcladoras más grandes, el tiempo se incrementará 15 segundos por cada yarda cúbica (760 litros) adicional. El tiempo de mezclado se inicia después de que todos los ingredientes se han colocado en la mezcladora y terminará al inicio del ciclo de descarga. Para plantas de mezclado continuo, el tiempo de mezclado corresponde a las velocidades de descarga equivalentes en metros cúbicos por minuto.

2.3.2.2 Durante el turno de colocación se obtendrán muestras en la primera, segunda y tercera parte del mismo; sin embargo, la primera muestra no se tomará hasta después que la planta ha estado en operación al menos el 5 % del tiempo del turno. La segunda muestra se obtendrá hasta después que el ensaye de la primera muestra se encuentre prácticamente terminado y que se le pueda dar atención completa tan pronto como esta llegue al laboratorio. En forma

similar se obtendrá la tercera muestra. Todos los ensayos (excepto cuando sea necesario esperar para el secado final) se deberán terminar en las 2 horas siguientes a la obtención de la muestra.

2.3.2.3 Las muestras se obtendrán aleatoriamente bajo la dirección del jefe de laboratorio. Las muestras se excavarán aproximadamente del centro de una zona en la cual se haya tendido el CCR antes de su compactación. El tamaño de la muestra será más o menos de 5 pies cúbicos (150 litros) o 650 libras (300 kg). Esencialmente debe incluir todo el material a través de todo el espesor de la capa de CCR. Para la obtención de la muestra se recomienda un cargador frontal asistido por dos obreros con palas y una camioneta de una tonelada. La muestra debe cubrirse con una lona y protegerse del viento, sol lluvia, etc. mientras es transportada. Las muestras y los ensayos se mantendrán y realizarán, respectivamente, en un lugar protegido del viento y del sol y con un rango de temperatura de 5 a 27 grados centígrados (40 a 80 °F).

### 2.3.3 CONTENIDO DE AGUA.

2.3.3.1 Obtenga aproximadamente 1/2 pie cúbico (14 litros) o 75 libras (35 kg) de la mezcla completa de CCR y determine el peso de la muestra con más o menos 0.1 libras (50 gr) de precisión. La muestra debe tomarse y pesarse tan pronto como sea posible después de que el material llegue al laboratorio. Después del pesado, extienda el material suelto de CCR en una serie de charolas que puedan introducirse en un horno. Se recomienda tener cuidado en no perder material de la muestra. De preferencia, la muestra se debe pesar

inicialmente en las charolas secas.

2.3.3.2 Seque la muestra a peso constante, conservándola suelta para facilitar su secado. El secado inicial puede realizarse exponiendo la muestra de 1 a 6 horas al ambiente de un cuarto cerrado con atmósfera seca, al sol, a un ventilador eléctrico, etc. Después del secado inicial, separe el material con una cuchara para asegurar que está suelto y que no se hidrate en una masa sólida. Entonces seque la muestra a peso constante en un horno de 100 °C más menos 5 °C. Después del secado inicial, un secado en el horno de 12 horas es suficiente para obtener una humedad constante.

2.3.3.3 Calcule el contenido de humedad total como sigue:

$$P = \frac{W - D}{D} \times 100$$

donde:

P - Contenido de humedad total en la mezcla (%)

W - Peso de la muestra antes del secado (kg)

D - Peso de la muestra después del secado (kg)

#### 2.3.4 PESO UNITARIO DEL MORTERO SIN AIRE INCLUIDO.

2.3.4.1 Criebe aproximadamente un pie cúbico (28 litros) o 150 libras (68 kg) de la mezcla completa de CUR sobre una malla de 2 pulgadas

(50 mm). La acción del cribado debe realizarse vigorosamente de manera que los grumos del material, el mortero y los agregados menores pasen a través de la malla. Esto puede realizarse moviendo la mezcla de un lado a otro mientras se apoya a la malla en una plataforma. Las partículas del agregado grueso no deben lavarse y tendrán una ligera capa de pasta de cemento con partículas finas. Retire el agregado grueso retenido.

2.3.4.2 Compacte el material pasando la malla de 2 pulgadas (50 mm) dentro de una olla de presión de medición del contenido de aire con capacidad mínima de un cuarto de pie cúbico (7 litros) y determine el peso compactado de la muestra. La compactación debe realizarse en tres capas, compactando cada capa con un apisonador neumático antes de la colocación de la siguiente capa. El apisonador neumático puede ser equivalente a un INGENSOLL-RAND modelo SPG-30 con una cabeza de 5-3/4 " (14.6 cm). La cabeza tendrá una superficie de golpeo plana (no elíptica), pero la orilla exterior puede estar redondeada. Cuando la última capa se compacta en el molde, un ayudante puede simultáneamente agregar material de manera que la superficie final está esencialmente compactada al nivel con el tope del contenedor. (Se recomienda colocar un anillo sobre el contenedor para permitir un sobrellenado del material suelto y para proteger la orilla del contenedor de algún daño durante la compactación).

2.3.4.3 Determine el contenido de aire de la muestra compactada usando ASTM-C 138 (Método gravimétrico).

2.3.4.4 Lave toda la muestra del ensaye del contenido de aire a

través de la malla No. 4, de manera que todo el material incluyendo la pasta y los finos adheridos al material mayor de la malla No. 4 sean removidos. Retire el material menor de la malla No. 4, obtenga el peso seco con superficie saturada del agregado de la muestra del ensaye de contenido de aire que se retiene en la malla No. 4. Toallas y un ventilador permitirán el secado del agregado a la condición de superficie saturada.

2.3.4.5 Calcule el peso unitario del mortero sin contenido de aire incluido mediante la fórmula siguiente:

$$M = \frac{b - c}{V \times A - \frac{c}{100 \times U \times W}}$$

donde:

M - Peso unitario del mortero sin contenido de aire incluido (kg/m<sup>3</sup>)

b - Peso de la muestra de concreto compactado dentro del contenedor del ensaye del contenido de aire (kg).

c - Peso del agregado de la muestra del ensaye del contenido de aire retenido en la malla No. 4 (kg).

V - Volumen del contenedor del ensaye de contenido de aire (m<sup>3</sup>).

A - Contenido de aire de la muestra de ensaye (%).

G - Peso específico del agregado grueso.

W - Peso específico del agua ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ).

### 2.3.5 PORCENTAJE DEL AGREGADO GRUESO.

2.3.5.1 Obtenga aproximadamente 1-1/2 pies cúbicos (40 litros) o 200 libras (90 kg) de la muestra completa de CCR y determine precisamente su peso. Lave la muestra para remover todo el material que pasa la malla No. 4, incluyendo las capas de finos y pasta que cubren las partículas del agregado grueso. Para facilitar la operación del lavado, la muestra pesada debe lavarse en incrementos menores de 20 a 30 libras (9 a 15 kg) cada uno, y debe utilizarse una serie de mallas arriba de la malla No. 4 para evitar sobrecargarla. Retire todo lo que pase la malla No. 4 y guarde todo lo retenido en la malla No. 4.

2.3.5.2 Seque todo el material retenido en la malla No. 4 a una condición de superficie seca saturada y obtenga el peso. Toallas y un ventilador eléctrico facilitarán el secado del agregado a esta condición.

2.3.5.3 Calcule el porcentaje del agregado grueso (como porcentaje de peso total de la mezcla) mediante la siguiente fórmula:

$$C = \frac{W}{W} \times 100$$

donde:

C - Porcentaje del agregado grueso del peso total de la mezcla (%).

W - Peso de la mezcla completa tomada del cribado (kg).

w - Peso del agregado retenido en la malla No. 4 con una condición de superficie seca saturada.

#### 2.3.6 CONTENIDO DE CEMENTO.

2.3.6.1 Los contenidos de cemento de cada muestra se determinarán para la mezcla completa usando el analizador de calcio y el tanque de suspensión (máquina de lavado) del Monitor de Calidad del Concreto (MCC) (Concrete Quality Monitor-CQM). EL MCC utilizado para concreto convencional se describe en la publicación TRM-293 titulada "Corps of Engineers Concrete Quality Monitor: Operations Guide" con fecha de mayo de 1981. Se tiene disponible en el Laboratorio de Investigación de los Ingenieros del U.S. Army Corps Of Engineers, en Champaign, Illinois. Entre las modificaciones para su uso con CCR se incluyen: agregar hexametáfosfato de sodio (Calgon) al agua de lavado, usar una muestra más grande y proporcionar un mayor número de mallas para facilitar la operación de lavado. En comparación con concreto convencional, cuando se usa CCR deben tenerse cuidados adicionales

debido a los típicos contenidos de cemento más bajos y al mayor contenido de finos.

2.3.6.2 Llene el tanque de suspensión con agua destilada hasta la marca de 10 galones (38 litros) indicada a un lado del tanque.

2.3.6.3 Coloque arriba del tanque de suspensión las siguientes mallas de acero inoxidable: 20 mm (3/4), No. 4, No. 30, No. 50, y No. 100. (Las mallas pueden modificarse para la graduación del CCR en particular y para facilitar el lavado, pero la malla inferior deberá ser la No. 100).

2.3.6.4 Encienda la bomba de recirculación y agregue 1/2 libra (20 gr) de Calgon al agua. Tenga cuidado en conservar la manguera de recirculación arriba de las mallas. NO PIERDA ninguna cantidad del agua de recirculación. Si se pierde agua del sistema en cualquier momento, el procedimiento de ensaye deberá reiniciarse.

2.3.6.5 Obtenga aproximadamente 8 libras (3.6 kg) de la mezcla completa de CCR y colóquela dentro de uno o más tubos de polietileno. Debe darse atención especial para obtener muestras representativas, especialmente si estas contienen agregados grandes en exceso de 1-1/4 pulgadas (40 mm). Determine exactamente el peso de la muestra total.

2.3.6.6 Traslade la muestra a las mallas colocadas encima del tanque de suspensión, teniendo cuidado de no sobrecargar las mallas o restringir el flujo de agua a través de ellas. Dependiendo de la graduación de la mezcla y de la cantidad de finos, puede ser

conveniente lavar cada 4 libras (1.85 kg) de la muestra. Lave cuidadosamente el agregado, usando el agua de la manguera de la bomba de recirculación. Puede ser necesario utilizar un cepillo de alambre delgado para remover el cemento y las partículas finas de los agregados mayores. Después de que el material retenido en la malla superior ha sido lavado, tanto el tanque como la malla deben retirarse, de manera que se pueda proseguir con el lavado del material de la siguiente malla. Debe tenerse cuidado especial para lavar los agregados más finos que no puedan cepillarse individualmente. Si frotarlos sobre la malla ayudará.

2.3.6.7 Obtenga una muestra del agua recirculada del tanque de suspensión. Con la bomba de recirculación operando, introduzca un cucharón y vigorosamente agite la solución de 10 galones (38 litros). Inmediatamente obtenga una muestra de la solución con una pipeta de 30 ml. Coloque el material suspendido en un matraz Erlenmeyer de 500 ml. Llene la pipeta con ácido nítrico (al 5 por ciento) y descargue el contenido en el matraz Erlenmeyer. Mientras se agrega la solución de ácido, el matraz debe agitarse de vez en cuando para asegurar que todo el cemento de la mezcla se ha disuelto con la solución de ácido. Use un matraz volumétrico para agregar 250 ml de agua destilada al matraz Erlenmeyer.

2.3.6.8 Coloque una varilla de un agitador magnético en el matraz Erlenmeyer y colóquelo sobre el agitador magnético. Encienda el motor de mezclado y mezcle al menos 3 minutos antes de tomar la primera muestra del matraz para el análisis.

2.3.6.9 Encienda el analizador de calcio.

2.3.6.10 (Este paso se requiere cada vez que la cubeta del analizador de calcio es llenada con una nueva solución de hidróxido de potasio. El llenado de una cubeta es suficiente para 15 o 20 lecturas). Llene la cubeta al nivel marcado con hidróxido de potasio 1.0 N (Normal) y 100 ml de un reactivo calcígeno reconstituido (Eppendorf). Coloque la cubeta en el analizador, agregue 100 ml de solución estándar de calcio y oprima el botón de titulación para condicionar la cubeta para el análisis.

2.3.6.11 Empiece el análisis colocando el interruptor mEq/mg% (miliequivalentes/miligramos por ciento) en la posición de mg% y agregue 100 ml de la solución estándar de calcio (Eppendorf) a la cubeta. Oprima el botón de titulación. Registre el resultado y repita el ensayo agregando otra muestra de 100 ml. Continúe repitiéndolo hasta que la diferencia de los resultados consecutivos sea menor que 1.5 %. Oprima el botón de calibración y realice una muestra adicional de 100 ml de solución estándar de calcio para asegurar que el valor de la lectura es  $10 \pm 0.1$  mg por ciento.

2.3.6.12 Determine la resistencia de la solución de cemento en el matraz Erlenmeyer analizando una muestra de 20 ml en el analizador de calcio. Repita agregando más muestras de 20 ml hasta que la diferencia de los valores sea menor que 1.5 %. Si las lecturas del medidor de calcio son menores que 5, el tamaño de la muestra para la calibración y lectura puede incrementarse a una muestra de 100 ml.

2.3.6.13 Determine el contenido de cemento por medio de la gráfica de calibración con la lectura del calibrador de calcio estabilizada. Si el tamaño de la muestra (aproximadamente 5 libras- 2.3 kg) es diferente del tamaño sobre el cual está basada la gráfica de calibración, las lecturas deberán ser matemáticamente ajustadas linealmente para corregir la diferencia.

2.3.6.14 (Este procedimiento es necesario antes de realizar cualquier ensayo de producción). Establezca una gráfica de calibración indicando el contenido de cemento en kilogramos por metro cúbico como una función de la lectura del analizador de calcio. Esto se realiza haciendo bacias pequeñas de la mezcla completa de CCR en el laboratorio usando ingredientes pesados con exactitud y contenidos de cemento variable. Para cada mezcla se determina la lectura del analizador correspondiente al factor de cemento conocido. Los puntos se grafican y se dibuja una línea recta.

2.3.6.14.1 El tamaño de la bacia no debe ser menor de 2.5 pies cúbicos (70.80 litros) mezclados en una revolvedora de por lo menos 3 pies cúbicos (80 litros) de capacidad. Humedezca el trompo de la revolvedora antes del mezclado, premezcle los materiales pesados (excepto el agua) por medio de paleado sobre una superficie de piso duro antes de colocar los materiales en la revolvedora. Agregue los materiales intermitentemente con el agua mientras el trompo está girando. Utilice la última cantidad de agua para lavar hacia adentro la orilla interior de la revolvedora mientras está girando. Después de que todos los ingredientes se han agregado, mezcle por 3 minutos con el trompo colocado en el ángulo más plano posible pero que el

material no se salga de la revolvedora. Pare por 3 minutos y remueva el material de la superficie interior y de las espas de la revolvedora. Mezcle nuevamente por 2 minutos y descargue sobre el piso duro humedecido. Remueva todos los materiales del interior de la revolvedora y remezcle el material en el piso con pala. Obtenga una muestra representativa y realice el ensaye del analizador de calcio sobre la mezcla. Es deseable utilizar exactamente el mismo tamaño de la muestra (3.6 kg) para cada ensaye de calibración. Si se utilizan tamaños de muestras diferentes, los resultados deben ajustarse matemáticamente para normalizarlos al mismo tamaño de muestra inicial en el cual se basa el diagrama de calibración.

2.3.6.14.2 Como mínimo, se utilizarán cuatro mezclas para establecer la curva de calibración para cada factor de cemento y para cada conjunto de proporcionamiento de mezcla usados en la producción. Para cada mezcla, todas las cantidades de los materiales excepto la del cemento permanecerán constantes. Una mezcla será para un factor de cemento de  $0 \text{ kg/m}^3$ . Otra mezcla será para un factor de cemento designado. Otra mezcla será para un factor de cemento aproximadamente 15% menor que el designado. La última mezcla será para un factor de cemento aproximadamente 15% mayor que el designado.

2.3.7 *INFORME*. Se debe preparar un informe que incluya el índice de variabilidad para cada ensaye.

### 3. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO DE C.C.H.

Un pavimento está compuesto principalmente por dos tipos de elementos: *ESTRUCTURALES Y DE PROTECCION*. La figura (1) es una representación esquemática de los elementos que pueden ser parte de un pavimento.

La estructura de un pavimento en general está compuesta por una ó más capas, construidas sobre el suelo, con el fin de soportar adecuadamente las cargas que se aplicarán. La presencia de varias capas generalmente reduce los costos, más no el espesor resultante de la estructura. Las capas que conforman la estructura del pavimento son, en orden ascendente:

**SUBRASANTE:** Es la superficie que sirve de soporte del pavimento. En principio está constituida por el suelo o terreno.

**SUBRASANTE MEJORADA:** Bajo algunas condiciones es necesario mejorar la calidad de la subrasante mediante el procesamiento de parte del material superficial o su reemplazo por otro de mejor calidad, sin que se tome como una de las capas estructurales del pavimento.

**SUB-BASE:** Es la primera capa que se construye sobre la subrasante, con el fin de facilitar el drenaje del pavimento y la construcción del resto de la estructura. Tiene capacidad de absorber algunos cambios de volumen de la subrasante y además se coloca con fines económicos, dado que actúa como una sustitución parcial de la

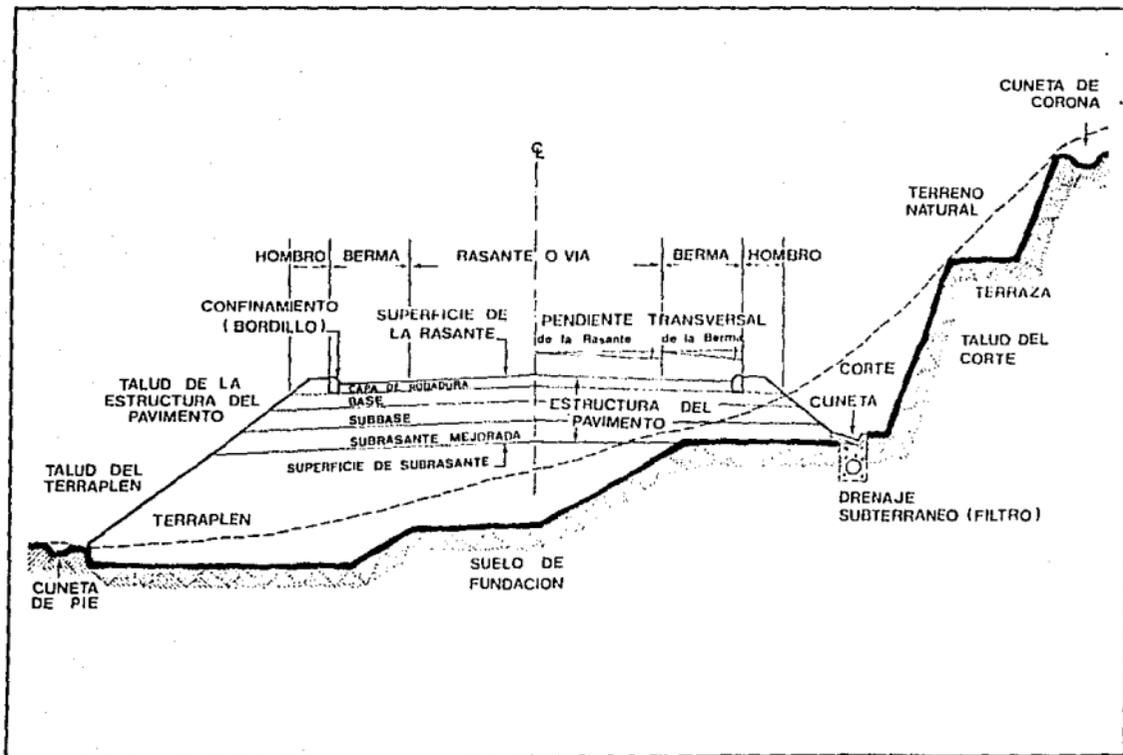


Figura 1. Sección transversal de una vía (15).

base.

**BASE:** Se llama así a la capa construida sobre la sub-base. Se diferencia de esta por la mejor calidad de sus materiales y las mayores exigencias en las especificaciones de construcción.

Aun cuando tiene funciones similares a las de la sub-base, su importancia radica en su capacidad estructural, de drenaje del agua del subsuelo y de protección del resto del pavimento; además, permite la circulación de los vehículos mientras se construye la superficie de rodamiento.

Existe gran variedad de materiales empleados para la construcción de la base; entre ellos están: los suelos y materiales pétreos, algunos estabilizantes como el cemento, la cal, el asfalto, los aditivos y otros materiales ligantes.

**SUPERFICIE DE RODAMIENTO:** Con este nombre genérico se denomina la última capa que se construye, y es sobre ella por donde circulan los vehículos durante el período de servicio del pavimento. Por esto, debe ser resistente a la abrasión producida por el tránsito y a la agresión del medio ambiente; además tiene la función de proteger la estructura, impermeabilizando la superficie.

La textura superficial de esta debe presentar dos características para atender adecuadamente la circulación de vehículos: la suavidad, para que sea cómoda, y la rugosidad, suficiente para que sea segura.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Erroneamente se le dá a esta capa el nombre de pavimento, especialmente cuando es de concreto asfáltico, pero dicho nombre le corresponde realmente al conjunto de capas construidas.

La superficie de rodamiento puede ser de diferentes tipos, lo que determina una clasificación para los pavimentos según el material que la compone, como se verá en el inciso 3.3 de esta tesis.

### 3.1 VARIABLES EMPLEADAS EN EL DISEÑO

Las variables que se emplean en el diseño de la estructura de un pavimento de CCR, son las mismas que se tienen en el caso de pavimentos de concreto convencional en la construcción de aeropuertos, aunque cabe mencionar que los mayores factores en el diseño del pavimento de CCR son el número y peso de ejes cargados que transitarán por nuestro pavimento. El resultado final es estimar y clasificar los ejes tanto separados como en tandem en categorías de peso que usarán el pavimento en el periodo de vida útil para el que se diseña.

Para determinar el espesor requerido de un pavimento de CCR se requiere de la siguiente información:

1. Resistencia de soporte de la subrasante o de la combinación de la subrasante con la sub-base.
2. Características del vehículo

- Carga por ruedas
  - Espacio entre ruedas
  - Características de los neumáticos
  - Número de repeticiones de carga que se esperan durante la vida útil sobre las diferentes áreas del pavimento.
3. Resistencia a la flexión del CCR. (ASTM C 78)
  4. Módulo de elasticidad del CCR.

A continuación se describirá brevemente la forma de obtener algunas de las propiedades del CCR para poder diseñar estructuralmente.

### 3.1.1 Resistencia a la flexión del CCR.

Los resultados de algunas pruebas obtenidos de corazones y vigas tomadas de pavimentos existentes, han demostrado la siguiente relación entre la resistencia a la compresión y la resistencia a la tensión a los 28 días y se calcula con la fórmula siguiente:

$$f_r = C (f'_c)^{1/4}$$

Donde:

$f_r$  = resistencia a la flexión, psi, cargado a un tercio del claro.

$f'_c$  = resistencia a la compresión, psi.

C = Constante entre 9.4 y 10.8 dependiendo de las diferentes mezclas de diseño de CCR.

Siguiendo las prácticas empleadas para diseño de pavimentos en aeropuertos, se recomienda la resistencia a la flexión obtenida a los 90 días como valor de diseño. Usualmente este es un 10 % mayor que la resistencia a los 28 días.

### 3.1.2 Módulo de elasticidad.

De igual modo que en la resistencia a la flexión, se tiene una relación entre el módulo de elasticidad ( $E$ ) y la resistencia a la compresión y se determina con la fórmula siguiente: (para unidades psi)

$$E = K (f'_c)^{1.75}$$

Donde: K es una constante que varía entre 59,000 y 67,000 para diferentes mezclas de CCR probadas.

### 3.1.3 Valores de diseño.

Se sugiere que se tomen para diseño preliminar los valores siguientes:

$$f_r = 9 (f'_c)^{1.75}$$

$$E = 57,000 (f'_c)^{1.75}$$

La tabla siguiente muestra algunos valores de las propiedades estructurales basadas en estas ecuaciones.

Resistencia a la compresión, psi	Resistencia a la flexión, psi	Módulo de elasticidad psi
3000	490	3'100,000
3500	530	3'400,000
4000	570	3'600,000
4500	600	3'800,000
5000	640	4'000,000

Se deben efectuar pruebas sobre todo de resistencia a la flexión para la mezcla final de diseño.

#### 3.1.4 Fatiga.

Al igual que en el concreto convencional, una falla de fatiga ocurre cuando se tienen repeticiones continuas de carga que causan esfuerzos menores que la resistencia del material, pero que con el tiempo provocan la falla.

Como los esfuerzos críticos en el CCR son la flexión y la fatiga provocada por los esfuerzos de flexión, estos se emplean para el diseño del espesor. La relación de esfuerzos (SR) es usada en las relaciones de fatiga. Es la relación entre el esfuerzo y la

resistencia a la flexión. Por ejemplo, si la carga de una rueda provoca un esfuerzo de flexión de 400 psi y la resistencia a la flexión del CCR es de 650 psi, entonces:

$$SR = 400/650 = 0.62$$

(SR-Stress ratio-Relación de esfuerzos)

### 3.2 TIPO DE PAVIMENTO.

Como se mencionó en la introducción de esta tesis, existe en general en todos los libros sobre pavimentos una clasificación general de los mismos que dice que existen *pavimentos flexibles*, que deben su nombre a la carpeta asfáltica que se coloca sobre la base y los *pavimentos rígidos*, construidos mediante concreto hidráulico y pueden o no tener una base que los separe de la subrasante. Sin embargo, quizá más cerca de ser clasificados como rígidos existen los *pavimentos de concreto compactado con rodillos*. Los manejo por separado, ya que pueden combinarse todas las características que poseen con innovaciones, ya que no existe una regla de diseño definitiva.

### 3.3 PROCEDIMIENTO DE LA PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. (P.C.A.)

El mencionar dentro de uno de los capítulos de mi tesis el procedimiento de la PCA para el diseño del espesor de pavimento de CCR, no quiere decir que vaya a dar un curso sobre dicho método o lo vaya a describir en su totalidad, simplemente se mencionarán algunas

de las variables que intervienen en el mismo y que se emplean en el diseño.

**3.3.1 Introducción:** Para asegurar la realización y obtención de una vida útil amplia en los pavimentos de concreto es esencial tener en cuenta los siguientes factores:

1. Tener un soporte (sub-base y base) razonablemente uniforme.
2. Prevenir el bombeo con una capa delgada de cemento en la sub-base en los proyectos de tránsito pesado o aeropistas, (aunque el CCR no requiera juntas de construcción, estas se forman por si solas).
3. Elaborar un diseño de espesor que soporte los esfuerzos dentro de los límites de seguridad.

**3.3.2 Bases para el diseño:** El método de diseño de la PCA se basa en los conocimientos básicos siguientes:

- Estudios teóricos de losas de pavimento de H. M. Westergaard, Gerald Pickett, etc.
- Pruebas en modelo y reales (prototipo) de pavimentos de concreto.
- Pavimentos experimentales sujetos a pruebas de tráfico controlado.
- Pavimentos construidos sujetos a tránsito combinado normal.

**3.3.3 Propiedades del concreto:** La deformación de un pavimento de concreto sujeto a la carga de las ruedas, produce esfuerzos tanto de compresión como de flexión. Los esfuerzos de compresión son demasiado pequeños, comparados con la resistencia de la losa como para que influyan en el espesor. Las relaciones entre los esfuerzos

de flexión y la resistencia a la misma son mucho mayores, excediendo a veces el valor de 0.5. Esto dá por resultado que se empleen ambos en el diseño del espesor. La resistencia a la flexión se determina mediante el módulo de ruptura ( $M_R$ ), que se obtiene mediante pruebas ASTM C78 con cargas colocadas en los tercios del claro de una viga especialmente elaborada con el material de construcción).

Las pruebas para determinar el módulo de ruptura por lo general se hacen a los 7, 14, 28 y 90 días. Los resultados de las pruebas a los 7 y 14 días se hacen para comparar las especificaciones de diseño y para determinar cuando se abre al tránsito el pavimento.

Las pruebas a los 28 y 90 días se hacen para el diseño de espesores de autopistas, aeropuertos, etc. En los aeropuertos, generalmente se eligen los resultados de las pruebas a los 90 días como resistencia para el diseño. Por medio del estudio de las condiciones y su evaluación se demuestra que el uso de un valor de resistencia inferior, por ejemplo el obtenido a los 28 días, usualmente dá por resultado un pavimento sobrado. Debido al continuo aumento de resistencia que se produce durante la vida del pavimento, el módulo de ruptura pronto excede el valor de los 28 días.

El número de repeticiones de esfuerzo en cualquier punto, bajo toda la carga de proyecto, será muy pequeño durante los primeros meses de pavimentar. Por esta razón se recomienda que el módulo de ruptura que se use para determinar el espesor del pavimento sea el de la resistencia a los 90 días o del 110% al 114% de la resistencia a los 28 días, si no se dispone de los resultados de la prueba de

resistencia a los 90 días. Durante este período, el factor de seguridad de diseño será más que adecuado para evitar una falla por fatiga en el pavimento.

Puede haber casos especiales en los que las condiciones, como el uso de equipo pesado de construcción sobre pavimento relativamente delgado durante las primeras semanas después de colado el pavimento, indiquen que debe usarse una resistencia con valor menor que el obtenido a los 90 días.

Las siguientes relaciones aproximadas entre la resistencia a la flexión y a la compresión algunas veces es útil en las etapas preliminares del proyecto; sin embargo el proyecto final debe basarse en los datos de las pruebas para determinar el módulo de ruptura.

$$MR = K ((f'_c)^{1.18-2.0})$$

donde: MR : resistencia a la flexión (módulo de ruptura lb/pig<sup>2</sup>)

K : constante cuyo valor está comprendido entre 8 y 10.

f'\_c: resistencia a la compresión, lb/pig<sup>2</sup>.

3.3.4 *Fatiga*: Como otros materiales estructurales, el concreto también sufre los efectos de la fatiga. La falla por fatiga debido a la flexión ocurre cuando el material se rompe bajo el efecto de las repeticiones continuas de las cargas que produzcan relaciones entre los esfuerzos de flexión y ruptura menores que la unidad. Tanto el comportamiento de los pavimentos como las investigaciones sobre la

fatiga en el concreto indican que, al disminuir las relaciones de esfuerzo (relación entre el esfuerzo a la flexión y el módulo de ruptura), el número de repeticiones de esfuerzo para la falla aumenta.

Los efectos de la fatiga influyen en el procedimiento de diseño en una de estas dos maneras:

1. En la selección de un factor de seguridad conservador, basado en el conocimiento general del número de aplicaciones de carga que se espera que ocurran durante la vida útil que se haya considerado en el diseño para el pavimento. La experiencia ha demostrado que este es un procedimiento racional para el diseño de la mayoría de los pavimentos, cuando se eligen los factores adecuados, en los que se toman en cuenta los aumentos de volúmenes de tráfico, los pesos y la canalización del tráfico que deberá soportarse.
2. En que se hayan hecho las predicciones específicas de las cargas y volúmenes de tráfico, con lo que puede hacerse un análisis más detallado de los efectos de la fatiga. En este procedimiento pueden analizarse los efectos de la composición del tráfico, ya sea para el diseño de un nuevo pavimento o para evaluar la capacidad estructural futura de uno ya construido.

3.3.5 *Resistencia del conjunto de subrasante y sub-base:* En un análisis para diseño se hacen suposiciones con respecto al funcionamiento en conjunto de la subrasante y la sub-base o sólo de la subrasante. La mayoría de los procedimientos para diseñar

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

pavimentos de concreto se han basado en el módulo de Westergaard de la reacción de la subrasante,  $k$ , determinado por medio de pruebas de carga con una placa de 30 pulgadas de diámetro. En este método se considera como si la subrasante tuviera las propiedades de un líquido denso para soportar cargas. Las gráficas de influencia elaboradas por Pickett y Ray son una extensión del análisis de Westergaard y fueron elaboradas, tanto para la suposición de que la subrasante es un líquido denso, como para la que supone que es un sólido elástico. La primera es la que se ha usado con mayor frecuencia para el diseño de pavimentos.

Los resultados obtenidos suponiendo que la subrasante es un líquido denso son algo mayores que los esfuerzos medidos. En la mayoría de los casos estas diferencias no son grandes. Los esfuerzos calculados están del lado de la seguridad y se aconsejan para el diseño. (Cuando se usa la suposición del sólido elástico, siempre que se use el valor correcto para el módulo de la subrasante, se obtienen esfuerzos teóricos más aproximados a los valores medidos. Sin embargo existen dificultades prácticas para la determinación de las constantes elásticas a partir de los datos de las pruebas de los suelos o de las pruebas en que se aplican cargas con una placa. En la actualidad se está trabajando tanto experimental como analíticamente en estas y otras teorías de la subrasante. Los resultados de los estudios pueden aplicarse al diseño si se dispone de datos suficientes para establecer una correlación segura con la experiencia obtenida en el funcionamiento de los pavimentos.)

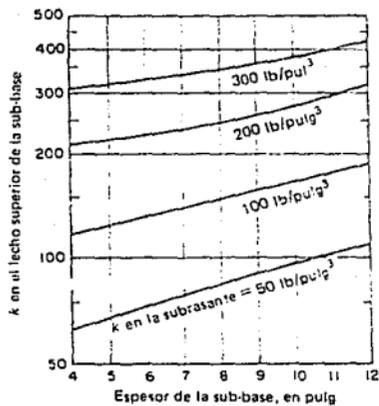
El valor de  $k$  se determina por medio de la placa de carga

sobre la subrasante y sobre la sub-base, si es que se usa una. Aunque las pruebas con la placa de carga son preferibles, algunas veces el valor de  $k$  se estima por correlación con las pruebas de laboratorio para determinar la resistencia o el tipo de suelo para obras pequeñas en las cuales no es posible hacer pruebas de carga con la placa.

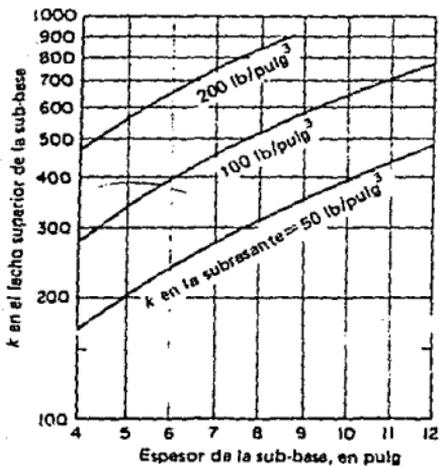
Si se usa una base granular o estabilizada bajo el pavimento, habrá un aumento en el valor de  $k$ . Siempre que sea posible, deberá construirse un tramo de sub-base de prueba y hacerse pruebas con la placa de carga. Si esto no resulta práctico, puede hacerse una estimación de  $k$  de la gráfica (4) o de la gráfica (5).

El análisis de Westergaard representa un sistema de dos capas compuesto de una losa de concreto sobre la cimentación en que se apoya con el módulo de reacción  $k$ . Si se usa una sub-base y posiblemente otras capas, una descripción analítica más estricta sería que se trata de un sistema de tres capas o de uno de capas múltiples. Sin embargo cuando se determina  $k$  en la superficie de la capa de cimentación (8), la experiencia ha demostrado que se obtienen aproximaciones razonables para los esfuerzos y las deflexiones usando este valor de  $k$  en el análisis de Westergaard. En el caso de las aeropistas, esto es cierto mientras el tamaño del área cargada esté limitada a la de los trenes de aterrizaje de ruedas sencillas, al de ruedas dobles y al de ruedas muy juntas dobles en tandem.

3.3.6 *Prueba de la placa de carga:* Las pruebas de la placa de carga deberán hacerse empleando una de diámetro de 30 pulgadas sobre suelos



Gráfica (4) Efecto del espesor de las sub-bases granulares en el valor de  $k$ .



Gráfica (5) Efecto del espesor de las sub-bases tratadas con cemento en el valor de  $k$ .

representativos, bajo condiciones que se aproximen a las que existen debajo del pavimento en las condiciones de funcionamiento. Usando un sistema de placas circulares, un gato grande calibrado y un sistema de anclas o cargas muy pesadas, la subrasante se sujeta a presiones conocidas que se aplican con una velocidad predeterminada. Se mide el desalojamiento de la placa de carga sobre la subrasante por medio de extensómetros calibrados y se registra a intervalos regulares de carga o de tiempo. Los detalles del equipo y los procedimientos se dan en las especificaciones ASTM D1195 y D1196 y en el Manual Técnico TM-5-824-3 del Department of the Army.

*3.3.7 Evaluación de los resultados de la prueba:* Los datos de las relaciones entre las cargas y la deformación obtenidos pueden dibujarse en la forma de una curva. El módulo de reacción de la subrasante  $k$  es la relación de la carga en lb/pulg<sup>2</sup> al desalojamiento de la placa de carga en pulgadas. Por ejemplo, si la curva de la relación entre la carga y la deformación demuestra que una carga de 7.5 lb/pulg<sup>2</sup> produce una deflexión de 0.05 pulg,  $k$  es igual a 7.5 dividido entre 0.05, o sea 150 lb/pulg<sup>2</sup>. El desalojamiento de la placa de carga que se use para determinar  $k$  debe aproximarse a la deflexión producida en el pavimento bajo las cargas por rueda esperadas. La relación de la carga a la deformación cuando el desalojamiento es de 0.05 pulgadas es la que generalmente se usa para la determinación de  $k$ . Sin embargo el cuerpo de ingenieros del Ejército de Estados Unidos, determina  $k$  en base a la deformación obtenida con una carga de 10 lb/pulg<sup>2</sup>.

Quando se prueban las bases estabilizadas, quizá el equipo

de carga no sea lo suficientemente pesado para obtener una deflexión de 0.05 pulgadas. Aunque lo fuera, la presión resultante en la base puede exceder en mucho las presiones ejercidas bajo la losa por las ruedas de los aviones. Por lo anterior, se recomienda una presión máxima de 10 lb/pulg<sup>2</sup> para las pruebas con la placa de carga en bases estabilizadas.

**3.3.8 Determinación de  $k$  cargando pavimentos:** Al evaluar la capacidad estructural de un pavimento, se puede determinar el valor de  $k$  haciendo pruebas de carga en las losas de concreto. En este caso, el pavimento de concreto distribuirá la carga en una superficie mayor que la de una placa de 30 pulgadas, por lo tanto, será necesario un gato de mayor capacidad y cargas mayores.

Debe conocerse tanto la superficie de la losa flexionada como la deflexión en un número suficiente de puntos para determinar el volumen de desalojamientos bajo varias cargas. Para este objeto se necesitan varios micrómetros. El módulo  $k$  es la relación del total de cargas en libras al volumen total del desalojamiento en pulgadas cúbicas.

**3.3.9 Gráficas para diseño:** En la Portland Cement Association se pueden obtener gráficas para el diseño de pavimentos para la mayoría de los aviones civiles y militares, en el caso de aeropuertos, así como de carreteras.

Es muy importante seleccionar la gráfica adecuada a los datos de carga de nuestro pavimento.

3.3.10 *Factores de seguridad:* El coeficiente de seguridad (relación del módulo para el diseño al esfuerzo de trabajo) usado para el diseño del pavimento depende de la frecuencia prevista para las operaciones de tráfico y de su canalización en el caso de aeropistas, pistas de rodaje y plataformas.

En el caso concreto de los aeropuertos, no se tomaban en cuenta las grandes magnitudes de las cargas de los aviones ni la frecuencia mayor de las aplicaciones de carga a las que después se sujetó el pavimento. La estimación del tráfico futuro, es indudablemente uno de los factores más importantes en el diseño de los pavimentos de los aeropuertos. Los datos sobre las futuras operaciones y cargas pueden obtenerse de predicciones de las líneas de aviación comercial, los funcionarios que administran los aeropuertos, y de los proyectos de los fabricantes de aviones. Basándose en esta información, puede elegirse un coeficiente de seguridad adecuado y usarse para determinar los esfuerzos de trabajo admisibles en las gráficas de diseño.

Se recomiendan las siguientes amplitudes de variación de los coeficientes de seguridad:

**Zonas críticas:**

Plataformas, calles de rodaje, estacionamientos,  
extremos de las aeropistas en una distancia de  
1000 pies y pisos de los hangares

1.7-2.0

## Zonas no críticas:

Aeropistas (porción central) y algunas calles  
de rodaje, de salida, de alta velocidad 1.4-1.7

En el caso concreto de los pavimentos de carreteras, se sabe que los esfuerzos de deformación producidos por la carga del vehículo decrecen a medida que la velocidad del mismo aumenta, por lo que se tiene los siguientes factores de seguridad dependiendo del tipo de carretera:

Autopistas con tráfico ininterrumpido y altos volúmenes de camiones	1.2
Carreteras con tráfico moderado de camiones	1.1
Carreteras, calles residenciales, etc. con poco volumen de tráfico de camiones	1.0

## 3.3.11 Procedimiento para diseñar:

La determinación de los espesores de las losas consta de los siguientes pasos:

1. Se determina el valor de  $k$  por medio de pruebas con placas de carga o correlacionando los datos de las pruebas efectuadas en el suelo de la subrasante.
2. Se hace una estimación cuidadosa de las condiciones de operación y de

carga presentes y futuras y se elige un factor de seguridad conservador.

3. Los esfuerzos de trabajo para una carga específica, se determinan dividiendo el módulo de ruptura del concreto entre el factor de seguridad elegido.
4. Con la gráfica de diseño de la carga específica, se determina el espesor del pavimento para el esfuerzo de trabajo determinado en el paso 3.
5. Repitase el proceso para otras cargas críticas, eligiendo de nuevo, factores de seguridad adecuados a la categoría de operaciones previstas y elijase un espesor de diseño para la condición más crítica.

### 3.4 PROPUESTA DE LA ESTRUCTURACION.

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

Para exponer prácticamente lo que sería el diseño del espesor de CCR en la estructura del pavimento, se verá un ejemplo:

Considerando que tenemos un camión de carga con las

Stress ratio*	Allowable repetitions	Stress ratio	Allowable repetitions
0.41**	465,000	0.56	9700
0.42	360,000	0.57	7500
0.43	280,000	0.58	5600
0.44	210,000	0.59	4500
0.45	165,000	0.60	3500
0.46	130,000	0.61	2700
0.47	100,000	0.62	2100
0.48	76,000	0.63	1600
0.49	59,000	0.64	1200
0.50	46,000	0.65	950
0.51	35,000	0.66	740
0.52	27,000	0.67	570
0.53	21,000	0.68	440
0.54	16,000	0.69	340
0.55	12,000	0.70	260

Tabla (5) Relaciones de Esfuerzos y Posibles Repeticiones de Carga.

\* Esfuerzo de Carga dividido entre el Módulo de Ruptura. \*\* Repeticiones Ilimitadas para relaciones de esfuerzos de 0.40 o menos.

$h, in.$	$k = 50$	$k = 100$	$k = 150$	$k = 200$	$k = 250$	$k = 300$	$k = 350$	$k = 400$	$k = 500$
8	43.23	36.35	32.85	30.57	28.91	27.62	26.58	25.70	24.31
8.5	45.24	38.04	34.37	31.99	30.25	28.91	27.81	26.90	25.44
9	47.22	39.71	35.88	33.39	31.58	30.17	29.03	28.08	26.55
9.5	49.17	41.35	37.36	34.77	32.89	31.42	30.23	29.24	27.65
10	51.10	42.97	38.83	36.14	34.17	32.65	31.42	30.39	28.74
10.5	53.01	44.57	40.28	37.48	35.45	33.87	32.59	31.52	29.81
11	54.89	46.16	41.71	38.81	36.71	35.07	33.75	32.64	30.87
11.5	56.75	47.72	43.12	40.13	37.95	36.25	34.89	33.74	31.91
12	58.59	49.27	44.51	41.44	39.16	37.41	36.02	34.84	32.94
12.5	60.41	50.80	45.90	42.72	40.34	38.64	37.11	35.92	33.97
13	62.22	52.32	47.27	43.99	41.61	39.75	38.25	36.99	34.99
13.5	64.00	53.82	48.63	45.26	42.86	40.89	39.35	38.06	35.99
14	65.77	55.31	49.98	46.51	44.09	42.00	40.44	39.11	36.99
14.5	67.53	56.78	51.31	47.75	45.30	43.14	41.51	40.15	37.97
15	69.27	58.25	52.63	48.98	46.52	44.26	42.58	41.19	38.95
15.5	70.99	59.70	53.94	50.20	47.71	45.35	43.64	42.21	39.92
16	72.70	61.13	55.24	51.41	48.88	46.45	44.70	43.23	40.88
16.5	74.40	62.56	56.53	52.61	49.75	47.54	45.74	44.24	41.84
17	76.08	63.98	57.81	53.80	50.88	48.61	46.77	45.24	42.78
17.5	77.75	65.38	59.08	54.98	52.00	49.68	47.80	46.23	43.72
18	79.41	66.78	60.35	56.16	53.11	50.74	48.82	47.22	44.65
19	82.70	69.54	62.84	58.48	55.31	52.84	50.84	49.17	46.51
20	85.95	72.27	65.30	60.77	57.47	54.92	52.84	51.10	48.33
21	89.15	74.97	67.74	63.04	59.62	56.96	54.81	53.01	50.13
22	92.31	77.63	70.14	65.28	61.73	58.98	56.75	54.89	51.91
23	95.44	80.26	72.52	67.49	63.83	60.98	58.63	56.75	53.67
24	98.54	82.86	74.87	69.68	65.90	62.96	60.58	58.59	55.41

\*For  $E = 4,000,000$  psi and  $\mu = 0.15$

Tabla (6) Valores de Rigidez Relativa  $k$ , Relaciones de Rigidez Relativa, (pulgadas) Para  $E = 4,000,000$  psi y  $\mu = 0.15$ .

siguientes características:

Número de ruedas = 6 (2 delanteras y 4 traseras)

Carga máxima en las ruedas traseras = 65,000 lb en cada arreglo doble

Espaciamiento entre llantas dobles = 21 pulgadas (centro a centro)

Presión de inflado de las llantas = 110 psi

Superficie de contacto de cada neumático =  $65,000/2/110 = 295$  pulg<sup>2</sup>

Resistencia a la flexión del CCR,  $f_r = 700$  psi

Resistencia Subrasante-subbase,  $k = 200$  pci

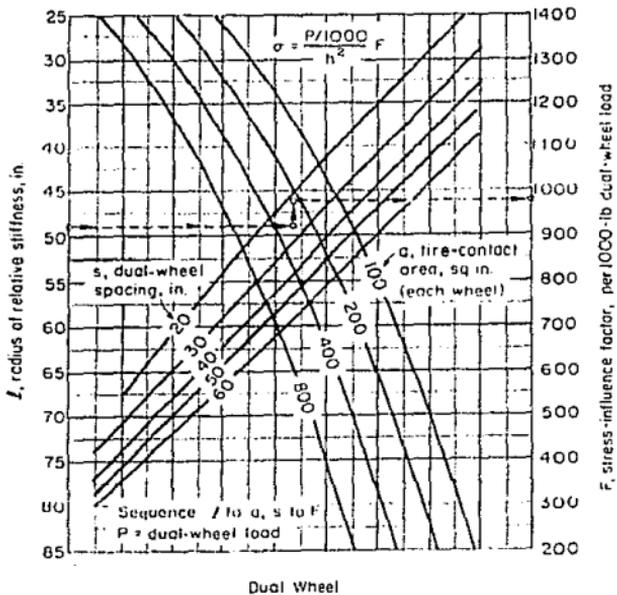
Número diario de repeticiones canalizadas de llantas dobles sobre el área de pavimento,  $B = 40$

Número de repeticiones anuales de llantas dobles en un periodo de diseño de 20 años =  $40 \times 365 \times 20 = 292,000$

Relación de esfuerzos de diseño (Tabla 5),  $SR = 0.43$

El esfuerzo permisible =  $f_r \times SR = 700 \times 0.43 = 301$  psi

1. Lo primero que hay que hacer es seleccionar un espesor de prueba, para lo cual se elige el de 15 pulg.



Grafica (6) Factor de influencia de esfuerzos para cargas de ruedas dobles.

2. En la tabla (6), para una  $k = 200$  psi se obtiene un valor de rigidez relativa = 49.0
3. Con ese valor entramos a la gráfica que tenemos en la gráfica (b) y prolongamos una horizontal hasta intersectar el valor de la superficie de contacto y verticalmente con el espaciamento entre llantas. Desde ese punto nos movemos hacia la derecha hasta encontrar el valor de  $F$  (Factor de esfuerzo de influencia en miles) igual a 980.
4. Se calcula el esfuerzo debido a la carga mediante la fórmula siguiente:

$$\begin{aligned} & \text{Carga de llantas dobles} \quad 1 \\ \text{Esfuerzo} = & \frac{\text{-----} \times \text{-----} \times F}{1,000 \quad (\text{ESPESOR})^2} \\ & \frac{65,000 \quad 1}{1,000 \quad (15)^2} \times 980 = 283 \text{ psi} \end{aligned}$$

5. El proceso se repite determinando los esfuerzos para otros espesores de prueba, y se tabulan los datos como sigue:

Número	Espesor pulg.	Rigidez pulg.	F	Esfuerzo psi.
1	15	49	980	283
2	14	46.5	955	317
3	14.5	47.8	965	298

6. Se selecciona el espesor de pavimento de OCH, buscando que el esfuerzo que es provocado por la carga sea igual o menor al esfuerzo permisible. En este ejemplo, como tenemos un esfuerzo permisible de 301 psi, un espesor de 14 pulgadas no es el correcto, mientras que el de 14.5 pulgadas es seleccionado como el espesor de diseño, por aproximarse más su esfuerzo al permisible sin rebasarlo.

#### 4. EQUIPO DE CONSTRUCCION.

El equipo de construcción que se ha de utilizar para la fabricación de CCR, es el punto crítico sobre el cual radica la economía de este procedimiento constructivo. En el caso concreto de esta tesis, es aún más importante recalcar que se puede emplear el mismo equipo que se usa en el movimiento de tierras y en la fabricación de pavimentos de concreto asfáltico, ya que con esto se puede hacer una comparación más tangible de costos. Aunque es muy importante pesar cuidadosamente todas las posibilidades para poder escoger la máquina más eficiente; esto es: la menor inversión posible al más bajo costo unitario en el mínimo tiempo realizabile.

##### 4.1 CLASIFICACION

La clasificación que se utiliza, es muy sencilla para facilitar el entendimiento del proceso constructivo y es la siguiente:

1. Equipo de dosificación.
2. Equipo de transporte.
3. Equipo de colocación.
4. Equipo de compactación.

4.1.1 Equipo de dosificación: Dentro de este grupo se puede tener una amplia gama de equipos que prácticamente se encargaran de obtener un producto final de mezclado dentro de lo establecido por el proyecto. En este punto, el proceso constructivo comienza desde el muestreo y

análisis de los materiales existentes en la localidad, explotación de bancos mediante perforadores neumáticos (siendo el caso del agregado grueso), acarreo de los mismos hasta el lugar en donde se cribarán o triturarán hasta donde lo indique el control de calidad. Se dosifican junto con el agregado fino, el material cementante y el agua y están listos para ser transportados. Dentro de esta clasificación el equipo clave es la planta mezcladora ya que esta nos permite llenar los requisitos de producción sin dejar que tengamos tiempos muertos que afectarían tanto la calidad del pavimento como la economía del proyecto

4.1.2 Equipo de transporte: Se le define así, dado que su función es la de acarrear la mezcla de CCR hasta el frente de colocación. En el caso de algunas presas se pueden utilizar bandas transportadoras, pero en nuestro caso, dado que nos vamos desplazando conforme se va construyendo el pavimento, se pueden utilizar: ollas revolventoras, motoescrepas, camiones de volteo, etc. dependiendo del equipo existente y del análisis económico correspondiente.

4.1.3 Equipo de colocación: Dependiendo de la combinación de equipo que se haya elegido como óptima para el transporte del CCR, dependerá el tipo de equipo a utilizar en la colocación. pueden emplearse: Tractores empujadores, motoconformadoras y pavimentadoras, siendo las últimas las que nos facilitarán el control del espesor de la capa de pavimento.

4.1.4 Equipo de compactación: Existen muchos tipos de compactadores, algunos tienen rodillos estáticos, otros son vibratorios, unos son

neumáticos otros son metálicos, pero a fin de cuentas su función es la misma, compactar el material colocado hasta llegar a la densidad requerida por el diseño. Pero aquí es donde quizá intervenga en mayor grado y dependiendo del volumen a compactar hacer mayor incapié en que clase de rodillo se vá a utilizar considerando todas las variables de peso, frecuencia de vibración, dimensiones, etc. que se reflejarán en el número de pasadas que es necesario aplicar a la capa de pavimento y estas a su vez en el tiempo de compactación.

#### *4.2 BREVE DESCRIPCION DEL EQUIPO EXISTENTE EN MEXICO APLICABLE A LA CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS DE CCR.*

Este es quizá el capítulo de la tesis que nos permite asegurar que el procedimiento de construcción de pavimentos de CCR, revolucionará los caminos y aeropuertos de nuestro país, ya que afirmo sin temor a equivocarme que toda clase de equipos, antiguos y modernos aplicables a la construcción de carreteras convencionales con pavimentos asfálticos son aceptables en este procedimiento si se toman en cuenta sus características y se rigen por un estricto control de calidad en campo.

En México, dado que nos encontramos al sur de uno de los países fabricantes de maquinaria más importantes del mundo, podemos decir que contamos con toda clase de equipos aptos para la fabricación de Concreto Compactado con Rodillos, enisto a continuación los grupos de equipos que posteriormente describiré:

1. MOTOCONFORMADORAS
2. COMPACTADORES
3. CAMIONES DE VOLTEO
4. PAVIMENTADORAS
5. PLANTAS DOSIFICADORAS
6. CARGADORES FRONTALES
7. MOTOESCREPAS

#### 4.2.1 POSIBLES COMBINACIONES DE EQUIPO.

Dado que como se ha mencionado, el procedimiento constructivo de pavimentación con CCR está en pleno desarrollo, sugiero que se hagan las combinaciones de equipo que proporcionen el máximo rendimiento con el mínimo costo, lo cual es un principio básico de ingeniería, pero tratando de mejorar los antecedentes ya que se sigue innovando.

#### 4.2.2 MOTOCONFORMADORAS

El uso que se les puede dar en la pavimentación con CCR es prácticamente el mismo que en el pavimento asfáltico, pero hay que tener muy en cuenta que se está trabajando con concreto que posteriormente será compactado.

Existen una infinidad de motoconformadoras cuyas características varían de acuerdo a su potencia en el motor, longitud de la cuchilla, número de velocidades de avance y retroceso, número de ejes con tracción (simple ó en tandem), etc.

#### 4.2.3 COMPACTADORES.

Existen varios tipos de compactadores pero su diferencia fundamental radica en la forma de compactar. Principalmente se tienen dos grandes grupos:

Compactadores estaticos

Compactadores vibratorios (dinamicos)

*Compactadores estaticos:* Su principio se basa en la aplicación de pesos más o menos grandes sobre la superficie a compactar. La acción de este principio de compactación es de arriba hacia abajo, es decir, las capas superiores alcanzan primero mayores densidades que las de abajo.

*Compactadores vibratorios:* El principio de compactación vibratoria es el que últimamente ha tenido mayor desarrollo y prácticamente ha invadido todos los materiales por compactar. En la mayoría de los tipos de material, la compactación dinámica o vibratoria, supera en eficiencia a los compactadores estaticos.

Estos compactadores al igual que los estaticos, aplican una cierta presión, pero al mismo tiempo se somete al material a rápidas y fuertes vibraciones. Debido a estas vibraciones, desaparece la fricción interna del material propiciando el acomodo de las partículas.

##### 4.2.3.1 COMPACTADORES NEUMATICOS

Los rodillos neumáticos son muy eficientes y a menudo esenciales. Sus bulbos de presión son semejantes a los de los rodillos metálicos, pero el área de contacto permanece constante por lo que no se produce el efecto de reducción del bulbo. Pueden ser jalados o autopropulsados y se pueden dividir en cuanto al tamaño de sus llantas:

-De llantas pequeñas

-De llantas grandes

*De llantas pequeñas:* Generalmente tienen dos ejes en tandem y el número de llantas puede variar entre 7 y 13. Proporcionan una presión de contacto semejante a la proporcionada por equipos de mayor peso y llantas grandes y tienen mayor maniobrabilidad.

*De llantas grandes:* Son generalmente arrastrados por tractor y pesan de 15 a 50 toneladas, tiene 4 o 6 llantas en un mismo eje, son difíciles de maniobrar y de transportar.

Los factores más importantes que intervienen en este tipo de compactadores son:

- a) **Peso total.**- Dependiendo del número total de llantas y del compactador se puede conocer el peso o fuerza aplicada por llanta. A mayor peso total, mayor carga por llanta, en caso de tratarse de una suspensión isostática.
- b) **La presión de inflado es importante,** pero está ligada íntimamente a la carga de la llanta. La carga sobre la llanta y la presión de

inflado, deben ser las adecuadas para dar la presión de contacto suficiente para ejercer el esfuerzo requerido de compactación (Se recomienda seguir las especificaciones del fabricante).

#### 4.2.3.2 COMPACTADORES METALICOS

Existen dentro de los compactadores metálicos dos grandes grupos que son:

Compactadores Estáticos

Compactadores Vibratorios

En la actualidad se siguen utilizando los compactadores estáticos pero con una gran tendencia a desaparecer ya que se mejora la compactación con un rodillo vibratorio.

##### 4.2.3.2.1 COMPACTADORES METALICOS VIBRATORIOS

Funcionan disminuyendo temporalmente la fricción interna existente entre las partículas del material a compactar. En los materiales granulares como son la grava y la arena, su resistencia depende principalmente de la fricción interna, a diferencia por ejemplo de un suelo plástico en donde su resistencia depende de la cohesión entre partículas. La eficiencia de estos rodillos está casi limitada a materiales granulares.

La vibración provoca un reacomodo de las partículas que resulta en un incremento del peso volumétrico.

Estos rodillos producen un gran trabajo de compactación en relación a su peso estático ya que la principal fuente de trabajo es la fuerza dinámica de compactación.

Estos rodillos se clasifican por su tamaño, pequeños hasta 9,000 kg de fuerza dinámica y grandes de más de 9,000, pudiendo llegar hasta 20,000 kg o más. Todos los vibradores deben manejarse a velocidades de 2.5 a 5 km/h. Velocidades mayores no incrementan la producción y con frecuencia no se obtiene la compactación.

#### 4.2.3.2.2 *COMPACTADORES METALICOS ESTATICOS*

Este rodillo metálico utiliza solamente presión con un mínimo de amasamiento en materiales plásticos. Cuando estos rodillos inician la compactación de una capa, el área de contacto es más o menos ancha y se forma un bulbo de presión de una cierta profundidad. Conforme avanza la compactación el ancho del área de contacto se reduce, y por lo tanto también se reduce la profundidad del bulbo de presión y aumentan los esfuerzos de compresión en la cercanía de la superficie. Estos esfuerzos son suficientes para triturar los agregados, e invariablemente causan la formación de una costra en la superficie de la capa.

Dentro de este grupo se puede hacer la división siguiente:

-Planchas tandem: Son aquellas que tienen dos o tres rodillos metálicos paralelos, generalmente huecos para ser lastrados.

con agua y/o arena.

-Planchas de tres ruedas: Son de diseño más antiguo, tienen dos ruedas traseras paralelas y una rueda delantera.

#### 4.2.4 CAMION DE VOLTEO.

Considero muy importante el recordar que para obtener la eficiencia dentro de un trabajo de ingeniería civil en donde se manejen grandes volúmenes de material, es vital controlar nuestros tiempos de ciclo empleados en el movimiento del mismo para llegar al punto óptimo de operación.

Esto se hace mención ya sea para los camiones de volteo o para ollas revolventoras.

#### 4.2.5 PAVIMENTADORA.

Este equipo nos permite colocar capas de material con gran facilidad controlando el espesor de capa de diseño.

Consta de una tolva donde se descarga el material, el cual se distribuye de manera uniforme por medio de una hélice a todo lo ancho de la máquina al momento de su colocación, el espesor de capa es controlado automáticamente.

#### 4.2.6 PLANTA DOSIFICADORA.

Dentro de todos los equipos que se emplean para la fabricación de Concreto Compactado con Rodillos, el que juega un papel vital es la planta dosificadora, ya que nos permitirá producir el volumen de CCR requerido para un tiempo determinado de proyecto.

Existen en la actualidad plantas dosificadoras portátiles con todas las ventajas requeridas para la construcción de pavimentos, ya que si estos se colocan en carreteras, la ubicación de la planta debe ser la adecuada para agilizar el tiempo de acarreo, dadas las características del material.

#### 4.2.7 EQUIPO OPCIONAL

Se están desarrollando en Alemania, máquinas pavimentadoras con una malla vibratoria que da una compactación preliminar a la capa de CCR que va tendiendo la pavimentadora. La compactación final se hace con rodillo vibratorio.

##### 4.2.7.1 CARGADORES FRONTALES

Los cargadores son equipo de excavación, carga y acarreo en distancias cortas, lo que los hace ser indispensables en la explotación de materiales y carga de los mismos en los camiones que los transportarán hasta el lugar de mezclado.

Los cargadores se pueden clasificar en cuanto a su forma de descarga y en cuanto al tipo de rodamiento.

4.2.7.1.1 Por la forma de efectuar la descarga se clasifican en:

- Descarga frontal
- Descarga lateral
- Descarga trasera

*Descarga Frontal:* Los cargadores con descarga frontal son los más usuales de todos. Estos voltean el cucharón o bote hacia la parte delantera del tractor, accionándolo por medio de gatos hidráulicos. Su acción es a base de desplazamientos cortos y se usa para excavaciones en sótanos, a cielo abierto, para la manipulación de materiales suaves o fracturados, en los bancos de arena, grava, gravilla, etc. También se usa con frecuencia en rellenos de zanjas y en alimentación de agregados a plantas dosificadoras o trituradoras.

*Descarga lateral:* Los de descarga lateral tienen un gato adicional que acciona al bote volteándolo hacia uno de los costados del cargador. Esto tiene como ventaja que el cargador no necesita hacer tantos movimientos para colocarse en posición de cargar al camión.

*Descarga trasera:* Se diseñaron para evitar maniobras del cargador pero están obsoletos principalmente debido al riesgo al pasar el bote cargado sobre el operador.

4.2.7.1.2 Clasificación por la forma de rodamiento:

- Montados sobre orugas

-Montados sobre neumáticos

En el caso del CCR se utilizan preferentemente los montados sobre neumáticos.

4.2.7.2 MOTOESCREPAS.

En las obras de construcción de CCR, es posible utilizar a las motoescrepas para el acarreo de material ya que compiten en costo con la combinación tradicional cargador-camión, independientemente de otras ventajas de carácter técnico tales como la colocación del material en capas a espesores controlables que permiten un mejor control en la calidad, además de se pueden utilizar desde la construcción de los terraplenes y posteriormente pasarían a formar parte importante en el transporte y colocación de la capa de CCR.

Esta máquina consta fundamentalmente de dos partes:

- 1) Una caja metálica reforzada soportada por un eje con dos ruedas neumáticas en la parte trasera, una compuerta curva que puede subir o bajar mediante un mecanismo de cables, eléctrico ó hidráulico, una cuchilla de material resistente en la parte inferior de la caja que sirve para cortar el material, una placa metálica móvil en la parte inferior, la cual al desplazarse hacia adelante permite desalojar el material contenido en la caja.
- 2) Todo este conjunto es jalado mediante un tractor de ruedas neumáticas que pueden ser de uno o dos ejes. Los controles de operación se encuentran en dicho tractor.

##### 5. PROPUESTA DE CONSTRUCCION DEL TRAMO DE EXPERIMENTACION

Con la finalidad de obtener pavimentos durables y económicos, se han realizado en México algunas investigaciones relacionadas con la aplicación del CCR en el sector carretero. La primera experiencia que se tuvo fue la pavimentación de un tramo de prueba en la caseta de cobro ubicada en el km 23 de la autopista México-Cuernavaca en julio de 1988.

El tramo de pavimento tiene una longitud de 30 m, un ancho de 3.1 m y un espesor compacto de 15 cm. El tendido se realizó a mano por ser un tramo pequeño.

En esta investigación se tuvieron resultados importantes en cuanto a la producción de mezclas secas en planta central mediante mezclado intermitente, tiempo y distancia de acarreo a la obra, equipo de transporte, equipo de compactación y curado.

Una segunda experiencia fue la pavimentación de dos carriles en el acceso a un patio en una premezcladora ubicada en Ciudad Juárez, Chih. en diciembre de 1986.

Cada carril tiene una longitud de 50 m, un ancho de 3.3 m y un espesor de 17 cm. Los aspectos más relevantes en este proyecto fueron la elaboración de mezclas de CCR en camiones mezcladores (ollas revolvedoras montadas sobre camión), el tendido de capas de 21 cm sueltos utilizando una pavimentadora y la preparación de una junta longitudinal entre ambos carriles.

### 5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA OBRA.

Al hablar en el capítulo anterior de una propuesta de construcción de un tramo de experimentación, se vio que se tienen dos experiencias al respecto y comenzaremos nuestra descripción con los antecedentes de proyecto y posteriormente el tramo de la caseta de la autopista México-Cuernavaca y el tramo de prueba de Ciudad Juárez, Chih.

#### AUTOPISTA MEXICO-CUERNAVACA

El IMCYC, después de haber desarrollado trabajos de laboratorio para la elaboración de mezclas de CCR para la cortina de la presa Peña Colorada I, ubicada en el estado de Colima, y tener ciertos antecedentes de aplicación en México, presentó una propuesta a la Dirección de Proyectos de Carreteras de la Dirección General de Carreteras Federales de la SCT, para participar en el diseño y la supervisión de la construcción del pavimento de los túneles de La Venta en la carretera México-Toluca, utilizando la técnica de CCR; desafortunadamente el tiempo para desarrollar el programa de pruebas de laboratorio fue muy corto y no se llevó a cabo este proyecto. 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 de longitud en el km 23.3 de la autopista México-Cuernavaca, esta fue aceptada y el primer tramo fue 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, como se verá en el punto 5.3 de esta tesis, ya que el mantenimiento anual es un porcentaje muy bajo de la inversión inicial, posee gran durabilidad y es rápido de colocar.

El tramo de pavimento que se construyó tiene una longitud de 30 m por un ancho de 3.1 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 fue de 55-45. El peso volumétrico alcanzado en la sub-base fue 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 peaje.

#### TRAMO CIUDAD JUAREZ, CHIHUAHUA.

El 10 de diciembre de 1988 se construyó un tramo de prueba de pavimentación con CCR de 65 m<sup>2</sup> en una sección rectangular de 18 m por 3.6 m, con un espesor compacto de 12 cm sobre un terraplén (SM) de 20 cm de espesor compacto. La mezcla de CCR tuvo una relación grava-arena 40-60 y un contenido de cemento del 9% del peso total de la grava, que es de origen calizo, triturada parcialmente con un TMA de 3/4", proveniente de una carbonífera ubicada en Ciudad Juárez y la arena proviene de un banco propiedad de COPRECHISA.

El 15 de diciembre de 1988 se compactó la subrasante (SM-SW) con un rodillo vibratorio Ingersoll Rand SP-48. La sub-base se tendió con una motoconformadora Caterpillar 120 en un espesor de 19.5 cm sueltos (30% de abundamiento) y posteriormente se compactó con el rodillo vibratorio, quedando un espesor compacto de 15 cm. El material que constituye la sub-base (SM-SG) se le conoce localmente como "caliche" con un  $IM\%$  de 4.5", el cual proviene de la carbonifera de Ciudad Juárez. El PVS $M$  del caliche es de 2160 Kg/ $m^3$  con una humedad óptima del 7.3%.

Finalmente se dio un acabado a la sub-base con un compactador neumático Koehring PSR-C10 de 9 ruedas. Además se verificó su pendiente longitudinal y transversal. El costo total de las terracerías fue aproximadamente de 9.8 millones de pesos. La temperatura promedio fue de 4 °C con una velocidad del viento de 16 km/hr.

Se tienen obras inducidas tales como una tubería de drenaje de 8" de diámetro y otra de agua potable de 4" de diámetro.

El 19 de diciembre de 1988, finalmente se pavimentaron dos carriles de 158  $m^2$  en una sección rectangular de 48 m por 3.3 m cada uno.

## 5.2 PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO.

AUTOPISTA MEXICO-CUERNAVACA.

Los agregados que se utilizaron en la producción de CCR se almacenaron en dos compartimentos; uno para material, cuyo tamaño fue 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 fue limpia y libre de impurezas. El volumen total del material a utilizar antes de iniciar la construcción fue del 100%.

La planta de mezclado que se empleó en la producción del CCR fue de marca ELBA tipo bacha trepadora. La dosificación de los materiales fue por peso y la producción de 12 a 15 m<sup>3</sup>/hr. El transporte de la mezcla fue por medio de camiones de volteo de 6 m<sup>3</sup> de capacidad, la distancia entre la planta de mezclado y la obra fue de 11 km.

El tendido del material se realizó a mano. Previo al tendido de la mezcla se dió un ligero riego de agua a la sub-base. El espesor de pavimento fue de 15 cm compacto, para lo cual se consideró un porcentaje de abundamiento del 30%.

La compactación se inició con 2 pasadas de un compactador estático de 10 ton., posteriormente se dieron de 4 a 6 pasadas con un compactador vibratorio DYNAPAC CA-25 y finalmente se dieron 2 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.

El curado con agua se realizó durante un periodo de una

semana. El carril fue abierto al tráfico 60 horas después de haber sido construido.

#### TRAMO CIUDAD JUAREZ, CHIHUAHUA.

Los materiales se dosificaron por peso mediante dos dosificadoras, una MIPS A y otra no identificada. La mezcla de concreto fue elaborada en ollas revoladora montadas sobre camión de 7 m<sup>3</sup> de capacidad, los cuales inicialmente descargaron la mezcla directamente sobre la pavimentadora (finisher) BARBER GREENE 10-14 FT. Posteriormente se preparó una rampa con una pendiente ligera para descargar simultáneamente 2 camiones revoladora a un camión de volteo de 6 m<sup>3</sup> en un tiempo de 20 minutos y se transportaba la mezcla fresca en el volteo, el cual la descargaba sobre la pavimentadora en un circuito no mayor de 150 m. Se contó para el extendido de la mezcla con dos pavimentadoras, una BARBER GREENE 10-14 FT montada sobre neumáticos y otra de 8-12 FT montada sobre orugas. Esta última dañaba ligeramente la sub-base en los giros que realizaba, además de ser un equipo muy antiguo (1952), pero tuvo que utilizarse en el segundo carril ya que la otra pavimentadora presentó fallas mecánicas. El espesor de la capa tendida fue de 17 cm suelta, lo que implicó un 40% de abundamiento.

La compactación se realizó primero con un rodillo estático marca GALION ROLL-O-MATIC (TRICICLO) en dos pasadas. Posteriormente se dieron 6 pasadas con rodillo vibratorio y finalmente se le dió acabado a la superficie con un compactador de neumáticos de la marca BROS RED SEAL (9 neumáticos, 7.5-15 UNIROYAL) con cuatro pasadas.

**MATERIALES:**

CARPETA ASFALTICA

LOSA DE CCR

RIEGO DE IMPREGACION CON

MEZCLA DE CCR CON TMA DE 3/4"

PRODUCTO ASFALTICO FM-1

Y CEMENTO PORTLAND TIPO 1

1.5 LT/M2

RIEGO DE LIGA CON

PRODUCTO ASFALTICO FR-3

0.5 LT/M2

MEZCLA ASFALTICA CON

TMA DE 3/4" Y CEMENTO

ASFALTICO No. 6

SELLO 0.75 KG KG/M2 CON

CEMENTO PORTLAND

AGUA 1.5 LT/M2

**CONSIDERACIONES:**

1. SE ANALIZA 1 KILOMETRO DE PAVIMENTO CUYO ANCHO ES DE 3.6 M.
2. NO SE TIENEN PROBLEMAS DE DRENAJE.
3. SE UTILIZO UN PORCENTAJE DE ABUNDAMIENTO DEL 30%.
4. SE CONSIDERO UN DESPERDICIO DEL 5% EN RIEGOS.
5. EL COSTO DIRECTO ES EXCLUSIVAMENTE MATERIALES, A JULIO DE 1988.
6. DISTANCIA DE ACARREO DE LOS MATERIALES = 50 KM.

CONCRETO ASFALTICO

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO DIR	TOTAL
SUBRASANTE DE 37 CM DE ESPESOR COMPACTADO	M3	1827.8	\$18,500	\$33,814,300
SUB-BASE DE 0.0 CM DE ESPESOR COMPACTADO	M3	0.0	\$20,500	\$0
BASE HIDRAULICA DE 25 CM DE ESPESOR COMPACTADO	M3	1235.0	\$22,851	\$28,221,294
RIEGO DE IMPREGNACION FM-1	LT	5985.0	\$315	\$1,882,283
RIEGO DE LIGA FR-3	LT	1995.0	\$315	\$627,428
CARPETA ASFALTICA DE 10 CM DE ESPESOR COMPACTADO. (COSTO DE MATERIAL+ MEZCLADO)	M3	494.0	\$71,825	\$35,481,550
SELLO DE CEMENTO PORTLAND	TON	2.9	\$120,000	\$342,000
AGUA	M3	5.7	\$20,500	\$116,850
COSTO MATS. PAVIMENTO CONCRETO ASFALTICO =				\$100,485,704
COSTO/M2 PAVIMENTO DE CONCRETO ASFALTICO =				\$26,444

CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO DIR	TOTAL
SUBRASANTE DE 30 CM DE ESPESOR COMPACTADO.	M3	1482.0	\$18,500	\$27,417,000
SUB-BASE HIDRAULICA DE 12 CM DE ESPESOR COMPACTADO	M3	592.8	\$22,851	\$13,546,221
CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS DE 15 CM DE ESPESOR+COSTO DE MEZCLADO	M3	769.5	\$59,796	\$46,013,030
COSTO DE MATERIALES PAVIMENTO DE CCR =				\$86,976,251
COSTO DEL M2 DE PAVIMENTO DE CCR =				\$22,886
RESULTADO DE ESTE PRIMER ANALISIS:				
COSTO PAVIMENTO DE CCR		\$22,866		
		-----	=	0.87
COSTO PAVIMENTO ASFALT.		\$26,444		

DE LO ANTERIOR SE OBSERVA QUE EL COSTO DE LOS MATERIALES EN EL PAVIMENTO DE CCR NO LLEGA A SER EL 90% DEL COSTO EN EL OTRO TIPO DE PAVIMENTO. ESTO SE REFIERE EXCLUSIVAMENTE A COSTO INICIAL. SI SE CONSIDERAN LOS COSTOS DE MANTENIMIENTO A LO LARGO DE LA VIDA UTIL, LA VENTAJA DEL CCR ES AUN MAYOR, CASI EN UN FACTOR DE 10 A 1.

## CALCULO DE LOS VOLUMENES DE CONCRETO ASFALTICO:

V1 =	$3.8 \cdot 0.37 \cdot 1000 \cdot 1.3 =$	1827.8	M3	SUBRASANTE
V2 =	$3.8 \cdot 0 \cdot 1000 \cdot 1.3 =$	0.0	M3	SUB-BASE
V3 =	$3.8 \cdot .25 \cdot 1000 \cdot 1.3 =$	1235.0	M3	BASE
V4 =	$3.8 \cdot 1.05 \cdot 1000 \cdot 1.5 =$	5985.0	LT	RIEGO DE IMPREGNACION
V5 =	$3.8 \cdot 1.05 \cdot 1000 \cdot 0.5 =$	1995.0	LT	RIEGO DE LIGA
V6 =	$3.8 \cdot 0.10 \cdot 1000 \cdot 1.3 =$	494.0	M3	CARPETA ASFALTICA
V7 =	$3.8 \cdot 0.75 \cdot 1000 =$	2850.0	KG	SELLO
V8 =	$3.8 \cdot 1.5 \cdot 1000 =$	5700.0	LT	AGUA

## CALCULO DE LOS VOLUMENES DE CCR:

V1 =	$3.8 \cdot 0.30 \cdot 1000 \cdot 1.3 =$	1482.0	M3	SUBRASANTE
V2 =	$3.8 \cdot 0.12 \cdot 1000 \cdot 1.3 =$	592.8	M3	SUB-BASE
V3 =	$3.8 \cdot 0.00 \cdot 1000 \cdot 1.3 =$	0.0	M3	BASE
V4 =	$3.8 \cdot 0.15 \cdot 1000 \cdot 1.35 =$	769.5	M3	CCR

## 5.4 POSIBLES PROBLEMAS EN CAMPO Y SOLUCIONES

Como se mencionó en el capítulo 5 de esta tesis, los únicos tramos de investigación de aplicación de CCR en pavimentos en México, en los que el IMCYC ha participado son el de la autopista México-Cuernavaca y el de Ciudad Juárez, Chih. y de estos se tienen las siguientes experiencias, las cuales son muy valiosas en futuras obras de CCR.

*AUTOPISTA MEXICO-CUERNAVACA.*

1. Los problemas que se presentaron en el tramo *Mexico-Cuernavaca* fueron: El volumen de producción de las mezcladoras ELBA de tipo bacha trepadora es muy bajo e intermitente. Para trabajos de pavimentación muy grandes, existen tiempos muertos en el equipo de construcción (pavimentadoras, compactadores, etc.), lo cual repercutirá en el costo.

**SOLUCION:** Hacer un cálculo preciso de los requerimientos de producción y seleccionar el equipo adecuado para el mezclado, lo cual implica una dosificación óptima a la vez.

2. El tiempo de acarreo de las mezclas fue muy grande.

**SOLUCION:** Se recomienda tomar las precauciones adecuadas para que el tiempo de acarreo se encuentre en un rango de 15 a 20 minutos.

3. Se presentó segregación en la mezcla.

**SOLUCION:** Se recomienda remezclar el material y no formar pilas grandes del mismo.

*CIUDAD JUAREZ, CHIH.*

1. Durante la construcción se tuvieron vientos con gran velocidad, lo cual provocó una aceleración en el fraguado del material.

**SOLUCION:** Este problema se controló acelerando el proceso de tendido y compactación e iniciando simultáneamente la fase de curado.

2. Se tuvo una descompostura en la pavimentadora y se detuvo el tren de construcción más de 24 horas.

**SOLUCION:** Es recomendable prever las fallas en el equipo que se utilizará y considerar su repercusión económica, ya que puede ser factible el tener una máquina extra sobre todo en la etapa de colocación.

3. Se emplearon ollas revolventoras montadas sobre camión, lo cual provocó un mayor consumo de arena y cemento, la descarga fue muy lenta y posteriormente se cargó a camiones de volteo para su acarreo, con lo cual se tuvo un movimiento adicional del material.

**SOLUCION:** Estudiar y analizar correctamente el equipo a emplear en determinado proyecto, sobre todo si se tiene gran volumen.

#### 5.5 PRUEBAS DE LABORATORIO EN CAMPO

Debido a la velocidad de producción que se tiene en el UCR y a la necesidad de tener los resultados de las pruebas a la mayor brevedad, para que si se requiere se hagan las modificaciones necesarias y obtener una calidad adecuada; se han desarrollado procedimientos como las pruebas aceleradas de resistencia y las de análisis de concreto fresco.

En la actualidad se aplican diversos métodos de resistencia acelerada, algunos con resultados confiables. Sin embargo, dichos resultados se conocen uno o dos días después de haber obtenido la muestra de concreto (ASTM C 684).

Los métodos de análisis de concreto fresco normalmente requieren menos tiempo, pero o una de tres; o resultan ser muy caros como es el caso del densímetro nuclear, o algunos son demasiado complicados para las obras, o no se tiene la suficiente precisión.

Simplemente deseo comunicar que existe un método para analizar concreto fresco mediante deshidratación con alcohol. Este método se desarrolló en la Oficina de Estudios Experimentales de la C.F.E. y dado que en CCK se sigue investigando, sería muy bueno tomarlo en cuenta en futuras aplicaciones (NOM-302).

En el tramo México-Cuernavaca, dentro de las pruebas de laboratorio efectuadas, se tuvieron diez mezclas de concreto. Cuatro de ellas se compactaron utilizando la prueba Proctor Modificada y las otras seis empleando el procedimiento neumático. La energía específica que se proporcionó a cada espécimen en el segundo método fue la misma que se utilizó en la Prueba Proctor Modificada, es decir:

$$E_s = 27.36 \text{ kg cm/cm}^2$$

El objetivo de realizar estas pruebas fue 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.

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 utilizado para efectuar dicha prueba fue el convencional, lo único que se modificó fue el sobrepeso de la placa de apoyo, el cual se incremento de 3.41 kg a 10.97 kg. El ACI 211.3.8 considera estas mezclas como extremadamente secas, ya que la consistencia varía de 16 a 34 segundos.

#### 5.5.1. CONTROL DE CALIDAD EN CAMPO.

En el tramo México-Cuernavaca, antes de construir el pavimento de CCR, se realizaron en campo seis mezclas de prueba de 300 lt cada una y se compactaron con un rodillo vibratorio manual DYNAPAC PR-8. El objetivo fue verificar algunos puntos importantes tales como:

- Eficiencia del equipo de mezclado.
- Uniformidad de la mezcla de concreto y tiempo de mezclado.
- 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 porcentaje de compactación deseado.

Antes de iniciar la producción de 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 la compresión simple a los 7 y 28 días. Además, se comprobaron los pesos volumétricos del pavimento de CCR utilizando el método del volúmetro de la arena. SE verificó la uniformidad de la superficie del pavimento con una regla de 3 metros de longitud, pues la profundidad de las depresiones permitidas es menor a 1 cm.

En el tramo *Ciudad-Juárez, Cdn.*, se desarrollaron las siguientes pruebas para tener una calidad adecuada:

- Se elaboraron 2 cilindros para la prueba Proctor Modificada de 15 x 30 cm en el lugar de la obra para ensayarse a los 28 días.
- Se realizaron estudios granulométricos del material. (grava, arena), así como las propiedades físicas de los agregados.
- Se obtuvieron los contenidos de humedad de las mezclas. (Se elaboraron mezclas húmedas de CCR y se tendieron con la pavimentadora teniendo buenos resultados, la compactación se llevó a cabo con un rodillo estático y se vió que flotaba el equipo. Los espesores fueron los siguientes: SUELTO = 17 cm, COMPACTO = 12 cm 40% de

abundamiento.)

- Se obtuvo el peso volumétrico seco máximo de la subrasante y del pavimento de CCR utilizando el volúmetro de arena.

**5.6 ANALISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CAMPO CON LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO.**

Para observar más fácilmente los resultados de las pruebas de laboratorio y de las pruebas de campo y poder compararlos, se tienen las siguientes tablas con los datos del CCR en estado fresco y en estado endurecido de las pruebas Proctor Modificada y Procedimiento Neumático, obtenidas del Tramo de Prueba de la Autopista México-Cuernavaca.

**PROPIEDADES DEL CCR EN ESTADO FRESCO.**

MAT./ME	PROCTOR MODIFICADA				PROCEDIMIENTO NEUMATICO					
	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6
Peso Vo lumétrico húmedo compacto, kg/m <sup>3</sup>	2158	2266	2294	2317	2047	2230	2366	2398	2395	2383
Peso Vo lumétrico seco compacto, kg/m <sup>3</sup>	2065	2155	2152	2137	1938	2088	2203	2220	2209	2189
Conte- nido de humedad, %	4.5	5.3	6.6	8.4	5.6	6.8	7.4	8	8.5	8.9

Contenido de aire, %	N	2.7	N	2.2	2.5	2.3
-------------------------	---	-----	---	-----	-----	-----

Prueba Vebe

modificada, seg.

inicial (t=0)	-	60	60	33	24	26
final (t=25 min)	-	N	N	59	42	N

N = no se efectuó la prueba

PROPIEDADES DEL CCR EN ESTADO ENDURECIDO. PROCTOR MODIFICADA.

TIPO DE ENSAYE	EDAD DIAS	% HUMEDAD			
		4	5	6	7
Compresión simple, Kg/cm <sup>2</sup>	7	194	281	251	268
	28	211	350	281	303
Tensión indi- recta, Kg/cm <sup>2</sup>	7	-	-	27.2	28.8
	28	-	-	28.9	32.4
f <sub>tb</sub> /f' <sub>c</sub> , %	7	-	-	10.9	10.7
	28	-	-	10.3	10.7

## PROPIEDADES DEL CCR EN ESTADO ENDURECIDO. PROCEDIMIENTO NEUMATICO.

TIPO DE ENSAYE	EDAD DIAS	4	5	5.5	6	6.5	7
Compresión simple, Kg/cm <sup>2</sup>	7	40	192	266	304	297	310
	28	60	160	330	394	365	329
Tensión indirecta, Kg/cm <sup>2</sup>	7	5.5	20.2	-	27	-	25.6
	28	12.5	22.2	-	27.6	-	27.1
Módulo de ruptura, Kg/cm <sup>2</sup>	7	-	40	-	40.8	-	39.3
	28	-	36	-	39.8	-	41.2
Módulo de elasticidad, Kg/cm <sup>2</sup>	7	15603	88602	88738	107889	103343	98450
	28	-	65542	102891	109596	110077	103780
$E = K(f'c)^{1.172}$							
K =	7	2467	6394	5441	6188	5997	5592
	28	-	5182	5664	5521	5762	5722
$f_{tb}/f'c, \%$	7	13.8	10.5	-	8.9	-	8.3
	28	20.8	13.9	-	7	-	8.2
MR/f'c, %	7	-	20.8	-	13.4	-	12.7
	28	-	22.5	-	10.1	-	12.5
$MR = C(f'c)^{1.172}$							
C =	7	-	2.89	-	2.34	-	2.23
	28	-	2.85	-	2.01	-	2.27

NOTA: En la prueba de compresión simple se utilizaron cilindros.

En la prueba de módulo de ruptura se emplearon vigas.

## 6. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES.

Dado que el CCR es colocado en capas y en algunas ocasiones el tiempo que transcurre entre la colocación de dos capas sucesivas puede llegar a exceder de un día, sugiero que se tomen en cuenta los siguientes métodos para asegurar la unión entre las capas de CCR:

1. Restricciones de tiempo-temperatura (madurez)
2. Encamado de concreto en superficies tratadas o no tratadas
3. Capa de mortero en superficies tratadas
4. Pasta de concreto con alto contenido de cemento en superficies tratadas o no tratadas.

El primer método se refiere a la colocación de CCR sin ninguna restricción pero dentro de los lineamientos especificados de tiempo-temperatura (madurez) para la junta como lo determinan los grados-horas. Esta madurez en la junta se obtiene de multiplicar la temperatura promedio por el tiempo durante el cual ha sido expuesta la junta. Por ejemplo: Si una capa de CCR es expuesta a 21 °C por 10 horas, la capa tiene una madurez de 210 °C-hr. Por lo cual es necesario que dicha capa sea tratada de alguna forma para poder colocar la siguiente capa. El límite de madurez puede variar desde 400 °F-hr hasta 1600 °F-hr. Este concepto fue utilizado en la presa Willow Creek (1600 °F-hr) y en la presa Galesville (500 °F-hr). Este método aparentemente no ha tenido resultados efectivos en lo que a uniones se refiere bajo todas las condiciones. Sin embargo, cuando se emplea con temperaturas ambiente de aproximadamente 60 °F (15.6 °C), el grado bajo de madurez parece razonable.

El segundo método incluye la colocación de un "encamado de concreto", el cual consiste en una capa de concreto con alto revenimiento inmediatamente después de la colocación del CCR. La superficie puede ser no tratada, o escarificada mediante una barredora, una ráfaga de arena a presión o agua a presión antes de la colocación del encamado de concreto. La mezcla de concreto generalmente se elabora con alto contenido de arena, TMA (Tamaño máximo de agregado) de 3/4 " (19 mm) con alto contenido de cemento, revenimiento mayor a 15 cm y espesor de 2.5 cm.

El tercer método consiste en colocar una capa de mortero sobre una superficie tratada con alguno de los procedimientos que se mencionaron en el método anterior. Después de haber tratado la superficie, se coloca un mortero cemento-arena muy fluido inmediatamente después del CCR. El espesor del mortero en promedio es de 1/2 " (12.5 mm). Aunque el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos en la presa Elk Creek utilizó un espesor de 2 " (50 mm), lo cual es típico en la construcción japonesa de CCR. Para minimizar el tiempo de tratamiento requerido para cada junta, el espesor de la capa en el lugar donde se realizará la junta puede ser incrementado hasta un poco más de 3 pies (91.44 cm) en el caso de presas.

El cuarto método, pasta de concreto con alto contenido de cemento, fue desarrollado para que teniendo alto contenido de cemento en la mezcla se tenga una adecuada unión sin tener que aplicar un encamado de concreto o de mortero. La mezcla contiene básicamente un gran volumen de puzolanas para reducir la generación de alto grado de

temperatura provocado por el gran contenido de cemento, y empleando además aditivos retardadores de fraguado para dar tiempo a la colocación. La mezcla contiene típicamente un TMA de 2 " (51 mm) o menor. El tratamiento de la superficie incluye un aspirado y barrido, además de agua y arena a presión antes de la colocación. Este concepto fue usado por el USBR (United States Bureau of Reclamation) en la presa Upper Stillwater.

*RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES OBTENIDAS DE LOS TRAMOS DE PRUEBA REALIZADOS EN MEXICO.*

1. No utilizar métodos convencionales para obtener la densidad del pavimento de CCR, pues son procedimientos que llevan tiempo en su ejecución, este problema se puede solucionar realizando pruebas de campo antes de iniciar la construcción del pavimento. Se recomienda utilizar equipos nucleares para medir la densidad y obtener el contenido de humedad. El costo de estos equipos está alrededor de \$ 6,000 dólares U.S. más gastos de importación, pero se pueden amortizar en una obra.
2. La prueba Proctor Modificada ha funcionado muy bien para obtener la densidad máxima y el contenido óptimo de humedad en los suelos. Al utilizar agregados andesíticos para la elaboración de especímenes se ha observado que parte del material se tritura (de un 2% hasta un 8%) con la energía específica de la prueba proctor. Esto comparándolo con una muestra de CCR varillada. Por lo cual es importante verificar en que grado esta prueba puede representar las condiciones de campo.

3. La elaboración de vigas aserradas del pavimento ya construido es muy importante para verificar el módulo de ruptura. Para obtener dicho módulo la norma ASTM recomienda girar el espécimen 90 grados. Esto no es recomendable en el CCR si se tienen espesores de CCR formados por dos o más capas. Para checar la compactación del CCR en las fibras inferiores se recomienda ensayar los especímenes en posición invertida.
4. Para obtener los módulos de elasticidad de corazones extraídos del pavimento de CCR es conveniente utilizar calibradores de tensión (strain-gages).

#### *FUTURAS APLICACIONES*

Actualmente existen en proceso algunos proyectos donde el CCR juega un papel muy importante. El primero, es la construcción de la cortina Peña Colorada ubicada en el Estado de Colima. El objetivo de esta estructura es almacenar el material fino (jales) producto de la molienda del mineral que se extrae de las minas. El volumen aproximado de la cortina es de 500,000 m<sup>3</sup> y el diseño de mezclas de CCR y de concreto convencional están muy avanzados. Se tiene planeado terminar la ingeniería en 1992 e iniciar la construcción en 1993.

Otro proyecto que se está elaborando es la construcción de un tramo de carretera de varios kilómetros, donde se puedan apreciar las bondades de esta técnica.

### REFERENCIAS GENERALES

Apuntes de Movimiento de Tierras Tomos I y II. Facultad de Ingeniería, UNAM, pp 27-191.

Yoder E.J., Feb 1964, Principles of Pavement Design, New York, U.S., pp 4-15. 453-475.

Thickness Design for Concrete Pavements. PCA-Portland Cement Association, U.S. 1966

Moisture-Density Relations of Soils and Soil Aggregate Mixtures Using 10 lb (4.54 kg) Rammer and 18 in (457 mm) Drop., ASTM D-1557-78.

El Cemento Portland y sus Aplicaciones en la Construcción de Vías, ICPC-Instituto Colombiano de Productores de Cemento.

Generalidades sobre los Pavimentos, ICPC-Instituto Colombiano de Productores de Cemento.

Diseño de Pavimentos de Concreto para Aeropuertos, PCA-Portland Cement Association, Limusa 1982, México.

### REFERENCIAS DE CCR EN PRESAS

Antonio Mosqueda Tinoco, Presas de Concreto Rodillado, Revista Ingeniería Hidráulica en México, Vol. 1 Núm. 1 II Epoca, septiembre/diciembre de 1985, pp 26-37.

Roller Compacted Mass Concrete, ACI-American Concrete Institute, Materials Journal Title no. 85-M44, Committe 207.5R, sep-oct 1988 U.S.

Roller Compacted Concrete II, Proceedings of the Conference sponsored by the Construction, Geotechnical Engineering, and Materials Engineering Divisions of the American Society of Civil Engineers, San Diego, California Feb. 29-Mar. 2, 1988, Edited by Kenneth D. Hansen and Leslie K Guice.

### REFERENCIAS DE CCR EN PAVIMENTOS

1981, "International Conference on Rolled Concrete for Dams," Proceedings, Construction Industry Research and Information Association, CIRIA, London, England.

1983, "Roller Compacted Concrete for Pavements," Canadian Portland Cement Association, Vancouver, B.C.

Nov 8, 1984, "Roller Concrete Defies Tanks," Engineering News-Record, pp 6.

May 19, 1986, "Intermodal Terminal Paved with Roller Compacted Concrete," Rocky Mountain Construction, pp 19-22.

1986, "Aircraft Parking Apron Paved with Roller Compacted Concrete," Concrete Transportation, Job Report No. 33, Portland Cement

Association (PL206.01P). Skokie, IL.

Jan 1987, "Roller Compacted Concrete Pavements at Portland International Airport" Fact Sheet, Port of Portland, Oregon.

1987, "Structural Design of Roller-Compacted Concrete for Industrial Pavements," IS233.01P, Portland Cement Association, Skokie, IL.

Nov 87, "Brief News: RCC Paves Municipal Street," Civil Engineering, Vol. 57, No. 11, pp 14.

Oct 1988, "Paver Builds Concrete Business with Asphalt-Derived Equipment," Concrete Products, pp 50-52.

Abrams, J.M., et al, 1986, "Roller Compacted Concrete Pavement at Portland International Airport," Transportation Research Record 1062. Transportation Research Board, pp 20-24.

Abrams, J.M. and J.L. Jacksha, Feb 1987, "An Airport Apron and a County Road," Concrete International: Design & Construction, Vol. 9, No. 2, pp 30-36.

ACI Committee 211, 1975, "Standard Practice for SElecting Proportions for No-Slump Concrete," ACI 211.3-75, American Concrete Institute, Detroit, MI.

ACI Committee 207, 1988, "Roller Compacted Mass Concrete" ACI207.5R-88, American Concrete Institute, Detroit, MI.

ACI Committee 309, 1982, "Standard Practice for Consolidation of Concrete," ACI 309-72 (82), American Concrete Institute, Detroit, MI.

Andersson, F., 1985, "Roller Compacted Concrete Interagency Forum," Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Lakewood, Colorado.

Andersson, R., 1986, "Pavements of Roller Compacted Concrete-Physical Properties," Nordic Concrete Research.

Andersson, R., 1986, "Roller Compacted Concrete Pavements-Physical Properties (Belagningar av valtbetong-fysikaliskaegenskaper)," CBI Report No. Ra 3:86, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, (in Swedish).

Andersson, R., Jan. 1986, "Roller Compacted Concrete." Dvnapac Research Bulletin, No. 8033.

Andersson, R., Feb. 1987, "Swedish Experience with RCC," Concrete International: Design & Construction, Vol. 9, No. 2, pp 18-24.

Borges, S.K., Sept. 1986, "Evaluation and Proposal of United States Air Force Uses of Roller Compacted Concrete Pavement," M.Sc. Thesis, Air Force Inst. of Technology, Wright-Patterson AFB, OH, pp 130.

Brett, M., Feb 29-Mar 2, 1988, "Rcc Pavements in Tasmania, Australia," Proceedings, Roller Compacted Concrete II, San Diego, CA, pp 369-378.

Brett, D.M., R.B. Bender and W.T. Kowaluk, Aug-Sept. 1988, "Roller Compacted Concrete Trial Pavement," Tea Tree Road, Tasmania. Proceedings, Part 8, 14th Australian Road Research, Canberra, Australia, pp 100-107.

Burns, Cecil D., 1978, "Compaction Study of Zero-slump Concrete", Miscellaneous Paper S-76-1b, USAE Waterways Experiment Station, Vicksburg, M.S.

Clark D.E. & J.E. Oliverson, Sept. 1985, "Notes About the Roller Compacted Concrete Pavement at Burlington Northern Railroad's Intermodal Hub Facility, Houston, Texas," presented to Arizona Chapter meeting of ACI.

Delva, K.L., Feb 29-Mar 2, 1988 "Nennick Yard RCC Pavement Design and Construction," Proceedings, Roller Compacted Concrete II, San Diego, CA, pp 410-418.

Grau, Robert W., 1979. " Utilization of Marginal Construction Materials for LOC," Technical Report GL-79-21, USAE Waterways Experiment Station, Vicksburg, M.S.

Hansen, K.D., Feb 1987, "A Pavement for Today and Tomorrow," Concrete International Design & Construction, Vol. 9, No 2, pp 15-17.

Haque, M.N. and M.A. Ward, 1986. "Marginal Materials in Roller Compacted Concrete for Pavement Construction," Journal of the American Concrete Institute, No. 4 Proceedings V. 83, Detroit, Michigan.

Hess, J.R., Spring 1987. "Roller Compacted Concrete Pavement for Tooele Army Depot, Utah," M.Sc. Thesis. California State Univ., Sacramento, CA, pp 96.

Hess, J.R., Feb 29-Mar 2, 1988, " RCC Storage Pads at Tooele Army Depot, Utah," Proceedings, Roller Compacted Concrete II, San Diego, CA, pp 394-409.

Hutchinson, R.L., S.A. Kagan, and D.W. Pittman, Feb 1987, " Heavy Duty Pavements", Concrete International Design & Construction, Vol. 9, No 2, pp 45-61.

Jofre, C., R. Fernández, A. Josa and F. Molina, Feb 29-Mar 2, 1988, "Spanish Experience with RCC Pavements," Proceedings, Roller Compacted Concrete II, San Diego, CA, pp 467-484.

Josa, A., C. Jofre, and F. Molina, 1986, " An Experimental Overlay with Rolled Concrete," Concrete in Transportation, ACI SP 93, American Concrete Institute, Detroit, MI, pp 213-241.

Keifer Jr., Oswin, Mar. 1986, "State of the Art: Paving with Roller Compacted Concrete," Concrete Construction, pp 287-297.

Keifer Jr., O., Oct. 1987, " Paving with RCC," Civil Engineering, Vol 57, No. 10, pp 65-68.

Keifer Jr., O., Feb 29-Mar 2, 1988, "Corps of Engineers Experience With RCC Pavements," Proceedings, Roller Compacted Concrete II, San Diego, CA, pp 429-237.

Larson J.L., 1986, "Roller Compacted Concrete Pavement for Marine Terminals," Ports '86, Proceedings of a Speciality Conference on Innovations in Port Engineering and Development in the 1990's, ASCE, Waterway, Port, Coastal & Ocean Division, Committee on Ports & Harbors, New York, NY., pp 144-158.

Lawrence D.J., July 1986, "Operations Guide and Modification Analysis for Use of CE (Corps of Engineers) Concrete Quality Monitor on Roller Compacted Concrete and Soil Cement," Report No. CERL-TR-M-85/Ub-REV, Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, IL, pp 51.

Logie, C.V. and J.E. Oliverson, Feb. 1987, "Burlington Northern Railroad Intermodal Hub Facility," Concrete International :Design & Construction, Vol. 9, No. 2, pp 37-41.

Malisch, W.R., Jan 1988, "Roller Compacted Concrete Pavements," Concrete Construction, pp 13-17.

Meyer, Kirby, Jun-Jul. 1987, "New Breakthrough in Pavement Technology: Roller Compacted Concrete," Texas Civil Engineer, pp 11.

Murphy, H.W., Feb 1987, "Highway Construction in Queensland," Concrete International: Design & Construction, Vol. 9, No. 2, pp 42-48.

Murphy, H.W., E. Baran, and R.G. Gordon, "Cement Treated Bases for Pavements," Australian Geomechanics News (Sydney), No. 1.

Nanni, A., and A. Johari, Mar. 1989, "RCC Pavement Reinforced with Steel Fibers," Concrete International, pp 64-69.

Nanni, A., May-June, 1988, "Limestone Crusher-Run and Tailings in Compaction Concrete for Pavement Applications," ACI Materials J., Vol 85, No. 3, pp 158-163.

Nanni, A., Nov. 1988, "Curing of Roller Compacted Concrete: Strength Development," J. of Transportation Engineering, Vol. 114, No. 6, pp 684-694.

Nanni, A., Jan 1989, "Properties and Design of Fiber Reinforced RCC," Transportation Research Board Meeting, Washington D.C.

Palmer, W.D., Feb 1987, "One Tough Pavement", Concrete International: Design & Construction, Vol. 9, No. 2, pp 25-29.

Parker, L., 1983, "Production and Use of Dry Rolled Concrete by the City Engineers Department, Sydney City Council," Pavement Alternative, Seminar, Hobart, Cement and Concrete Association of Australia.

Piggott, R.W., and O. Naas, 1985, "Roller Compacted Concrete

Pavements in British Columbia", Proceedings of the Symposium on Roller Compacted Concrete, K.D. Hansen, Editor, ASCE Construction Division, Denver, CO, pp 31-47.

Figgott, R.W., 1986, "Roller Compacted Concrete for Heavy Duty Pavements: Past Performance, Recent Projects, Recommended Construction Methods," Concrete in Transportation, ACI SP 93, American Concrete Institute, Detroit, pp 169-185.

Figgott, R.W., Feb. 1987, "Ten Years of Heavy Duty Pavement in Western Canada," Concrete International: Design & Construction, Vol. 9, No. 2, pp 49-54.

Pittman, D.W., Feb 5-7, 1986, "Construction of Roller-Compacted Concrete Pavement," American Society of Civil Engineers, New York, N.Y., Proceedings of Speciality Conference on Earthmoving and Heavy Equipment, Tempe AZ.

Pittman D.W., Feb 29-Mar 2, 1988, "RCC Pavement Construction and Quality Control," Proceedings, Roller Compacted Concrete II, San Diego, CA, pp 438-453.

Pittman, D.W., Aug-Sept. 1988, "Construction of a Roller-Compacted Concrete Pavement Hardstand at Kitzingen, West Germany," Proceedings, Part 8, 14th Australian Road Research, Canberra, Australia, pp 87-99.

Pittman, D., and S.A. Ragan, Nov. 1986, "A Guide for Design and Construction of Roller Compacted Concrete Pavements," GL86, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, pp 26.

Pittman, D.W. and T.D. White, April 1985, "Roller Compacted Concrete Pavements," Proceedings, Third International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Purdue University, West Lafayette, Ind., pp 107-112.

Ragan, S.A. 1986, "Evaluation of the Frost Resistance of Roller Compacted Concrete Pavements," Transportation Research Record 1062, Transportation Research Board, Washington, D.C.

Ragan, S.A., Feb 29-Mar 2, 1988, "Proportioning RCC Pavement Mixtures" Proceedings, Roller Compacted Concrete II, San Diego, CA, pp 380-393.

Rollings, R.S., 1987, "Using Marginal Materials in Pavements," VIIIth Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cartagena, Colombia.

Rollings, R.S., Feb 29-Mar 2, 1988, "Design of Roller Compacted Concrete Pavements," Proceedings, Roller Compacted Concrete II, San Diego, CA, pp 454-466.

Rollings, R.S., Aug-Sept. 1988, "Design and Construction of Roller Compacted Concrete Pavements," Proceedings, Part 8, 14th Australian Road Research, Canberra, Australia, pp 149-163.

Schrader, E.K., 1987, "Compaction of Roller Compacted Concrete," Consolidation of Concrete, ACI SP96, American Concrete Institute, Detroit, MI, pp 77-101.

Schrader, E.K., J. Paxton, and V. Kamakrishnan, 1985, "Composite Concrete Pavements with Roller Compacted Concrete," Transportation Research Record 1003, pp 50-56.

Schweizer, E., and G.W. Raba, Feb 29-Mar 2, 1988, "Roller Compacted Concrete with Marginal Aggregates," Proceedings, Roller Compacted Concrete II, San Diego, CA, pp 419-428.

Stetzer, S.W. and R. King, Jan 23, 1986, "Smoothing Out the Bumps in RCC," Engineering News Record, (Feature Article) pp 106-107.

Stewart, F. and C.J. Schexnayder, 1986, "Construction Techniques for Roller-Compacted Concrete," Transportation Research Record 1062, pp 32-37.

Tayabji, S.D., and P.A. Okamoto, 1987, "Bonding of Successive Layers in Roller Compacted Concrete," CTL Report to U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation, Skokie, IL.

Tayabji, S.D., and P.A. Okamoto, 1987, "Engineering Properties of Roller Compacted Concrete," Transportation Research Record No. 1136, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp 33-45.

Tayabji, S.D., and D.J. Halpenny, 1987 "Thickness Design of Roller Compacted Concrete Pavements," Transportation Research Record No. 1136, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp 23-32.

U.S. Army Corps of Engineers, 1985, "Engineering and Design, Roller Compacted Concrete," Engineer Manual No. 1110-2-2006, Department of the Army, Washington, D.C.

U.S. Army Corps of Engineers, 1987, "Standard Practice for Concrete Pavements," Technical Manual 5-822-7, Department of the Army, Washington, D.C.

U.S. Army Corps of Engineers, Jan. 1988, "Thickness Design of Roller-Compacted Concrete Pavements for Airfields, Roads, Streets and Parking Areas," ETL 1110-1-141, Washington, D.C., pp 3.

U.S. Army Corps of Engineers, Sept. 1988, "Roller Compacted Concrete Paving," Fort Benning, GA.

White T.D., 1986, "Mix Design, Thickness Design, and Construction of Roller Compacted Concrete Pavement," Transportation Research Record 1062, pp 1-6.