

**ESTUDIO DESCRIPTIVO DE LA TECNOLOGÍA DEL CONCRETO COMPACTADO
CON RODILLO Y SU APLICABILIDAD EN PAVIMENTOS.**

JOSÉ LUIS ALVARADO AGUIRRE

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS
BOGOTÁ D.C
2014**

RESUMEN

En vista de que actualmente el Concreto Compactado con Rodillo (CCR) se está imponiendo como material de construcción de pavimentos y su comportamiento aún está siendo estudiado; es importante la ejecución de actividades orientadas a la investigación sobre esta nueva tecnología.

El CCR es un concreto de asentamiento cero, de consistencia seca y de trabajabilidad tal que se consolida por vibración externa con rodillos vibratorios o equipos vibro-compactadores, relaciona conceptos de tecnología de concreto y mecánica de suelos, se elabora en plantas de concreto, los materiales utilizados son los mismos que se utilizan en la fabricación de concreto convencional, se utilizan equipos comunes y de amplia existencia dentro de las empresas constructoras para su transporte, colocación, distribución y compactación. Todo lo anterior lo convierte en un material atractivo en la construcción de pavimentos.

La presente monografía se realiza con el objeto de proporcionar información orientada a conocer las principales características de carácter técnico del CCR, tomando como base que el CCR presenta grandes ventajas en comparación con un concreto convencional debido a su mayor densificación y menor relación agua/cemento, entre otras, constituyéndose en una alternativa económica para la construcción de pavimentos.

Para llevar a cabo este trabajo, se efectuó una revisión bibliográfica de trabajos de grado, artículos, libros y páginas web que describen experiencias internacionales y nacionales referentes a la tecnología del concreto compactado con rodillo y su aplicación en la construcción de pavimentos. En su primera parte se hace un breve recuento acerca del desarrollo histórico de este tipo de concreto, se revisan los conceptos generales acerca del CCR y se dan a conocer las características principales de los materiales utilizados. Luego se describen las ventajas y desventajas del CCR con respecto a un concreto convencional y se enuncian los usos y aplicaciones. Posteriormente se describen las propiedades físicas, se enuncian los ensayos y los métodos de diseño de mezcla y finalmente la descripción de este material en la construcción de pavimentos.

Palabras claves: Concreto Compactado con Rodillo, Pavimento, Diseño de mezcla, Densificación, Relación Agua/Cemento.

ABSTRACT

In view that currently the roller-compacted concrete (RCC) is imposing as material for the construction of pavements and its behavior is still being studied; it is important to carry out activities aimed at the research on this new technology.

The CCR is a concrete of zero settlement, of dry consistency and workability as to consolidates by external vibration with vibratory rollers or equipment vibrated - compactors, relates the concepts of concrete technology and soil mechanics, is manufactures in concrete plants, the materials used are the same that are used in the manufacture of conventional concrete, common equipment is used and of existence within the construction companies for its transport, placement, distribution and compaction. All of the above makes it an attractive material in the construction of pavements.

The present monograph is realized in order to provide information oriented to know the main characteristics of technical character of the CCR, taking as a base that the CCR presents big advantages compared to a conventional concrete due to its biggest density and less relation water / cement, between others, being constituted in an economic alternative for the pavings construction.

To carry out this work, was made a literature review of degree works, articles, books and web pages that describe national and international experiences concerning the technology of roller compacted concrete and its application in pavement construction. In its first part is done a brief account about the historical development of this type of concrete, we review the general concepts of RCC and are given to know the main features of the materials used. Then describes the advantages and disadvantages of RCC with respect to a conventional concrete and set forth the uses and applications. Subsequently described the physical properties, set forth the tests and the methods of design of mixture and finally the description of this material in the construction of pavements.

Keywords: Roller Compacted Concrete, Paving, Pattern Mixing, Densification, water /cement ratio.

TABLA DE CONTENIDO

1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
2.	ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	9
2.1	ANTECEDENTES	9
2.2	JUSTIFICACIÓN	12
3.	OBJETIVOS.....	14
3.1	OBJETIVO GENERAL	14
3.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS	14
4.	MARCO REFERENCIAL.....	15
4.1	MARCO TEÓRICO	15
4.2	MATERIALES PARA CCR	18
4.2.1	Materiales Aglutinantes (Cementantes)	18
4.2.2	Agregados	19
4.2.3	Agua.....	21
4.2.4	Aditivos.....	21
4.3	VENTAJAS DEL CCR.....	22
4.4	DESVENTAJAS DEL CCR.....	23
4.5	USOS Y APLICACIONES	23
4.6	PROPIEDADES FISICAS DEL CCR	24
4.6.1	Resistencia Mecánica.....	24
4.6.2	Propiedades elásticas.....	25
4.6.3	Otras	26
4.6.4	Valores típicos de propiedades físicas:.....	27
4.7	ENSAYOS REALIZADOS AL CCR	28
4.8	MÉTODOS DE DISEÑO	28
4.8.1	Método I: Filosofía de suelos	29
4.8.2	Método II: Filosofía del Concreto	30
4.9	DISEÑO DE MEZCLA.....	32
4.10	DESCRIPCIÓN DEL CCR PARA PAVIMENTOS.....	33

4.10.1	Proceso constructivo de pavimentos con CCR	34
5.	METODOLOGÍA	38
6.	CONCLUSIONES	39
	BIBLIOGRAFIA	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Compactación de CCR en Pavimentos.	16
Figura 2. Aplicación de CCR en Presas.	17
Figura 3. Aplicación de CCR en Pavimentos.	17
Figura 4. Compactación CCR con Rodillo Vibratorio. Presa Zapotillo. Jalisco, México.	18
Figura 5. Descargue de CCR de camión de volteo.....	22
Figura 6. Aplicación de CCR en presas.....	24
Figura 7. Aplicación de CCR en construcción de presas.	28
Figura 8. Aplicación de CCR en construcción de presas.	30
Figura 9. Curvas de Dosificación para igual resistencia del concreto.	31
Figura 10. Efecto del tiempo de vibración y del contenido de agua en la densidad del concreto con cenizas volantes.	31
Figura 11. Efecto del tiempo de vibración y del contenido de agua en la densidad del concreto de cemento portland.....	32
Figura 12. Extendedora Convencional de alta densidad en compactación de CCR en Pavimentos	34
Figura 13. Construcción de tramo experimental vía de acceso a la fábrica de cementos diamante.....	34
Figura 14. Tren de colocación y compactación CCR.	35
Figura 15. Compactación de CCR mediante Compactador de Rodillo.	35
Figura 16. Toma de densidad mediante densímetro Nuclear.	36
Figura 17. Pavimento en CCR.....	37

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Gradación ideal de agregados	20
Tabla 2. Límites Gradación de agregado fino	20
Tabla 3. Contenido de agua, arena, mortero y aire atrapado para varios agregados, Tamaño nominal. Valores típicos para uso en la estimación de Proporciones en un ensayo de mezcla de CCR.....	21

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La implementación de nuevas tecnologías para la construcción de carreteras son cada vez más necesarias para dar respuesta a las exigencias de diversa índole en el sector vial, lo cual requiere de la investigación de las mismas para identificar aquellas que proporcionen la mejor solución.

La industria de la construcción es una de las mayores consumidoras de recursos naturales en el mundo. Se estima que anualmente se explotan en todo el mundo unos 8 billones de toneladas de agregados naturales para producir 11 billones de toneladas de concreto hidráulico. (Terán Gilmore, 2008)

Por lo anterior, es natural la idea de buscar nuevos sistemas ahorradores de energía y materias primas en la producción de nuevos materiales y técnicas de construcción que representen soluciones a las exigencias de conservación del medio ambiente.

Actualmente, errores en la formulación y diseño, mala ejecución de los proyectos e inadecuados sistemas de administración de carreteras producen patologías en los pavimentos demandando altos costos de mantenimiento. La alternativa de la construcción de pavimentos en Concreto Compactado con Rodillo representa una alternativa viable como técnica constructiva.

2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

2.1 ANTECEDENTES

La información sobre Concreto Compactado con Rodillo, empezó a llegar a Colombia en la década de los 70, luego en 1987 se sustentaron dos proyectos de grado, el primero titulado: “Concreto Compactado con Rodillo Vibratorio”, realizado en la Universidad Javeriana, en la ciudad de Bogotá con los estudiantes Oscar E. Jaramillo y Germán A. Posso, el segundo titulado: “Pavimentos de concreto seco compactado con rodillo” se desarrollo en la Escuela de Ingeniería de Antioquia, con los estudiantes: Carlos E. Salazar y Edgar Trujillo, estos y otros proyectos de grado han podido demostrar las bondades del material. (Santaella Valencia, 1999)

En Colombia es muy poco lo que se ha hablado de CCR en la construcción de pavimentos, sus aplicaciones más inmediatas han sido la construcción de presas. A continuación, es presentada la experiencia internacional y los últimos trabajos que han sido realizados.

- **Experiencia Sueca**

En Suecia los pavimentos de CCR fueron introducidos a partir de 1984, inicialmente utilizados como revestimientos construidos con pavimentadoras de asfalto de elevada capacidad de compactación, para conseguir una correcta regularidad superficial; la resistencia al deslizamiento ha sido mejorada, utilizando rodillos recubiertos con caucho. Se han utilizado pavimentos de CCR fundamentalmente en calles, plantas industriales, aeropuertos, minas, recintos militares, etc. habiéndose cumplido las exigencias funcionales para las que fueron construidos. En Suecia, normalmente los pavimentos de CCR son abiertos al tráfico después de 12 horas y durante la construcción es realizado un cuidadoso control de calidad. El grado de compactación exigido es de 97% de la energía modificada.

- **Experiencia Española**

Las primeras aplicaciones del CCR en España datan de 1970, comenzaron como pavimentos de urbanizaciones de calles con tráfico liviano y de caminos rurales. A partir de 1984 las aplicaciones se ampliaron a carreteras principales y autopistas, incluyendo nuevos proyectos, alargamientos y ensanches de pistas, rehabilitaciones, etc. El grado de compactación exigido es de 97% de la energía modificada.

Según la experiencia española, para pavimentos de tráfico pesado es necesario tener cuidado en los siguientes puntos:

- a) Garantizar la máxima uniformidad del material usando plantas mezcladoras adecuadas, que dosifiquen los materiales en peso y que tengan un efectivo control de la humedad.
- b) Adaptar los espesores a ser construidos a la capacidad de los equipos esparcidores y de compactación disponibles o viceversa. De ser necesario, puede ser conveniente la construcción del CCR en dos capas, lo que facilita la obtención de las densidades requeridas y mejora la uniformidad de las superficies.

En el caso de adoptarse la solución en dos o más capas, es necesario realizar un efectivo escarificado de la superficie de la primera capa, para garantizar la adecuada adherencia de ésta con la segunda, lo que permitirá la obtención de un pavimento monolítico.

- c) Realizar un estricto control durante la compactación, chequeando densidades a través de densímetros nucleares, para no tener exceso ni falta de compactación.
- d) Contener los bordes de pavimento con contenciones laterales ejecutadas anticipadamente, construir las bermas previamente, o construir la capa de CCR con un ancho extra; en este último caso se debe construir la berma de la carretera con la misma estructura del pavimento.

- **Experiencia Alemana**

En Alemania, han sido ejecutados pavimentos de CCR desde 1986, en calles, instalaciones militares, tramos experimentales, etc. En áreas de estacionamientos se han logrado ahorros del orden del 10 a 16% en comparación con los pavimentos de concreto convencionales; En Alemania además se han desarrollado las principales máquinas vibrocompactadoras para la ejecución de pavimentos de CCR, destacándose la fábrica Vogele.

- **Experiencia Americana y Canadiense**

Los americanos y canadienses han ejecutado una gran cantidad de pavimentos de CCR, siendo la experiencia muy extensa y variable. En los últimos años se construyó en EEUU, un tramo experimental de CCR reforzado con dos tipos de fibras de acero, para observar el efecto de estos elementos en el pavimento. Se concluyó, para los dos tipos de fibras utilizados, que la colocación de estas no afecta la preparación, la

mezcla, ni la colocación del CCR y que el aspecto superficial es casi semejante al material sin fibras, excepto que algunas de ellas quedan visibles. Fundamentalmente se verificó, en ambos casos, que las fibras utilizadas mejoraron considerablemente las propiedades del CCR.

- **Experiencia Australiana**

En Australia desde 1986, se han ejecutado proyectos de pavimentos de CCR de elevada resistencia, que incluyen desde veredas y caminos públicos hasta pavimentos industriales, lo que ha permitido un desarrollo continuo en el diseño, ejecución y ensayos del CCR. Los diseños de mezclas han considerado el uso de humo de sílice, cenizas volantes y escorias de alto horno, los cuales han permitido obtener pavimentos de alta resistencia.

- **Experiencia Japonesa**

A partir de 1987, en Japón se han construido un gran número de pavimentos de CCR; el éxito de este concreto ha sido principalmente su fácil método de ejecución y su rápida apertura al tráfico.

- **Experiencia Sudamericana**

En los países sudamericanos se ha utilizado el CCR en tramos experimentales y en obras de pavimentación.

a) Brasil: En Brasil las primeras obras de importancia realizadas con CCR datan de 1972, en su gran mayoría ha sido utilizado como base de pavimentos con carpeta asfáltica, también ha sido utilizado como base de pavimentos de concreto. En ambos casos las carreteras donde ha sido empleado este material presentan tráfico pesado. Como revestimiento ha sido utilizado en calles urbanas, áreas de estacionamiento y patios industriales; en todos los casos ha presentado un buen desempeño.

b) Argentina: En Argentina, el CCR ha sido usado desde 1986 en tramos experimentales de diferentes longitudes construidos en diversas regiones del país, experimentándose en diferentes climas, materiales y procesos constructivos, se ha utilizado el CCR como capa de rodamiento, base y como material para bacheo, obteniéndose importantes conclusiones, fundamentalmente en cuanto al uso de materiales locales y características constructivas.

- c) **Uruguay:** En 1988 se ejecutó en Uruguay el primer tramo experimental de aproximadamente 2.000 m² de pavimentos de CCR en los accesos a Montevideo con la participación del Instituto de Cemento Portland de Argentina.
- d) **Chile:** El Instituto Chileno de Cemento, con aportes Fiscales, ejecutó en 1989 tres tramos experimentales de CCR y otro de concreto convencional.

Uno de estos tramos fue construido en un camino de acceso a una fábrica de cemento y fue sometido a tráfico pesado; otro fue construido en una vía urbana y solicitado por tráfico liviano.

El tercer tramo se ejecutó dentro de un recinto universitario local donde, también, fue construido un tramo de concreto convencional para comparar los comportamientos; ambos tramos fueron instrumentados con equipos de alta precisión, los cuales eran operados automáticamente por microcomputador, midiéndose variaciones térmicas, variaciones de humedad, aberturas de juntas, desplazamientos verticales, deflexiones, alabeos, etc. Estos tramos no fueron solicitados por tráfico.

Después de un año de la ejecución se concluyó, fundamentalmente, que las juntas en el pavimento sin tráfico se produjeron naturalmente cada 4 a 5 m, y que las aberturas de estas fueron menores que las del concreto convencional; los alabeos térmicos e hidráulicos afectaron al CCR de la misma forma que al concreto tradicional, la magnitud de las deflexiones del CCR en las esquinas de las losas fue decreciendo a medida que el pavimento se subdividía de manera natural durante el proceso de retracción por secamiento.

- **Experiencia África del Sur**

En África del Sur, en 1989 fueron realizados una serie de ensayos de laboratorio y la construcción de un tramo experimental. (Rocha Pitta, 2005)

2.2 JUSTIFICACIÓN

Desde un primer momento la búsqueda de un concreto con baja fisuración, junto con la necesidad de establecer el empleo de unas mezclas y sistemas de ejecución más económicas, condicionaron de manera determinante las dosificaciones empleadas con esta nueva técnica. Los bajos contenidos de cemento y agua para la

consecución de tales fines llevaron por necesidades de colocación a la compactación con rodillo, conjuntándose estos aspectos en lo que hoy se conoce de manera general como Concreto Compactado con Rodillo.

En vista de que actualmente la tecnología del Concreto Compactado con Rodillo es una alternativa que se está empleando en todo el mundo y que a través de los años está siendo cada vez más estudiado con la finalidad de poseer un material más económico y técnicamente cada vez mejor, es pertinente conocer las características de este material para su aplicabilidad en pavimentos.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio descriptivo de la Tecnología del Concreto Compactado con Rodillo y su aplicabilidad en Pavimentos.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Enunciar las principales características del Concreto Compactado con Rodillo.
- Interpretar las variaciones en las propiedades de un Concreto Compactado con Rodillo, respecto a un concreto convencional, con base a estudios e investigaciones anteriores.
- Presentar el estado del arte acerca de la construcción de pavimentos en Concreto Compactado con Rodillo.
- Describir el proceso constructivo de pavimentos en concreto compactado con rodillo, así como sus controles de calidad.
- Analizar los beneficios y limitaciones que presenta el Concreto Compactado con Rodillo en su aplicación en pavimentos.
- Describir los materiales, métodos y diseños de mezclas de Concreto Compactado con Rodillo.
- Realizar sugerencias para la utilización de concreto Compactado con Rodillo en la pavimentación de carreteras en Colombia.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 MARCO TEÓRICO

4.1.1 Reseña histórica

El origen de este concepto está en las conferencias celebradas en Asilomar, California, en 1970 y 1972. A partir de entonces se hicieron numerosos estudios y ensayos para llegar a conocer con mayor exactitud las distintas propiedades que exhibía esta nueva concepción en el tratamiento del concreto.

El primer pavimento de concreto ejecutado en Escocia en 1865, se densificó con rodillos, pues no se había desarrollado en esa época la técnica de vibración, la que se introdujo en todos los campos de la ingeniería civil, y por ende en la construcción de pavimentos en los años 30, después de la Primera Guerra Mundial. Hasta entonces, los pavimentos de concreto se compactaban con rodillos. Con el advenimiento de la vibración y debido también a la no disponibilidad de equipos de compactación que aseguraran una densificación homogénea en todo el espesor del pavimento, se abandona el compactado con rodillos en la construcción de pavimentos. No es sino hasta pasada la mitad del siglo XX, alrededor de 1970 que se retoma la técnica del compactado con rodillos, básicamente por la aparición de equipos de compactación más modernos y eficientes. Los primeros pavimentos en esta nueva etapa se construyen en Barcelona, España alrededor de 1970, en una serie de vías de bajo volumen de tránsito. En 1976 Canadá inicia la construcción de pavimentos de uso pesado para la industria de la madera. Después de 1980 se da un aumento en la construcción de pavimentos en CCR en todo el mundo, destacando España, Francia, Alemania, Estados Unidos, Canadá, los países nórdicos, Australia y Japón (Solano Jimenez).

4.1.2 Generalidades

- **Definición:**

La American Concrete Institute (ACI) define al CCR como "concreto compactado mediante compactación con rodillo; concreto que, en su estado no endurecido, apoyará un rodillo mientras es compactado." El término "compactación con rodillos" se define también por la ACI como "un proceso para la compactación de concreto

utilizando un rodillo, a menudo un rodillo vibrante". En el mundo se usan distintas nomenclaturas para el Concreto Compactado:

- ✓ R.C.C. (Roller Compacted Concrete) en Estados Unidos
- ✓ R.D.L.C. (Roller Dry Lean Concrete) en Inglaterra
- ✓ R.C.D (Roller Compacted Dam) en Japón
- ✓ B.C.R (Beton Compacte au Rouleau) en Francia
- ✓ H.C.R (Hormigón Compactado con Rodillo) en España

Coloquialmente, todos ellos se conocen por Rollcrete. (Santaella Valencia, 1999)

De esta manera el CCR difiere del concreto convencional principalmente en su consistencia. Para su colocación, la mezcla de concreto debe ser lo suficientemente seca para prevenir el hundimiento de los equipos de rodillo vibratorio, pero lo suficientemente húmeda para permitir la adecuada distribución de mortero conglomerante en el concreto durante el mezclado y la operación de la compactación vibratoria. (Bonilla Rodriguez & García Pinto, 2009)

El CCR es un concreto de asentamiento cero, de consistencia seca y de trabajabilidad tal que se consolida por vibración externa con rodillos vibratorios o equipos vibro-compactadores. Por su naturaleza, este material puede ser diseñado considerando la tecnología de suelos y también la tecnología de concretos. Usando la tecnología de suelos, se considera el material como un suelo estabilizado con un material cementante, se desarrollan curvas densidad - humedad con diferentes grados de compactación y se determina el grado de humedad óptima y la densidad seca máxima. Esta tecnología de compactación del suelo debe estar ligada a los desarrollos de los diseños de concreto, que se basa en la relación A/C.



Figura 1. Compactación de CCR en Pavimentos.
Fuente: (The Concrete Promotional Group, Inc., 2014)

El contenido de cemento es similar al de un concreto convencional vibrado y por lo tanto muy superior al de la base granular estabilizada con cemento. El contenido de

agua es similar al de una base granular estabilizada con cemento y muy inferior al de un concreto convencional vibrado, la relación agua/cemento tiende a límites muy bajos, comprendidos entre 0.30 y 0.40. Su puesta en obra es similar a una base granular estabilizada con cemento, mientras que por su contenido de cemento y las resistencias que con él se consiguen, se asemeja a un concreto convencional vibrado. (Solano Jimenez)

El consumo de cemento puede variar desde 40 hasta 380 Kg/m³, según sea el tipo de aplicación; para bajos consumos de cemento el CCR presenta una apariencia semejante a la de las gravas tratadas con cemento. (Rocha Pitta, 2005)



Figura 2. Aplicación de CCR en Presas.
Fuente: (Ramirez Reynaga, 2012)

El CCR no requiere formaletas, no requiere dovelas o refuerzo, tiene amplia aplicación en represas y en obras viales, como pavimentos urbanos y rurales, aeropuertos, pisos industriales, patios de maniobras, etc. (Rocha Pitta, 2005)



Figura 3. Aplicación de CCR en Pavimentos.
Fuente: (Specify Concrete, 2014)

En cualquiera de sus aplicaciones, la mezcla es tan rígida que el rodillo vibratorio puede comenzar compactar inmediatamente después de su colocación.



Figura 4. Compactación CCR con Rodillo Vibratorio. Presa Zapotillo. Jalisco, México.
Fuente: (Ramirez Reynaga, 2012).

4.2 MATERIALES PARA CCR

Los materiales constituyentes del CCR son los mismos utilizados en el concreto tradicional, es decir, grava, arena, cemento, agua y, cuando es necesario, aditivo.

4.2.1 Materiales Aglutinantes (Cementantes)

La selección de los materiales cementantes afecta significativamente la tasa de hidratación y la ganancia de resistencia.

- **Cemento**

El CCR puede ser hecho de cualquiera de los tipos básicos de Cemento Portland. Para la aplicación en masa, son útiles los cementos que tienen como característica la baja generación de calor comparados con el tipo I. El cemento portland tipo II es el más utilizado, por sus características de baja generación de calor en edades tempranas. El uso de Tipo III no es práctico para la mayoría de aplicaciones de CCR ya que acorta el tiempo disponible para la compactación y aumenta la evolución de calor en edades tempranas.

El tipo y la cantidad de cemento Portland o cemento más puzolana requerido en las mezclas de CCR dependen del volumen de la estructura, las propiedades requeridas por ésta y las condiciones de exposición. (US Army Corps of Engineers, 2006)

- **Puzolanas**

Una de las principales funciones de la puzolana o cualquier otro material fino apropiado es la de ocupar espacio que de otra forma sería ocupado por el cemento o

el agua. Ocupar este espacio con agua produce una reducción de la resistencia del concreto y ocuparlo con cemento puro se traduce en problemas derivados del calor de hidratación, además de encarecer la obra. (US Army Corps of Engineers, 2006)

La actividad puzolánica continúa después de varios años, contribuyendo al desarrollo de la resistencia a largo plazo.

4.2.2 Agregados

El agregado ideal para concreto compactado debe consistir en un cierto tipo de materiales triturados que cumplan con las siguientes características generales:

- Que resista lo suficiente como para no triturarse bajo la acción de la compactación de rodillos vibratorios.
- Que no superen un máximo de contenido de arcilla que daría como resultado un concreto poco resistente.
- Como agregado fino debería emplearse arenas naturales con una granulometría continua.
- Debe limitarse el tamaño máximo del agregado grueso. El uso de agregado más grande aumenta en gran medida la probabilidad de segregación durante el transporte de CCR.

- **Calidad**

La calidad requerida de los agregados depende de las propiedades deseadas del CCR, principalmente su resistencia y durabilidad.

- **Granulometría**

Cuanto mayor sea el tamaño del agregado utilizado en la mezcla de CCR, es más probable que se produzcan problemas relacionados con la segregación durante el transporte, colocación y compactación. El uso de las cenizas volantes, puzolana natural, o escoria molida da como resultado una reducción de la demanda total de agua, menor contenido de cemento, y resistencias más altas. De acuerdo a (US Army Corps of Engineers, 2006), los límites mostrados en la tabla 1. Corresponden a la granulometría ideal de agregados gruesos. Igualmente, la tabla 2. Define la granulometría ideal de agregado fino para CCR.

Tabla 1. Gradación ideal de agregados

Sieve Size	Cumulative Percent Passing		
	4.75 to 75 mm (No. 4 to 3 in.)	4.75 to 50 mm (No. 4 to 2 in.)	4.75 to 19.0 mm (No. 4 to 3/4 in.)
75 mm (3 in.)	100		
63 mm (2-1/2 in.)	88		
50 mm (2 in.)	76	100	
37.5 mm (1-1/2 in.)	61	81	
25.0 mm (1 in.)	44	58	
19.0 mm (3/4 in.)	33	44	100
12.5 mm (1/2 in.)	21	28	63
9.5 mm (3/8 in.)	14	18	41
4.75 mm (No. 4)	--	--	--

Fuente: (US Army Corps of Engineers, 2006)

El contenido de partículas finas que se requieren es típicamente más alto que la del concreto convencional. Los finos deben ser no plásticos o tener un bajo índice de plasticidad ($IP < 5$). El mayor porcentaje de finos se utiliza para crear una matriz compactada densamente (y últimamente mayor resistencia) y proveer la cantidad óptima de pasta para mejorar la trabajabilidad.

Tabla 2. Limites Gradación de agregado fino

Sieve Size	Cumulative Percent Passing
9.5 mm (3/8 in.)	100
4.75 mm (No. 4)	95-100
2.36 mm (No. 8)	75-95
1.18 mm (No. 16)	55-80
600 μm (No. 30)	35-60
300 μm (No. 50)	24-40
150 μm (No. 100)	12-28
75 μm (No. 200)	6-18
Fineness modulus	2.10-2.75

Fuente: (US Army Corps of Engineers, 2006)

La tabla 3. Muestra los rangos de valores de demanda de agua en kg/m^3 , de acuerdo a la consistencia Vebe y al Tamaño Máximo Nominal del agregado. Además se muestra el contenido de arena respecto al volumen total del agregado según sea triturado o rodado. Determina también el contenido de mortero en relación al volumen total del agregado, el contenido de pasta y la cantidad de aire atrapado en la mezcla deseada.

En pavimentos, generalmente se usan mezclas densas, bien gradadas, con un agregado de tamaño máximo nominal igual o inferior de $\frac{3}{4}$ de pulgada (19 mm) con el fin de ayudar a minimizar la segregación y producir una superficie con acabado liso.

Tabla 3. Contenido de agua, arena, mortero y aire atrapado para varios agregados, Tamaño nominal. Valores típicos para uso en la estimación de Proporciones en un ensayo de mezcla de CCR.

Contents	Nominal Maximum Size of Aggregate ^a					
	19.0 mm		50 mm		75 mm	
	Average	Range	Average	Range	Average	Range
Water content ^b , kg/m ³						
a) Vebe <30 sec	150	133-181	122	107-140	107	85-128
b) Vebe >30 sec	134	110-154	119	104-125	100	97-112
Sand content, % of total aggregate volume						
a) crushed aggregate	55	49-59	43	32-49	34	29-35
b) rounded aggregate	43	38-45	41	35-45	31	27-34
Mortar content, % by volume						
a) crushed aggregate	70	63-73	55	43-67	45	39-50
b) rounded aggregate	55	53-57	51	47-59	43	39-48
Paste: mortar ratio, Vp/Vm, by volume	0.41	0.27-0.55	0.41	0.31-0.56	0.44	0.33-0.59
Entrapped air content on -1 1/2 in. (37.5-mm) fraction, %	1.5	0.1-4.2	1.1	0.2-4.1	1.1	0.5-3.3

^a Quantities for use in estimating water, sand, mortar, and entrapped air content for trial RCC mixture proportioning studies.
^b Lower range of values should be used for natural rounded aggregates and mixtures with low cementitious material or aggregate fines content.

Fuente: (US Army Corps of Engineers, 2006)

4.2.3 Agua

El agua utilizada en mezclas de CCR debe estar libre de cantidad excesivas de álcalis, ácidos o material orgánico que pueden inhibir la ganancia de resistencia. Los CCR son muy sensibles a la variación del contenido de agua, la falta de agua aumenta el riesgo de segregación, dificultando la compactación y el terminado superficial, el exceso produce inestabilidad de la mezcla durante la compactación (acolchonamientos). (Bonilla Rodriguez & García Pinto, 2009)

El porcentaje óptimo de agua dentro de un metro cúbico de CCR varía entre 4 y 7% del peso de los materiales secos, siendo necesarios, en la mayoría de los casos, del orden de 110 a 130 litros/m³ de material, es decir, aproximadamente 70% del agua que normalmente se utiliza en un concreto común (más o menos 190 litros/m³).

4.2.4 Aditivos

Los aditivos reductores de agua y los retardadores de fraguado son los más usados. Los aditivos incorporadores de aire no son comúnmente usados debido a la dificultad de generar burbujas de aire del tamaño y distribución apropiados cuando la mezcla tiene una consistencia de asentamiento cero. (US Army Corps of Engineers, 2006)

4.3 VENTAJAS DEL CCR

El CCR fue desarrollado inicialmente para producir un material que presenta las propiedades estructurales de concreto con las características de colocación de materiales de terraplén. Las ventajas de este concreto son:

- Técnicas rápidas de construcción. El proceso de construcción de CCR implica una colocación casi continua de material.
- El CCR se produce y coloca utilizando equipos comunes y de amplia existencia dentro de las empresas constructoras.
- Los pavimentos de CCR son una tecnología que envuelve el uso de materiales y equipos de construcción convencionales en una aplicación no convencional, el resultado es una economía de tiempo en la construcción del pavimento, lo que influye significativamente en los costos de éste.
- El CCR puede ser fabricado en plantas de concreto tradicional o en plantas de suelo-cemento o grava-cemento, sus características mecánicas son semejantes al concreto usado en pavimentos de concreto.
- En el caso de obras menores sometidas a tráficos livianos, el CCR puede ser colocado con la maquinaria tradicional utilizada en movimiento de tierras, (motoniveladora, rodillo vibratorio y rodillo neumático).
- En el caso de obras mayores, donde el tráfico sea medio y se requiera una buena terminación superficial, el equipo utilizado puede ser el comúnmente usado en obras de pavimentación asfáltica (finisher, rodillo vibratorio y rodillo neumático).
- Alta capacidad de soporte inicial, lo que le permite al pavimento ser liberado al tráfico después de su terminación.
- Se cura con agua, emulsión asfáltica o compuesto de curado.
- Alto volumen de producción, alta resistencia y durabilidad, alta capacidad de carga y deformación mínima de la superficie.



Figura 5. Descargue de CCR de camión de volteo

Fuente: (Praire, 2014)

Todas las características mencionadas anteriormente hacen al CCR tornarse un interesante material de construcción para pavimentos. (Solano Jimenez).

4.4 DESVENTAJAS DEL CCR

En relación a las posibles desventajas que presenta el CCR, ellas son:

- Requiere un buen control de fabricación y en obra, fundamentalmente de la humedad, terminación superficial y resistencias.
- Con los equipos comúnmente utilizados en movimientos de tierra, un acabado superficial exigente del CCR es difícil de ejecutar para que cumpla las exigencias de las carreteras de importancia.
- Cuando la terminación de un pavimento, que trabajará como revestimiento, no es adecuada y/o el curado es deficiente, el CCR sufrirá un desgaste superficial acelerado.
- Al requerirse un alto grado de compactación para alcanzar las resistencias del proyecto, si no se dispone de equipos adecuados, se deberán efectuar una gran cantidad de pasadas con rodillo vibrador.
- CCR no tiene el mismo aspecto que otros tipos de concreto. No es tan estético y suave como el concreto convencional.
- Estructura interna vulnerable ante la acción de los ciclos de hielo–deshielo en el caso de concreto saturado.
- Sensibilidad a las variaciones de humedad en el mezclado y extendido del material así como a los defectos de compactación se traducen en una considerable disminución de las resistencias.
- Dificultad de conseguir una buena regularidad superficial extendiendo con motoniveladora.
- Necesidad de colocación de una capa de rodadura asfáltica para tráficos importantes. (Bonilla Rodriguez & García Pinto, 2009)

4.5 USOS Y APLICACIONES

La aplicación de CCR se debe considerar cuando es económicamente competitivo con otros métodos de construcción. Este concreto se utiliza principalmente para:

- Represas hidroeléctricas.
- Pavimentos
- Diques de gravedad.

- Contrapisos.
- Losas Industriales donde se requiera soportar las cargas a la flexión.
- Bacheos.



Figura 6. Aplicación de CCR en presas.
Fuente: (Orellana & Carrillo Vasquez, 2003).

4.6 PROPIEDADES FISICAS DEL CCR

Los materiales como el concreto son caracterizados con base en sus propiedades físicas para propósitos de control de calidad. Varias pruebas de laboratorio son utilizadas para caracterizar la mezcla de concreto y predecir las propiedades del concreto terminado. Las diferencias entre las propiedades del CCR endurecido y el concreto convencional obedecen básicamente a las diferencias en las proporciones de la mezcla, la granulometría y el contenido de vacíos. (Palomares Carmona, 1998)

4.6.1 Resistencia Mecánica

La resistencia mecánica del concreto totalmente consolidado depende principalmente por la relación agua/cementante.

- **Resistencia a la compresión**

La resistencia a la compresión es el parámetro que define la capacidad de un concreto endurecido para soportar cargas y permite prever el comportamiento de la estructura bajo condiciones de carga establecidas. La resistencia a la compresión se ve afectada principalmente por la relación agua-cementante, calidad de los agregados y el grado de compactación alcanzado.

En la determinación de la resistencia a la compresión, los cilindros son del mismo tamaño que los cilindros convencionales de concreto: 6 pulgadas de diámetro por 12

pulgadas de altura. También se puede realizar mediante la extracción de núcleos. En la aproximación a suelos, hay dos métodos comunes para preparar cilindros de CCR.

- Usando el martillo y energía de compactación del Proctor Modificado.
- Usando un martillo vibrador Hilti o un apisonador de polo neumático.

- **Resistencia a la flexión**

La Resistencia a la flexión o módulo de rotura, es una medida de la resistencia a la tracción.

- **Resistencia a la tracción**

La resistencia a la tracción del CCR depende del contenido de cemento, de la calidad de los agregados, de la adherencia pasta-agregado y el grado de compactación de la mezcla.

Resistencia a la tracción directa: Son difíciles de realizar y producen resultados muy variables.

Resistencia a tracción indirecta: Son más fáciles de realizar, pueden ser menos sensibles a la desecación y presencia de microfisuras. (US Army Corps of Engineers, 2006)

4.6.2 Propiedades elásticas

Los principales factores que afectan a las propiedades elásticas del concreto son la edad, el tipo de agregado y la relación agua/cementante o calidad de la pasta. El modulo elástico del concreto aumenta con la edad y con el contenido de cemento. La discontinuidad de la pasta, por ser su volumen insuficiente, provocara la aparición de un volumen de vacios elevado, lo cual afectara negativamente al modulo elástico.

- **Cambio volumétrico**

- a) **La retracción por secado:** El cambio de volumen potencial debido a la perdida de humedad o retraccion de secado, es significativamente mas bajo en el concreto compactado con rodillo debido a su menor contenido en agua de amasado frente al de un concreto convencional. El principal efecto de la desecación superficial es la microfisuración de la pasta alrededor de las particulas del agregado.

b) Cambio de volumen autógeno: Comúnmente llamado "contracción autógena", es una disminución del volumen del concreto debido a la hidratación del cemento. Principalmente está relacionada con las propiedades de los materiales y proporciones en la mezcla y, especialmente, el tipo de agregado. La Retracción autógena se produce durante un tiempo mucho más largo que la contracción por secado. (US Army Corps of Engineers, 2006)

- **Consistencia**

El concreto adecuado para compactación por rodillo difiere notablemente en apariencia del concreto normal de asentamiento medible con los procedimientos habituales. El esfuerzo vibrante requerido es mucho mayor que el necesario para vibrar concreto convencional.

- **Tiempo de puesta en obra (Factor de Madurez)**

Se entiende por tiempo de puesta en obra de un concreto compactado, su facultad de conservar durante un periodo de tiempo su aptitud para la compactación. A medida que se desarrolla el fraguado del material, el concreto compactado pierde progresivamente su trabajabilidad. El agua libre se combina con la pasta, perdiendo su papel de lubricante; mientras que los enlaces pasta-agregado que empiezan a desarrollarse rigidizan de forma paulatina el material.

- **Fluencia y capacidad de deformación**

La magnitud de la fluencia es directamente proporcional al volumen de pasta, contenido en una unidad de volumen de concreto. Las mezclas con huecos en la matriz debidos a inadecuados volúmenes de pasta presentaran discontinuidades de la misma que pueden contribuir a un incremento de la fluencia bajo carga. La capacidad de deformacion del concreto compactado con rodillo no debiera, por tanto, diferir de la del concreto convencional del mismo contenido en material cementicio. Sin embargo en muchos casos debe esperarse que sea mayor porque usualmente se confecciona con cementos de elevado contenido de puzolana natural o artificial.

4.6.3 Otras

- **Permeabilidad**

La permeabilidad de una masa de concreto depende en gran medida del aire atrapado en el sistema de vacios. Como la cantidad de pasta es suficiente para

minimizar el sistema de vacíos, y el grado de compactación, consolida completamente la masa, el concreto compactado con rodillo es tanto o más impermeable que el concreto convencional.

El CCR con baja permeabilidad tiene generalmente una baja relación agua-cementante, se ha mezclado y consolidado de manera adecuada, con mortero adecuado y suficiente para llenar todos los vacíos y concreto que se ha curado adecuadamente para permitir la hidratación continua del cemento. Los valores de ensayo para CCR bien compactados están típicamente comprendidos entre 1,5 y 150×10^{-8} mm/s. (US Army Corps of Engineers, 2006)

- **Densidad**

La densidad del CCR depende principalmente de la dosificación utilizada y del grado de compactación. Los valores típicos se encuentran entre 2240 y 2560 kg/m³.

- **Durabilidad**

Se entiende por durabilidad de un concreto hidráulico a la capacidad de resistir a lo largo del tiempo los efectos del medio ambiente y los agentes que tienden a destruirlo. Los factores que determinan la durabilidad del concreto son: la calidad del concreto, que a su vez depende de la calidad de los materiales componentes, la dosificación utilizada en la confección y el proceso de fabricación del mismo. El otro factor lo constituye la naturaleza del medio ambiente que rodea al concreto en particular los agentes y procesos que tienden a destruirlo. La durabilidad del concreto se estima por su resistencia a la meteorización por ciclos hielo-deshielo, el ataque químico y la erosión o desgaste. En el caso de la meteorización (hielo-deshielo), influye la resistencia a la misma del agregado y el contenido de aire incluido en el concreto. Este último resulta bajo en el concreto compactado, por lo que será necesaria una adecuada elección de los agregados para garantizar su durabilidad en lo que a meteorización se refiere. (US Army Corps of Engineers, 2006)

Estudios realizados con concretos compactados con rodillos muestran que la resistencia a la erosión se mejora con el empleo de tamaños de agregado más pequeños y texturas superficiales suaves.

4.6.4 Valores típicos de propiedades físicas:

- Resistencia a la compresión: de 210 a 400 Kg/cm².
- Resistencia a la flexión: de 35 a 70 Kg/cm².
- Módulo de elasticidad: de 210.000 a 386.000 Kg/cm².

4.7 ENSAYOS REALIZADOS AL CCR

En estado fresco, es conveniente la realización de pruebas de temperatura, consistencia, densidad, y contenido de aire. Para evaluar las propiedades del CCR en estado endurecido, se deben preparar muestras para las pruebas de resistencia a la compresión a diversas edades. Estas muestras también se pueden utilizar para la determinación de la permeabilidad, el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson a edades seleccionadas. Muestras adicionales se fabrican para determinar la resistencia a la tracción directa y tracción indirecta a diferentes edades. (US Army Corps of Engineers, 2006)

4.8 METODOS DE DISEÑO

La selección adecuada de las proporciones de materiales es un paso importante en la obtención de un concreto durable y económico. Las proporciones de mezcla dependen en gran medida de los requisitos de resistencia y durabilidad. No obstante, las proporciones de CCR también pueden verse influidas por las necesidades específicas del proyecto, como disponibilidad de materiales, acarreo y los métodos de transporte, colocación y equipos de compactación, etc.

El objetivo del diseño de mezcla es producir un CCR que tiene suficiente volumen de pasta para recubrir los agregados y rellenar los vacíos entre ellos.



Figura 7. Aplicación de CCR en construcción de presas.

Fuente: (Solano Jimenez)

- **Dosificación de mezcla de CCR**

En el desarrollo de la tecnología del CCR, han surgido dos filosofías con respecto a los métodos de diseño de mezclas. Ellas pueden ser calificadas como la filosofía de

suelos o geotecnia y la filosofía de concreto. Las aproximaciones de dosificación de mezclas se diferencian significativamente dependiendo de la filosofía del tratamiento del agregado, ya sea como agregado de concreto convencional o como agregado utilizado en el vaciado de terraplenes estabilizados. Las mezclas de CCR producidas usando métodos de diseño de concreto tienen una consistencia más fluida que las mezclas con aproximación a suelos debido a que hay más pasta en la mezcla que agregados. (Escalaya Advíncula & Alva Hurtado, 2010)

4.8.1 Método I: Filosofía de suelos

- **Dosificación por ensayos de compactación por impacto**

La filosofía de suelos considera al CCR como un suelo procesado o agregado enriquecido con cemento, cuyo diseño de mezcla está basado en la relación humedad-densidad. Para un agregado específico y un contenido de material cementante, el objetivo es determinar un contenido óptimo de humedad para un esfuerzo de compactación de laboratorio que corresponde al esfuerzo o densidad aplicable por los rodillos en el campo. Este método está basado en la pérdida de resistencia en una mezcla para CCR que puede ocurrir por un contenido de humedad arriba o abajo del valor óptimo, debido a la variación en la relación agua-cemento. El objetivo del método es establecer el valor del contenido óptimo de agua y de la densidad máxima para la mezcla de CCR. Una vez determinado el contenido óptimo de humedad, se realizan variaciones en las proporciones de cemento, hasta seleccionar el contenido de cemento con el cual se alcance la resistencia requerida.

Los principios de compactación desarrollados por Próctor en los inicios de 1930, son aplicados a las proporciones de mezclas de CCR con aproximación a suelos. Próctor determinó que para un esfuerzo de compactación dado existe un “óptimo contenido de humedad” que produce una máxima densidad seca. Incrementando el esfuerzo de compactación resulta una mayor máxima densidad seca y un menor óptimo contenido de humedad. Este método no utiliza el concepto convencional de minimizar la relación de agua-cemento para maximizar la resistencia del hormigón; la mejor compactación ofrece la mejor resistencia, y se produce en la mezcla más húmeda que apoyará el rodillo vibrante. (Escalaya Advíncula & Alva Hurtado, 2010)

4.8.2 Método II: Filosofía del Concreto

- **Dosificación por ensayos de consistencia**

Este método está basado en el análisis de la trabajabilidad de la mezcla para CCR, de tal manera que esta pueda ser lo suficientemente seca para soportar el peso del equipo de compactación y lo suficientemente húmeda para permitir una adecuada distribución de la pasta en toda la mezcla durante las operaciones de mezclado y compactación. El equipo de laboratorio utilizado para dicho análisis es el Consistómetro Vebe, que es una mesa vibratoria en la que se mide el tiempo requerido de vibración para lograr la consolidación de la misma; este tiempo puede estar alrededor de los 20 segundos. Para la filosofía del concreto se considera que la mezcla de CCR es un verdadero concreto cuya resistencia y otras propiedades siguen la relación agua-cemento establecida por Abrams en 1918, donde la resistencia del concreto completamente consolidado es inversamente proporcional a la proporción agua-cemento.



Figura 8. Aplicación de CCR en construcción de presas.

Fuente: (Solano Jimenez)

El enfoque de concreto está basado en el concepto que existe suficiente pasta en la mezcla del CCR que rellena todos los vacíos en el agregado, haciendo que la mezcla se compacte completamente produciéndose un concreto con asentamiento nulo. Sin embargo, la mezcla del CCR no debe contener un exceso de pasta que sea llevado a la superficie con sólo unas pocas pasadas del rodillo vibratorio. (Escalaya Advíncula & Alva Hurtado, 2010).

(Ortega Santos, 1988) Presenta curvas de dosificación de acuerdo a la resistencia requerida del concreto. Las figuras 10 y 11 muestran el efecto del tiempo de vibración y del contenido de agua en la densidad del concreto con cenizas volantes y con cemento portland respectivamente.

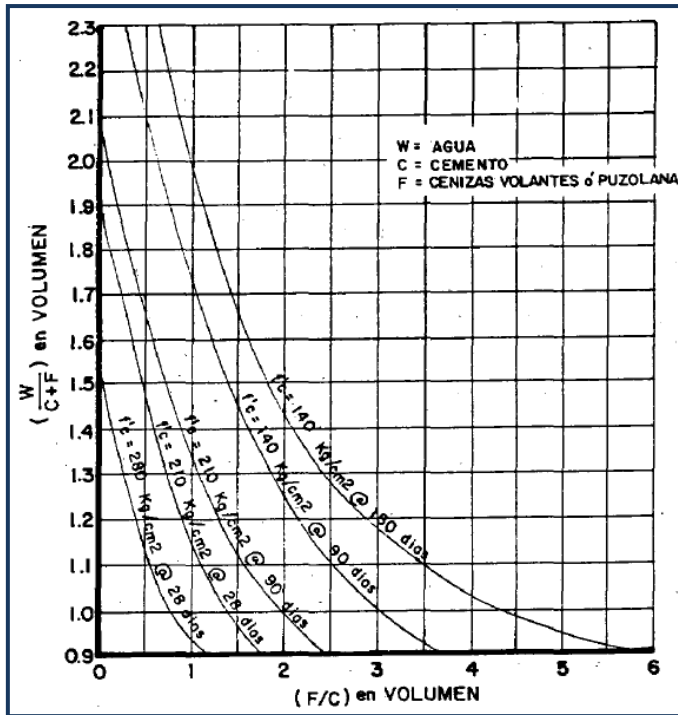


Figura 9. Curvas de Dosificación para igual resistencia del concreto.

Fuente: (Ortega Santos, 1988)

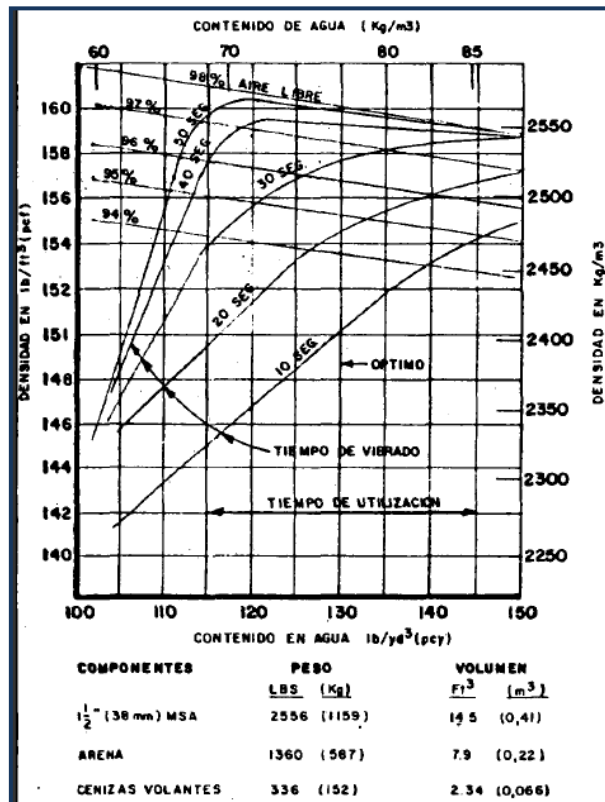


Figura 10. Efecto del tiempo de vibración y del contenido de agua en la densidad del concreto con cenizas volantes.

Fuente: (Ortega Santos, 1988)

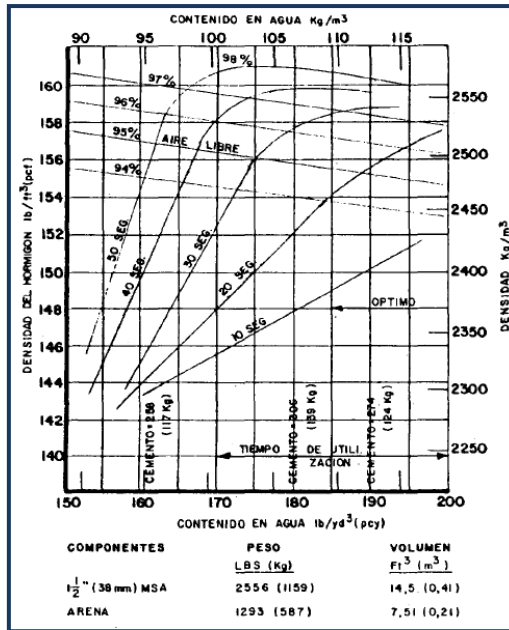


Figura 11. Efecto del tiempo de vibración y del contenido de agua en la densidad del concreto de cemento Portland.

Fuente: (Ortega Santos, 1988)

A pesar de una amplia investigación sobre este tema, no existe todavía ninguna metodología aceptada por unanimidad para simular las condiciones de campo en la preparación de las muestras de laboratorio. (US Army Corps of Engineers, 2006)

4.9 DISEÑO DE MEZCLA

- **Procedimiento para la selección de las proporciones de mezcla de RCC.**

Paso 1: Determinar los requisitos relacionados con las propiedades de la mezcla de RCC, incluyendo: resistencia requerida, tiempo y condiciones de exposición esperada, materiales cementantes, requisitos de mezcla, tamaño máximo, fuente y calidad de agregado.

Paso 2: Determinar las propiedades de los materiales que satisfarán la resistencia, durabilidad y exigencias económicas. Determinar la granulometría, gravedad específica y absorción de los agregados y pesos específicos de los materiales cementantes.

Paso 3: Mediante la Tabla 3, estimar las necesidades de agua y el contenido de aire atrapado para el agregado de tamaño máximo que se utiliza.

Paso 4: Calcular la cantidad de cemento requerido.

Paso 5: Calcular la proporción de agregado grueso necesaria que mejor se aproxima a la clasificación de agregados gruesos ideales que se muestran en la Tabla 1.

Paso 6: Comparar la granulometría fina con el rango de valores que se muestra en la Tabla 2. De la Tabla 3, seleccionar el contenido de agregado fino (arena) para el tamaño máximo y tipo de agregado que se utiliza.

Paso 7: Calcular los volúmenes absolutos y las masas de todos los ingredientes de la mezcla.

Paso 8: Calcular el contenido del mortero y comparar con los valores indicados en la tabla 3. Ajustar el contenido de agregado fino, si se requiere, para aumentar o disminuir el volumen de la mezcla de mortero.

Paso 9: Calcular el volumen de la pasta y la proporción de volumen de pasta de mortero.

Paso 10: Evaluar el asentamiento y resistencia de la mezcla de CCR mediante lotes de prueba. (US Army Corps of Engineers, 2006)

4.10 DESCRIPCIÓN DEL CCR PARA PAVIMENTOS

En su aplicación de pavimentos, el CCR es un concreto de muy baja consistencia que alcanza valores elevados de densidad gracias a la compactación mediante rodillos vibratorios que recibe. Combina características como la tecnología del concreto con el movimiento de tierras en lo que se refiere a transporte, colocación, compactación y control de calidad. Es elaborado con equipos de fabricación continua y transportado en camiones tolva, ya en el terreno se esparce con motoniveladora o extendedora convencional de alta densidad dependiendo del grado de compactación requerido. Se realiza control de calidad evaluando la densidad de campo mediante un densímetro nuclear y comparando ésta con la obtenida en laboratorio. Finalmente, este concreto debe curarse como se hace el curado de un concreto convencional, evitando la evaporación temprana del agua y garantizando la humedad mínima para lograr la resistencia final requerida (Dávila Guamán, Cumbe Viñansaca, & Eguez, 2010).



Figura 12. Extendedora Convencional de alta densidad en compactación de CCR en Pavimentos
Fuente: (Calumet Civil Contractors, Inc., 2014)

Los criterios que han sido considerados para determinar que existe una mejor calidad en la construcción de pavimentos de CCR son:

- Una mezcla de concreto sin segregación.
- Rápida colocación de grandes volúmenes.
- Menor número de horas-hombre.
- No requiere formaleta de ningún tipo.
- Tarda menos tiempo de curado que el concreto convencional.



Figura 13. Construcción de tramo experimental vía de acceso a la fábrica de cementos diamante.
Fuente: (Bonilla Rodriguez & García Pinto, 2009)

4.10.1 Proceso constructivo de pavimentos con CCR

Una vez se produce el CCR en una planta dosificadora, se inicia el proceso constructivo, al descargar la mezcla resultante en camiones de volteo que harán su transporte al sitio del proyecto. En este punto se debe tomar en cuenta que para su traslado el equipo debe de contar con sistemas que protejan la mezcla, ya que esta por ser un material de cero asentamiento es muy susceptible a los cambios de humedad y segregación. Lo normal y frecuente es que se utilicen lonas para cubrir las mezclas para evitar la evaporación. Un aspecto importante a considerar en cuanto al transporte se refiere, es la distancia de acarreo, la cual debe ser estudiada

detenidamente para calcular el número adecuado de camiones de volteo que permitan la colocación en forma continua, para evitar problemas de juntas frías y pérdida de trabajabilidad en la mezcla. La colocación de la mezcla se hace con una extendidora convencional de alta densidad del mismo tipo que las que se usan en la colocación de asfalto. Seguidamente el camión de volteo se aproxima en reversa y se coloca frente a la extendidora de alta densidad. Durante el recorrido la maquina extendidora va compactando la mezcla colocada, a la vez que deja el acabado final de la superficie (figura 14).

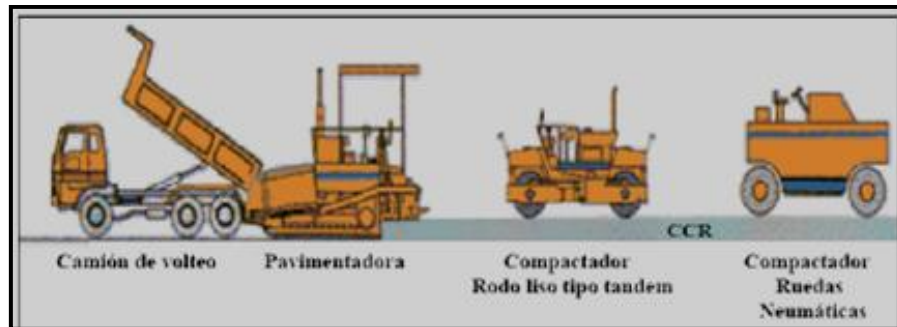


Figura 14. Tren de colocación y compactación CCR.

Fuente: (Bonilla Rodriguez & García Pinto, 2009)

En el caso de haber defectos (baches o montículos) en el acabado, deben ser corregidos de inmediato, escarificando la zona afectada con rastrillos y volviendo a rellenar con mezcla nueva, la cual será compactada con el compactador de rodillo.

Una vez que la superficie se encuentra en perfectas condiciones y que ha transcurrido el suficiente tiempo para que el compactador de rodillo se pueda apoyar sobre el concreto, se debe hacer la compactación de la mezcla, la cual debe hacerse iniciando por los extremos y avanzando hacia el centro, apoyando la mitad del rodillo sobre la sección anterior, además se debe tomar en cuenta que la primera entrada del rodillo debe ser sin vibración, la segunda vez debe vibrarse sólo el rodillo delantero y la tercera debe ser igual que la primera sin vibración (figura 15).



Figura 15. Compactación de CCR mediante Compactador de Rodillo.

Fuente: (Bridgeviews, 2014)

Durante el proceso de construcción es muy importante mantener el control de compactación y humedad, ya que alcanzar las resistencias planteadas depende de estos parámetros. Para lo cual se utiliza un densímetro nuclear como se muestra en la figura 16.



Figura 16. Toma de densidad mediante densímetro Nuclear.
Fuente: (Concrete Construction, 2014)

Una vez terminada la compactación es importante mantener la condición de no desecación superficial para lograr un correcto fraguado del concreto, lo que depende del curado de la mezcla, para evitar que se creen fisuras propias de la retracción.

- **Curado**

Los pavimentos de CCR, como todo concreto, deben ser curados, fundamentalmente para garantizar que ellos alcancen las resistencias mecánicas deseadas y la durabilidad de proyecto, una de sus principales ventajas es que se tarda mucho menos tiempo de curado que el concreto convencional. El curado puede ser realizado por cualquier método que garantice el mantenimiento del agua dentro del material; pueden ser utilizados: agua, diques de arena húmeda, aspilleras, membranas de curado, riegos bituminosos, etc. (Rocha Pitta, 2005).

Por el bajo contenido de agua de la mezcla de CCR, es necesario aplicar el curado de la superficie inmediatamente finalizada su compactación, con el objeto de alcanzar la resistencia requerida. Para ello, es conveniente curar el concreto utilizando agua, la cual debe aplicarse en forma de roció sobre su superficie, normalmente durante un periodo de 7 días. (Bonilla Rodriguez & García Pinto, 2009)

- **Construcción de Juntas**

Inicialmente los pavimentos de CCR eran construidos sin juntas transversales siendo éstas obtenidas naturalmente, con espaciamentos de hasta 20 metros con aparición

de fisuras a menores distancias al ser solicitados los pavimentos; posteriormente, estas juntas fueron inducidas cada 12 a 15 metros. La práctica internacional ha presentado como límite inferior del espaciamiento de este tipo de juntas 3,5 metros. Tramos experimentales en Brasil y Chile, han presentado agrietamientos transversales naturales semejantes a los pavimentos tradicionales, motivo por el cual se recomienda, ante la ausencia de datos locales, ser más conservadores en la elección del espaciamiento de este tipo de juntas, las cuales pueden ser ejecutadas por aserrado del pavimento entre las 48 horas y a los 6 a 7 días después de ejecutado el pavimento. (Rocha Pitta, 2005)



Figura 17. Pavimento en CCR

Fuente: (Calumet Civil Contractors, Inc., 2014)

En relación a las juntas longitudinales, las de construcción en lo posible deben ser evitadas, para lo cual se recurre normalmente al uso de aditivos retardadores de fraguado para aumentar el período de trabajabilidad del CCR. Como material de sellado de las juntas, pueden ser utilizados los sellantes normalmente usados en pavimentos de concreto. (Rocha Pitta, 2005)

5. METODOLOGÍA

La metodología empleada respondió a una investigación de tipo descriptiva. Dentro del estudio se efectuó una revisión bibliográfica de trabajos de grado, artículos, libros y páginas web que describen experiencias internacionales y nacionales referentes a la tecnología del concreto compactado con rodillo y su aplicación en la construcción de pavimentos. De la revisión realizada se extraen los principales aspectos teóricos del desarrollo de esta técnica y las posibilidades del empleo del CCR en la construcción de pavimentos.

6. CONCLUSIONES

- La implementación de la Tecnología del Concreto Compactado con Rodillo (CCR) en pavimentos representa una alternativa viable como técnica constructiva aunque su comportamiento aún está siendo estudiado.
- Respecto a las propiedades del CCR comparadas con las de un concreto convencional, éstas difieren muy poco y obedecen básicamente a las diferencias en las proporciones de la mezcla, la granulometría y el contenido de vacíos. Bajo procedimientos de diseño y construcción adecuados se pueden obtener mayores valores de propiedades elásticas, permeabilidad, densidad, propiedades que contribuyen a la durabilidad de las estructuras.
- Al igual que sus propiedades, las técnicas y procedimientos aplicados en la construcción de pavimentos con CCR como el diseño y construcción de juntas y curado son semejantes a los aplicados en pavimentos construidos con concreto convencional.
- En Colombia, la aplicación más inmediata de esta tecnología ha sido en la construcción de presas, en la construcción de pavimentos sería una buena alternativa para la gestión y administración de la red primaria, secundaria y terciaria de carreteras.
- En el caso de la red terciaria sometida a tráfico livianos, el CCR puede ser colocado con la maquinaria tradicional utilizada en movimiento de tierras como volquetas, motoniveladora, rodillo vibratorio y rodillo neumático.
- En el caso de carreteras secundarias y primarias, donde el tráfico sea considerable y se requiera una buena terminación superficial, el equipo utilizado puede ser el comúnmente usado en obras de pavimentación asfáltica como finisher (compactadoras de alta densidad), rodillos vibratorios y rodillos neumáticos acompañados de un buen control de calidad en la producción del concreto y la construcción del pavimento.
- Finalmente su alta capacidad de soporte inicial que le permite al pavimento ser liberado al tráfico después de su terminación, su alto volumen de producción, alta resistencia y durabilidad, alta capacidad de carga y deformación mínima de la superficie lo convierten en un material bondadoso.

BIBLIOGRAFIA

Dávila Guamán, L., Cumbe Viñansaca, H., & Eguez, H. (2010). Diseño y caracterización de las propiedades mecánicas del hormigón compactado con rodillo (HCR) para la presa San Francisco. Revista Tecnológica ESPOL.

Escalaya Advíncula, M., & Alva Hurtado, J. (2010). Diseño de Mezclas de Concreto Compactado con Rodillo utilizando Conceptos de Compactación de Suelos. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil.

Martínez, B. (2010). Tecnología y Conceptos en Concreto Compactado con Rodillo. IBRACOM - CEMEX.

Molina Salinas, J. E. (2002). Adición de Ceniza de Cascarilla de Arroz en Hormigón Compactado con Rodillo. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Orellana, V., & Carrillo Vásquez, C. A. (2003). Algunas consideraciones sobre aspectos relacionados con el Concreto Compactado con Rodillo (CCR) empleado en la construcción de pavimentos. San Salvador: Viceministerio de Obras Públicas - Unidad de Investigación y Desarrollo Vial.

Ortega Santos, F. (1988). Hormigón Compactado con Rodillo.

Palomares Carmona, E. M. (1998). Características Técnicas del Concreto Compactado con Rodillo (CCR). Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.

Ramírez Reynaga, M. (2012). Presas de Gravedad de Concreto Compactado con Rodillo (CCR): Características y sus Retos. Foro Internacional del Concreto.

Rivera Torres, F. A. (2001). Capacidad de Adherencia entre Capas de CCR en Presas. Bogotá D.C: Universidad de los Andes.

Rocha Pitta, M. (2005). Estado del Arte de los Pavimentos de Concreto. ASOCEM Asociación de Productores de Cemento.

Solano Jiménez, J. (s.f.). Desarrollo del concreto compactado con rodillo (CCR) en la construcción de pavimentos de concreto en Costa Rica. Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto ICCYC.

Valle Gómez, J. P., & Egeuz, H. (2009). Diseño de la dosificación para Hormigón Compactado con Rodillo y de una Base de Agregados Estabilizadas con Cemento para su uso en las Vías de Manabí. *Revista Tecnológica ESPOL*.

Bonilla Rodriguez, L. C., & García Pinto, A. S. (2009). *Pavimentos en Concreto Compactado con Rodillo en Minas a Cielo Abierto*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Páginas web:

Bridgeviews. (09 de 02 de 2014). Recuperado el 09 de 02 de 2014, de Bridgeviews: http://www.bridgeviews.net/2011_09_01_archive.html

Calumet Civil Contractors, Inc. (12 de 02 de 2014). Recuperado el 12 de 02 de 2014, de Calumet Civil

Contractors, Inc.: http://www.calumetcivil.com/services/services_roller_old.html

Concrete Construction. (08 de 02 de 2014). Recuperado el 08 de 02 de 2014, de Concrete Construction: <http://www.concreteconstruction.net/roller-compacted-concrete/advice-for-planning-a-roller-compacted-concrete-test-strip.aspx>

Prairie. (12 de 01 de 2014). Recuperado el 12 de 01 de 2014, de Prairie: <http://www.prairie.com/contractors/pvparking.asp>

Santaella Valencia, L. E. (1999). Comentarios sobre el Concreto Compactado con Rodillo (CCR). *Revista de la Facultad de Ingeniería UMNG* .

Specify Concrete. (22 de 01 de 2014). Recuperado el 22 de 01 de 2014, de Specify Concrete: <http://www.specifyconcrete.org/project-profiles/view/liberty-property-trust-warehouse-parking-lot>

The Concrete Promotional Group, Inc. (2014). Recuperado el 2014, de The Concrete Promotional Group, Inc.: <http://archive.constantcontact.com/fs020/1106162827952/archive/1110247972564.html>

US Army Corps of Engineers. (2006). *Roller-Compacted Concrete*. US Army Corps of Engineers.