

2 63  
eje.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

CONCRETO COMPACTADO RODILLADO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A:

ALICIA HERNANDEZ HERNANDEZ



MEXICO, D.F.

1994

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México

UNAM



## **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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-1-34

Señorita:  
ALICIA HERNANDEZ HERNANDEZ.  
Presente.

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Oscar E. Martínez Jurado, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"CONCRETO COMPACTADO RODILLADO"**

- I.- INTRODUCCION
- II.- GENERALIDADES
- III.- CRITERIOS QUE SE DEBEN CONSIDERAR PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO RODILLADO
- IV.- PROCEDIMIENTO DE COMPACTACION DEL CONCRETO COMPACTADO RODILLADO
- V.- SELECCION DEL EQUIPO DE COMPACTACION Y CALCULO DEL COSTO DE COMPACTACION POR M<sup>3</sup> DE CONCRETO COMPACTADO RODILLADO
- VI.- USOS DE CONCRETO COMPACTADO RODILLADO
- VII.- CONCLUSIONES

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

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

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria, a 08 de abril de 1992.  
EL DIRECTOR.

  
ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/CRRC\*rmfa

*Es que no existen palabras suficientes para agradecer a todas y cada una de las personas que directa o indirectamente contribuyeron para que este trabajo fuera posible, pero antes que nada quisiera agradecer a dios por haberme permitido llegar hasta este momento.*

*A mis Padres :*

*Antonia Hernández Pacheco*

*Pedro Hernández Sánchez*

*Gracias por todo su amor apoyo y confianza incondicional  
que siempre me han brindado.*

*Además por haberme dado siempre libertad para tomar mis  
propias decisiones, creo que no los defrauda.*

*Gracias, los quiero mucho.*

*A Mis Hermanos :*

*Pedro*

*Noel*

*Francisco Javier*

*Gracias por todo lo que hemos compartido juntos.*

*A mi Esposa :*

*Ing. José Luis Lira Casimiro*

*Con estas líneas quisiera agradecerte todo los momentos que  
hemos pasado juntos, en los cuales siempre he recibido todo tu apoyo  
y amor.*

*Gracias, también por haberme dado el tesoro más grande que  
llega.*

*Tu Ama*

*A Mi Hijo :*

*Luis Alberto*

*Por ser lo más grande que llega.*

*Espero que este trabajo sirva como un estímulo para ti.*

*Tu Quiera.*

*A Toda Mi Familia*

*Gracias por todo lo que he  
recibido siempre de ustedes.*

*A Todas Mis Compañeras :*

*A Mis Amigos :*

*Luis Martín Pérez Guillo*

*Javier Robles Aranda*

*Donnis Cortes Matus*

*Tomás Jiménez Zapata*

*Victor M. Garay González*

*Francisco J. Becerra Martínez*

*Martha E. López Martínez*

*Aljandra Baya Saldivar*

*Fusa Chavarria Paredes*

*Martha Camargo González*

*Por que he recibido de ustedes lo más valioso  
que hay en la vida, su amistad.*

*Gracias por que siempre cuento con ustedes.*



*A mi Alma Mater*

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO**

**A LA FACULTAD DE INGENIERIA**

*A todos los profesores que  
llevan la carga más difícil.*

*Mi agradecimiento Muy especial a*

*Ing. Alejandro Ponce Soriano*

Jefe del Departamento de Construcción  
División de Ingeniería Civil TOG. y GEO.  
Facultad de Ingeniería  
UNAM.

*Por su confianza y amistad*

*Mi Eterno Agradecimiento a*

*Mi Director de Tesis*

*Ing. Oscar E. Martínez Jurado*

**Jefe del Departamento de Sistemas  
División de Ingeniería Civil TOG. y GEO.  
Facultad de Ingeniería  
UNAM.**

*Por haberme tenido la suficiente  
paciencia durante la ejecución de este trabajo.*

## INDICE

	Pag.
<b>CAPITULO I</b>	
INTRODUCCION.	1
<b>CAPITULO II</b>	
GENERALIDADES.	4
II.1. - CONCRETO COMPACTADO RODILLADO (CCR)	8
II.2. - COMPACTACION	14
<b>CAPITULO III</b>	
CRITERIOS QUE SE DEBEN CONSIDERAR PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO RODILLADO.	41
III.1. - MATERIALES	41
III.2. - CRITERIOS QUE SE DEBEN CONSIDERAR PARA EL DISEÑO DE LAS MEZCLAS	50
III.3. - MEZCLADO	63
III.4. - TRANSPORTE	66
III.5. - COLOCACION	70
<b>CAPITULO IV</b>	
PROCEDIMIENTO DE COMPACTACION DEL CONCRETO COMPACTADO RODILLADO (CCR)	74
IV.1. - PROCEDIMIENTO DE COMPACTACION	75
IV.2. - TIEMPO DE COMPACTACION	79
IV.3. - HUMEDAD OPTIMA	81
IV.4. - PRESION DE PORO	86
IV.5. - RELACION AGUA CEMENTO	87
IV.6. - ESPESOR DE LAS CAPAS	90
IV.7. - PRUEBAS PARA DETERMINAR EL PESO VOLUMETRICO	95
IV.8. - CONTROL DE CALIDAD	97
<b>CAPITULO V</b>	
SELECCION DEL EQUIPO DE COMPACTACION Y CALCULO DEL COSTO DE COMPACTACION POR M <sup>3</sup> DE CCR.	117
V.1. - COMPACTADORES	117
V.2. - EQUIPO DE COMPACTACION APLICABLE AL CCR	120
V.3. - FACTORES A CONSIDERAR PARA UNA COMPACTACION ECONOMICA	125
V.4. - CALCULO DEL COSTO DE COMPACTACION POR M <sup>3</sup> DE CCR	133
V.5. - SELECCION DEL EQUIPO DE COMPACTACION PARA CCR	139

**CAPITULO VI**

**USOS DEL CONCRETO COMPACTADO RODILLADO** 142

VI.1. - USO DEL CONCRETO COMPACTADO RODILLADO  
EN PRESAS 142

VI.2. - USO DEL CONCRETO COMPACTADO RODILLADO  
EN PAVIMENTOS 160

VI.3. - OTROS USOS 170

**CAPITULO VII**

**CONCLUSIONES.** 173

**BIBLIOGRAFIA** 178

**CAPITULO I**  
**INTRODUCCION**

## I.- INTRODUCCION

El estudio del concreto compactado rodillado (CCR) 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 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 la tierra estabilizada con cemento, es tratado como tal, no ha sido analizado en todo su potencial económico, no solamente en la construcción de presas sino también en la construcción de pavimentos.

El uso del concreto compactado rodillado y las técnicas de su colocación permiten una reducción significativa de costos, debido en primer lugar, al bajo contenido de cemento sin afectarse con ello su resistencia. Además es un concreto con revenimiento nulo, lo que permite que se pueda transportar y colocar en grandes cantidades con un mínimo de tiempo y mano de obra, utilizándose equipo de movimiento de tierras (camiones para el transporte, tractores o pavimentadoras para extenderlo y rodillos vibratorios para compactarlo).

Resulta obvio que una adecuada compactación, desde la selección del equipo hasta su correcta aplicación, es

indispensable para un comportamiento adecuado en cuanto a resistencia y durabilidad.

Por lo tanto el presente trabajo tiene como finalidad describir al Concreto Compactado Rodillado (CCR) y los métodos de compactación que se utilizan en su colocación, estableciendo su procedimiento de fabricación y haciendo hincapié en el equipo y los parámetros para seleccionarlo.

Para ello el capítulo II se refiere a generalidades del Concreto Compactado Rodillado y de Compactación en el que se describen los principios y fundamentos de este proceso así como los procedimientos utilizados en la actualidad.

El capítulo III se refiere a los criterios que se deben considerar para el diseño de mezclas de concreto compactado rodillado, abarcando desde los materiales y analizando tres criterios para el diseño de las mezclas de CCR, además del mezclado, transporte y colocación de la misma.

En el capítulo IV se analiza el procedimiento de compactación del CCR, así como las características que debe presentar la mezcla para su perfecta colocación y compactación para poder cumplir con el control de calidad, del cual también se hace mención en este capítulo.

En el capítulo V se incluyen los equipos de compactación existentes en el mercado actual que son aplicables al CCR, así como los parámetros para la selección del equipo a utilizar en una obra determinada y en el siguiente capítulo se hace mención de las obras donde se ha utilizado el CCR y de las posibles



aplicaciones del mismo.

Finalmente se presentan las conclusiones generadas durante la realización del presente trabajo, así como la bibliografía que sirvió de consulta y apoyo.

**CAPITULO II**  
**GENERALIDADES**

## II. - GENERALIDADES

Las presas de concreto tienen ciertas ventajas inherentes sobre las de tierra, por lo que, desde 1960, se han llevado a cabo en todo el mundo gran cantidad de trabajos que estudian el desarrollo de un nuevo método de construcción para presas de concreto con los eficientes métodos de construcción de planta intensiva de las presas construidas a base de tierra.

Aunque se han hecho muchas sugerencias, los únicos cambios reales en el método de construcción, han sido la aplicación del colado horizontal que se introdujo en la presa Alpe Gera. en Italia entre los años 1961 y 1964; y en 1965, la Hydro-Quebec construyó una presa prototipo ( Manicouagan ), mediante el procedimiento de colado horizontal. A principios de la década de los setenta se combinó el concepto de colado horizontal con el de concreto pobre compactado con rodillo.

Debido a la búsqueda de nuevas alternativas en la construcción de presas de concreto, se presentó una conferencia sobre "Construcción Rápida de Presas de Concreto" en Asilomar, California en el año de 1970; donde el profesor Jerome Raphael presentó un trabajo titulado "La Presa Optima de Gravedad" en el cual proponía emplear el material de "excavaciones" estabilizado con gran cantidad de cemento y colocado con equipo de movimiento y compactación de tierras; manejo el concepto de suelo-cemento.

En la segunda conferencia titulada "Construcción Económica de Presas de Concreto", Robert W. Cannon presentó un documento

titulado "Construcción de Presas de Concreto Utilizando Métodos de Compactación de Suelos". Y en 1972 presentó otro documento titulado "Compactación de Concreto Masivo con Rodillos Vibratorios".

A partir de la primera sugerencia de que un concreto pobre compactado con rodillos podía emplearse en una presa, se llevó a cabo la primera prueba a escala natural en Estados Unidos, en 1971, en la presa Timsford, a cargo de la Tennessee Valley Authority (TVA).

Posteriormente, la serie de pruebas a escala natural, que también incluyó una pequeña investigación de laboratorio, se efectuó en la Waterways Experiment Station, en Vicksburg, Mississippi, por el cuerpo de Ingenieros durante 1972-73. A continuación, se llevó a cabo para este estudio una extensa serie de pruebas a escala natural en la ubicación de la Presa Loast Creek, por la División Pacífico Norte del cuerpo de Ingenieros en Mayo de 1973. Esta serie de pruebas generó la mayor parte de los trabajos sobre concreto compactado rodillado.

En 1974, el Ministerio Japonés de Construcción inició un programa de investigación, cuyo objetivo era reducir el costo de las presas de concreto. Este estudio de Gabinete concluyó que el método de construcción de la presa Alpe Gera, combinado con el concreto pobre compactado con rodillos probado en la presa Loast Creek, en Oregón, era la pauta a seguir, por ser la más redituable.

En 1976 se utilizó como prueba a escala natural el borde provisional aguas arriba de la presa Okawa, en Japón. En este mismo año, se coló concreto compactado rodillado en la cimentación del área de un transformador/generadores en la Tamar Treatment Works, en Cornwall, Gran Bretaña. Durante este periodo, la TVA llevaba a cabo una prueba a escala natural en Singleton Laboratories, antes de proceder al colado de 6780 m<sup>3</sup> de concreto compactado rodillado, en la cimentación de un edificio para turbinas en la Bellefonte Power Station, en Alabama. Se probaron diversas mezclas hasta con un 80 % de ceniza volante en el contenido de material cementante.

En 1977, el cuerpo de Ingenieros de la Waterways Experiment Station llevó a cabo una prueba a escala natural del método de cimbrado para paramento de presas, empleando unidades horizontales de cimbra deslizante. El paramento se coló empleando concreto convencional compactado con vibradores de inmersión entre las cimbras, pero la forma de las unidades se investigó, efectuándose compactación con rodillos contra las unidades a edad temprana. En 1978 el cuerpo de Ingenieros utilizó 7 500 m<sup>3</sup> de concreto compactado rodillado en una plantilla de la obra de toma del proyecto del Río Chena, en Alaska. Y en 1982 se terminó de construir la presa de Willow Creek, en Heppner, Oregón con 52 m de altura y un volumen de 331 000 m<sup>3</sup>, siendo la primera estructura en el mundo diseñada y construida específicamente con concreto compactado rodillado. Otras presas importantes que se han construido en los Estados Unidos a partir de ese año son :

Winchester, MiddleFork, Gallesville, Monksville y Upper, Stillwater, entre otras.

En Brasil, el concreto compactado rodillado se utilizó por primera vez en 1976 en la pavimentación de unos almacenes construidos para la presa de Itaipú. Al año siguiente se aplicó concreto compactado en el relleno de unas galerías de desvío en un proyecto en San Simao. En 1978 el concreto compactado se utilizó de nuevo en Itaipú, en el relleno de un talud de acceso a la cimentación de las estructuras de desvío. El volumen aplicado fue de aproximadamente de 26 000 m3.

En Australia se han construido las siguientes presas empleando concreto compactado rodillado : Copperfield, Craighburne y Bucca ; y en Sudáfrica las presas Zaaihoek, Arabie y De Mist Kraal.

En México se utilizó concreto compactado rodillado en el relleno de desvío de las presa hidroeléctrica Peñitas, en Chiapas con un volumen de 50 000 m3 para desplante del canal de conducción del vertedor auxiliar; en el bordo de prueba para la presa La Manzanilla que se construyó entre las ciudades de León y Silao Guanajuato, para la posterior construcción de la presa La Manzanilla, con una altura de cortina de 36 m y un volumen de concreto compactado rodillado de 20 300 m3; y la construcción de la presa Trigomil, que se encuentra en Jalisco, con una altura de cortina de 100 m, que la ubica entre una de las más grandes del mundo; construida con un volumen de 361 500 m3 de concreto compactado rodillado.

## II.1. - CONCRETO COMPACTADO RODILLADO (CCR)

Concreto, rolacreto o concreto compactado rodillado, suelo-cemento, son términos que no tienen el mismo significado para todos. " Todos contienen cemento hidratado, pero esta es la única similitud ", afirma Ernest K. Schader, especialista en concretos y promotor del concreto compactado rodillado en obras hidráulicas.

Schader define el rolacreto o concreto compactado rodillado como un relleno de grava húmeda mezclado con cemento. El suelo-cemento no se prepara en sí con agregados sino con tierra, tiene muy poco material grueso pero un elevado contenido de cemento. El contenido de cemento en el suelo-cemento puede llegar a ser tan elevado como el 18% por peso, en tanto que el contenido de cemento del concreto compactado rodillado normalmente varía entre 2.5 y 7% por peso.

Tanto el concreto compactado rodillado como el concreto común son mezclados empleando el mayor tamaño práctico de agregados. Las diferencias principales que existen entre éstos son: que el concreto compactado rodillado requiere menos cemento para lograr la misma resistencia y que el agregado empleado en la mezcla requiere menor procesamiento y una graduación menos estricta. El concreto común, con frecuencia tiene un contenido de aire de 3 a 6 % y más cuando hay deliberadamente aire incluido, pero el método de compactación con rodillo logra losas que son más densas posibles y cuyos contenidos normales de aire son solo

de 1 a 3 %.

El comité 207 del Instituto Americano del Concreto (ACI-American Concrete Institute) define al concreto compactado rodillado como la mezcla formada por grava de tamaño máximo de 3" (76.2 mm) arena con finos no plásticos o con cenizas volantes; cemento y agua. Se coloca con equipo pesado y se compacta mediante vibración externa. Su revenimiento es nulo y al endurecerse, adquiere aspecto y propiedades físicas semejantes a la del concreto convencional.

Por lo que podemos decir que el concreto compactado rodillado es un concreto seco sin revenimiento que se compacta por vibración externa utilizando rodillos vibratorios. Difiere del concreto convencional principalmente por la consistencia requerida. Para una consolidación efectiva, el concreto compactado rodillado tiene que estar suficientemente seco para soportar el peso del equipo de compactación, pero suficientemente húmedo para permitir una adecuada distribución de la pasta durante el proceso de mezclado y compactado.

Las propiedades importantes del concreto convencional también lo son para el CCR, siendo las siguientes: resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, resistencia a la tensión, módulo de Poisson, resistencia al corte, cambio de volumen (por temperatura y secado), coeficiente de expansión térmica, calor específico, conductividad térmica, difusividad y permeabilidad.

Las diferencias entre las propiedades del CCR y las del concreto convencional se deben principalmente a las diferentes

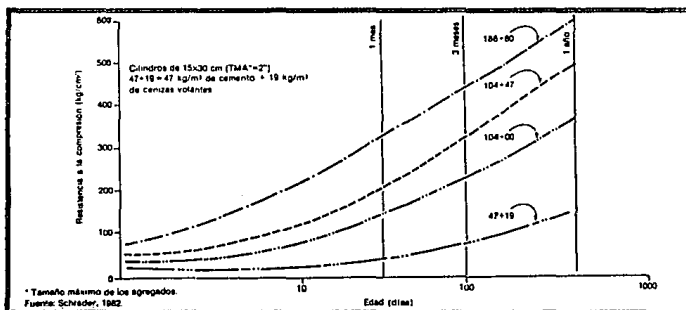


proporciones de las mezclas, ya que hay 40% menos agua y 30% menos pasta en el CCR.

La mayoría de las pruebas conciernen con la resistencia y las propiedades elásticas, conviene hacer notar que los resultados de las pruebas que se realicen en especímenes ensayados en el laboratorio, solo servirán para el diseño preliminar y de guía durante la construcción. Los resultados deben verificarse con pruebas obtenidas directamente en el proceso de construcción o mediante información obtenida del bordo de prueba.

La resistencia a la compresión del concreto bien compactado se ve afectada principalmente por la relación agua-cemento de la mezcla, o por la relación agua-material cementante en las mezclas en las cuales se utilice algún tipo de puzolana. Se han realizado un gran número de experimentos para establecer un procedimiento aceptable al elaborar los especímenes de prueba. Utilizándose en la elaboración de cilindros de concreto de 15x30 cm, la mesa vibratoria de Vebe; este aparato consiste en una mesa 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 sobre carga de 9.0 a 22.5 kg en función de las proporciones de la mezcla, del tamaño máximo del agregado, de contenido de agua, del contenido de arena y del contenido de finos, la mezcla de concreto sube alrededor de la placa de sobrecarga y se consolida totalmente después de un tiempo determinado de vibración (seg). En la gráfica I se observa

la relación edad-resistencia de cilindros ensayados de CCR de la presa Willow Creek.



Gráfica I. Relación edad-resistencia de cilindros de CCR.

Los japoneses adaptaron un molde de mayor tamaño (480 mm de diámetro por 400 mm de largo) para realizar la prueba de resistencia, aplicando con una placa de acero rígida una sobrecarga de 20 kg para considerar mezclas con un tamaño grande de agregados y contenidos altos de cemento. Se obtuvo una buena correlación entre los ensayos usando esta sobrecarga de 20 kg para este molde con mezclas con tamaños grandes de agregados y usando el molde estándar de 0.01 m<sup>3</sup> con muestras frescas de concreto cribadas.

Las propiedades elásticas del concreto se afectan principalmente con la edad, el tipo de agregado y la relación agua cemento o la calidad de la pasta. El módulo de elasticidad

del concreto aumenta con la edad y con el incremento del contenido de cemento.

Un CCR bien proporcionado y compactado tendrá un módulo de elasticidad similar al de un concreto convencional dosificado con el mismo tipo de agregado. Al aumentar las proporciones de los agregados en el CCR se presenta un incremento en su peso volumétrico y se puede incrementar el módulo de elasticidad, con un tamaño máximo de agregados dado y considerando que la mezcla tiene pasta suficiente. Si el volumen de pasta es insuficiente, el peso volumétrico disminuye al aumentar el contenido de vacíos. Bajo éstas consideraciones, el módulo de elasticidad no sólo se ve afectado por la disminución del peso volumétrico, sino también por la continuidad del contenido de pasta en la masa del concreto.

El concreto no confinado puede cambiar libremente de volumen sin la presencia de esfuerzos. Cuando el concreto está confinado, el esfuerzo resultante induce una deformación para compensar el cambio de volumen. Si la deformación del concreto provoca tensión y si se excede la capacidad de deformación del concreto se producirá agrietamiento. La deformación en el concreto puede presentarse por reducciones de volumen inducidas por el secado, por contracción autógena o por el enfriamiento del concreto. Los factores que afectan la capacidad de deformación son el tipo de agregado, la forma del agregado y el contenido de cemento. La capacidad de deformación del CCR no debe diferir mucho de la de un concreto convencional con el mismo contenido de material

cementante. Sin embargo en la mayoría de las mezclas de CCR ésta capacidad será menor debido al bajo contenido de cemento y/o mayor cantidad de puzolana en sustitución de cemento.

El potencial de cambio de volumen debido a la pérdida de humedad o contracción por secado es significativamente bajo en el CCR debido a que el contenido de agua de mezclado es mucho menor que en el concreto convencional. La superficie también está sujeta a secado, pero hay menos pasta que en los concretos convencionales y además hay mayor confinamiento de ésta debido al mayor volumen de agregados.

El principal efecto que causa el secado de la superficie puede ser el microagrietamiento de la pasta que rodea a las partículas de los agregados. La contracción por secado también está afectada por la relación agua-cemento; si la pasta no es suficientemente densa o si la compactación no es suficiente para prevenir o restringir la migración de la humedad.

La permeabilidad del concreto depende principalmente de los vacíos existentes debido al aire atrapado y por lo tanto se puede controlar casi en su totalidad con el proporcionamiento adecuado de la mezcla y su grado de compactación. El agrietamiento y las juntas frías son los factores principales que propician el paso del agua a través de cualquier tipo de concreto. Es por esto que se debe de tener cuidado para evitar las juntas frías y así evitar filtraciones.

Las pruebas de resistencia al corte en las juntas sin confinar llevados a cabo en especímenes de CCR, no revelan

diferencias significativas con relación a los resultados en el concreto convencional. El tratamiento de las juntas siempre ha sido un punto de importancia en la colocación del concreto convencional y en el caso de CCR también se tiene que prestar atención especial a este problema.

La durabilidad del concreto se evalúa por su resistencia al intemperismo, al ataque químico y a la erosión o desgaste.

La resistencia del concreto al intemperismo depende de la resistencia de los agregados al congelamiento y del contenido de aire incluido en el concreto.

La resistencia al desgaste o erosión aumenta cuando la resistencia del concreto es alta, el tamaño máximo del agregado pequeño y la textura superficial suave. En cuanto a la resistencia al ataque químico no se han publicado estudios hasta la fecha; sin embargo, se puede considerar similar a la del concreto convencional.

## II.2. - COMPACTACION

Desde tiempos antiguos se ha reconocido la conveniencia de compactar los terraplenes de los caminos. Los métodos primitivos consistían en llevar borregos de un lado a otro del terraplén y arrastrar con caballos aplanadoras pesadas de madera.

Durante el siglo XVIII se utilizaban rodillos remolcados por caballos en la construcción de caminos. A mediados del siglo XIX

se construyeron en Francia máquinas de vapor con ruedas lisas de acero, sin embargo duraron poco tiempo al comprobarse lo impráctico de generar energía con el vapor de agua para desplazar estas máquinas.

Estados Unidos fue el país pionero en el desarrollo de la Ingeniería en compactación de suelos. Los primeros compactadores "pata de cabra", diseñados para la construcción de presas de tierra, fueron desarrollados en California durante los años 1904 a 1906.

En esos tiempos era común mover masas de tierra en vehículos jalados por caballos o mulas y, por ende, los primeros rodillos "pata de cabra" eran remolcados en forma similar.

Hasta hace pocos años se podía contar con la compactación hecha por las unidades de transporte y por aplanadoras casuales, junto con los asentamientos naturales, para estabilizar los terraplenes, de modo que retuvieran su forma y soportarán las cargas que se colocarán sobre ellos.

Con el advenimiento de la Mecánica de suelos se pudo profundizar aún más en el conocimiento científico de los procesos que intervienen en la compactación de los suelos.

La palabra "Compactación" proviene del adjetivo "Compacio" que a su vez deriva del latín "Compactus", participio de "Compaginer" que quiere decir unir, juntar. Según el Dr. Juárez Badillo se entiende por compactación de los suelos el "mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas (relación esfuerzo-deformación y resistencia) por medios mecánicos" y su

importancia estriba en el aumento de resistencia y disminución de capacidad de deformación que se obtiene al sujetar el suelo a técnicas convenientes que aumentan su peso específico, disminuyendo sus vacíos. Una correcta compactación da como resultado mayor estabilidad y menor permeabilidad.

La mayor permeabilidad de un suelo se traduce en menores asentamientos o deformaciones.

Los factores más importantes que determinan los resultados de la compactación son:

- a . - Tipo de material.
- b . - Contenido de agua (humedad).
- c . - Método de humedad y energía aplicada.

Decir que un material es homogéneo equivale a decir que en todos sus puntos las propiedades físicas son iguales, es decir, los suelos están constituidos por partículas minerales, con un porcentaje de vacíos parcialmente ocupados por agua.

El suelo, antes de ser compactado, está constituido por partículas minerales, con un porcentaje de vacíos parcialmente ocupados por agua, como se puede apreciar en la fig. 1

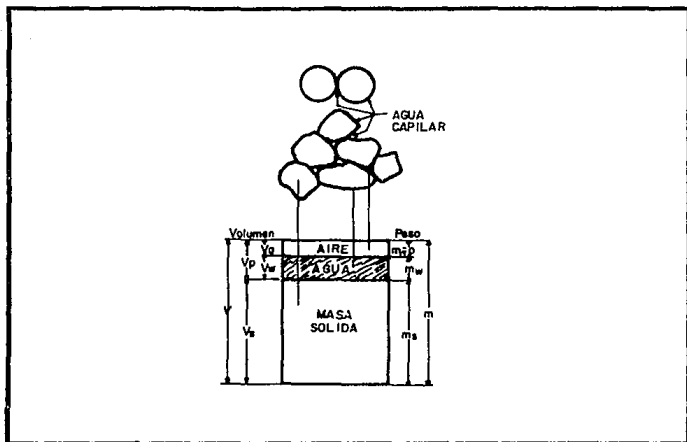


Fig. 1. Representación de las partículas de un suelo.

Donde :

$V_s$  es el volumen ocupado por las partículas sólidas.

$V_w$  es el volumen ocupado por el agua.

$V_a$  es el volumen ocupado por el aire.

La suma de  $V_w$  y  $V_a$  constituye  $V_p$ , que es el volumen de vacíos o de poros.

Durante la compactación las partículas son reubicadas y el volumen de aire se reduce. No puede haber prácticamente ninguna variación del volumen del sólido y no existe, excepto en suelos extremadamente permeables, tales como arenas gruesas y limpias, la humedad haría efecto y el agua sería expulsada habiendo una reducción en dicho volumen de agua.



En un caso teórico, la máxima reducción del volumen que en forma absoluta se podría conseguir corresponde a la eliminación total de aire, quedando el suelo saturado. En realidad no se puede llegar a este extremo. Cuando el grado de saturación, es decir, la relación entre el volumen ocupado por el agua y el volumen ocupado por la totalidad de los vacíos es pequeño, la permeabilidad de los suelos es grande y por lo tanto es fácil producir su expulsión bajo un apisonado dinámico. Sin embargo, cuando el grado de saturación llega a ser alta, por encima del 80 u 85%, la permeabilidad baja enormemente. Esto se debe a que inicialmente, todos los poros se encuentran comunicados, hallándose el agua en un forma de película continua que envuelve a las partículas. Pero al disminuir la proporción del aire, este llega a quedar en forma de burbujas aisladas entre sí, que constituyen una especie de suspensión o emulsión de aire en agua. El conjunto se comporta como un todo homogéneo. La expulsión de las burbujas no puede hacerse más que mediante la expulsión de una cierta cantidad de líquido, no puede ser producida por procedimientos convencionales.

Cuando el suelo es compactado de la misma forma con diferentes contenidos de agua, la densidad resultante es determinada por éstos. La densidad se calcula normalmente como el peso volumétrico seco definido como la relación de la masa sólida entre el volumen total.

Para contenidos de agua bajos, la fricción interna y la adherencia entre las partículas contribuyen a que se presente

cierta resistencia a la humedad. Al aumentar el contenido de agua el material resulta más fácil de compactar y se presenta un contenido óptimo de agua cuando se obtiene el peso volumétrico seco máximo. En suelos permeables, tales como arena y grava, el agua es expulsada con el reacomodo de las partículas. En este caso el contenido óptimo de agua se presenta con la saturación completa de vacíos. Hay dos situaciones en las que se presenta la máxima densidad; una corresponde al estado saturado y otra al estado seco. En la práctica, la humedad de materiales secos se aplica para rellenos de arena y grava.

La dificultad de compactar suelos con contenidos de humedad entre los estados seco y saturado depende de las fuerzas capilares. Estas se crean en los vacíos parcialmente llenos de agua y mantienen a las partículas juntas mediante " enlaces elásticos ".

Esta cohesión aparente aumenta con la disminución del tamaño de las partículas.

En las arcillas y otros suelos cohesivos existe, además de la cohesión aparente, una cohesión real debido a fuerzas moleculares que actúan entre las partículas muy pequeñas. Mientras más alta sea la cohesión mayor será la energía de humedad requerida.

Los materiales de grano grueso sin cohesión, tales como rocas, piedras, grava y arena, resultan más fáciles de compactar que los materiales finos. Con compactadores vibratorios pueden compactarse en capas de gran espesor. La humedad de materiales

finos cohesivos, como son el limo y la arcilla, dependen del contenido de agua y de las condiciones ambientales. Debido a la cohesión, tiene que ser compactados en capas delgadas.

Existen diversas pruebas de laboratorio para determinar el contenido óptimo de humedad y el peso volumétrico seco máximo correspondiente. Estas pruebas se describirán más adelante.

El peso volumétrico seco máximo obtenido en la prueba de humedad de laboratorio es usado como un peso volumétrico de referencia. Para un trabajo de humedad se especifica un peso volumétrico de campo mínimo, por ejemplo, 95% de humedad. Esto significa que el valor de la densidad obtenida en el campo tiene que ser mayor que el 95% de la densidad obtenida en el laboratorio. Así :

$$G_c (\%) = \text{PVS de campo} / \text{PVSmáx de lab}$$

Donde :

$G_c$  es el grado de humedad en porcentaje.

PVS es el peso volumétrico seco de campo.

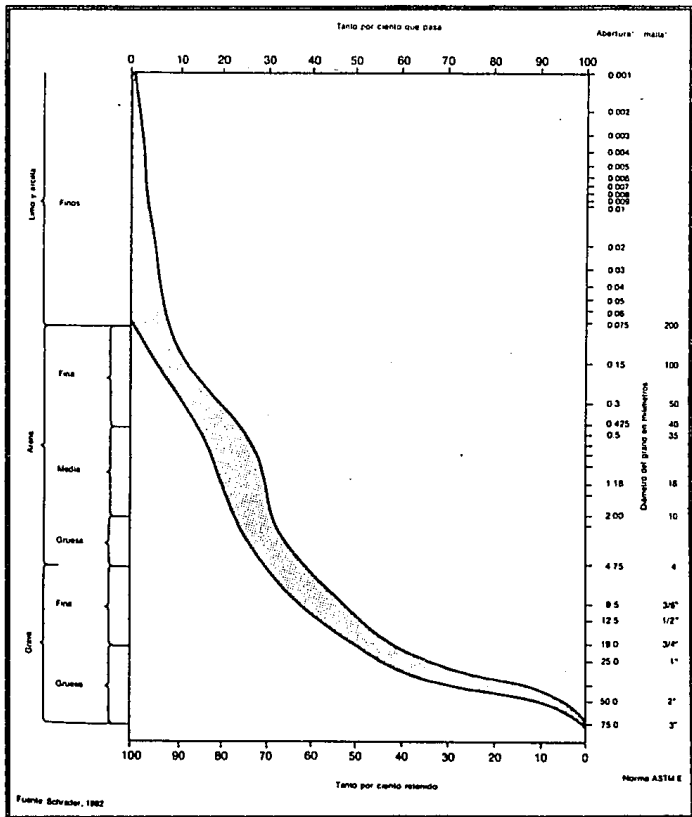
PVSmáx es el peso volumétrico seco máx de laboratorio.

Antes de compactar un material es necesario conocer su granulometría, que se puede definir como la distribución en peso de los tamaños de las partículas que componen un suelo. Esta distribución dada en porcentaje con respecto al peso total, se determina cribando una muestra de suelo seco por un número determinado de mallas o tamices de abertura conocida. El porcentaje en peso que pasa a través de cada malla se conoce como "curva granulométrica", de gran utilidad en la práctica ya que permite identificar el suelo así como conocer si está

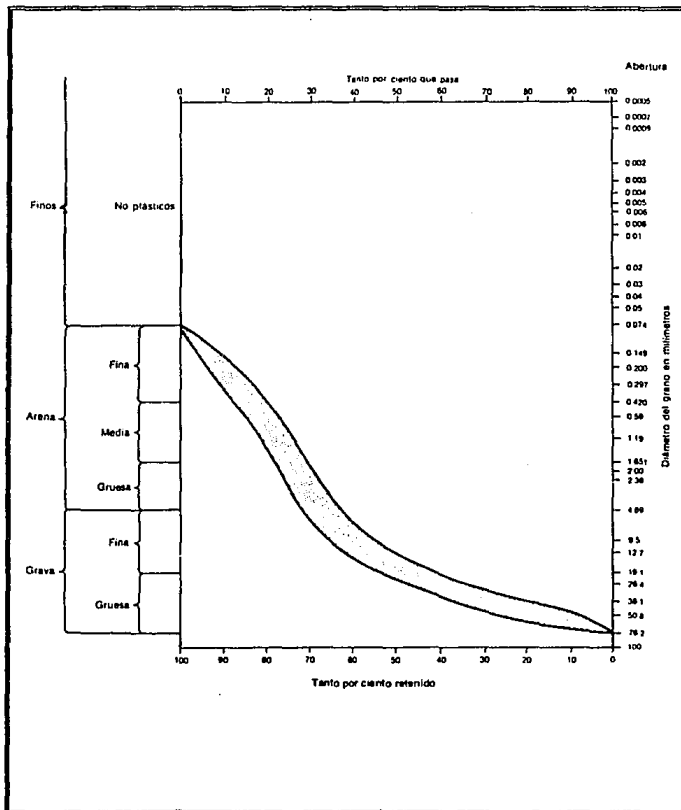
uniformemente graduado. En las gráficas II y III se aprecian las envolventes de curva granulométrica de la presa Willow Creek y de la presa La Manzanilla.

Las partículas menores al No. 200 (0.074 mm) pueden ser analizadas mediante la prueba del hidrómetro para formar una suspensión cuya densidad será medida con un hidrómetro a intervalos de tiempo determinados. La determinación de la distribución de los tamaños de las partículas se basa en el hecho de que las partículas de mayor tamaño se sedimentan con mayor rapidez que las pequeñas.

Es necesario conocer las pruebas de humedad usadas actualmente para conocer las características del material a compactar. Sería antieconómico conocer la resistencia del suelo necesaria especialmente a esfuerzos de compresión y cortante, de un aplanado. ya que el equipo usado para medir estos parámetros es costoso, y no se aplica a todos los suelos, por lo que han surgido a través de los años pruebas tanto a nivel de laboratorio como pruebas de campo.



Gráfica II. Envoltente de curva granulométrica de la presa Willow Creek.



Gráfica III. Granulometría de agregados de la presa  
La Manzanilla.

## II.2.1. - PRUEBAS DE LABORATORIO.

La función de las pruebas de humedad de laboratorio, es permitir la especificación racional y el control de los trabajos de campo mediante el estudio de las propiedades mecánicas de los suelos compactados y de sus relaciones con ciertas propiedades índices de fácil determinación. Esta función se cumple sólo en la medida en que los procedimientos de humedad en el laboratorio reproducen, o aseguran, las condiciones de campo, principalmente el mecanismo y la energía de humedad.

Estas pruebas se clasifican de la siguiente manera :

- A ) PROCTOR.
- B ) PROCTOR MODIFICADA.
- C ) PORTER.

### A ) PRUEBA PROCTOR.

Un método estandarizado para determinar la humedad óptima y su correspondiente peso volumétrico seco máximo fue introducido en 1933 por R.R. Proctor de la oficina de trabajos hidráulicos de Los Angeles, California.

El equipo necesario para realizar esta prueba en la obra es económico y sencillo. El método consiste en los siguientes pasos:

- a ) Se toma una muestra representativa del suelo a compactar, de humedad conocida.
- b ) Se toma un cilindro de 4 pulg de diámetro por 4.5 pulg

de altura, se llena en tres capas aproximadamente iguales con el mismo material de la prueba.

- c ) Cada capa se compacta con 25 golpes de un martillo de 2.5 Kg (5.5 lb) con un área de contacto de 20 cm<sup>2</sup>, el cual se deja caer de 12 pulg (30.5 cm) de altura, como se aprecia en la fig. 2. Todo esto con el objeto de siempre dar al material la misma energía de humedad.
- d ) Se pesa el material, y como es conocido el volumen, se calcula el peso volumétrico húmedo simplemente dividiendo el peso del material entre el volumen. Como la humedad es conocida, se resta el peso del agua y se obtienen el peso volumétrico seco para esa humedad.

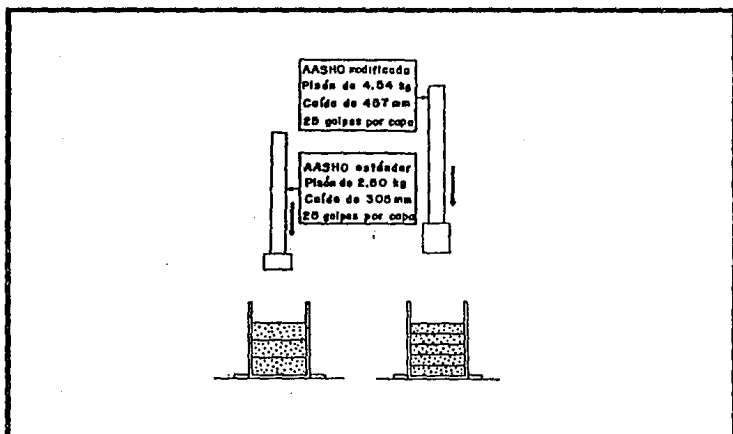
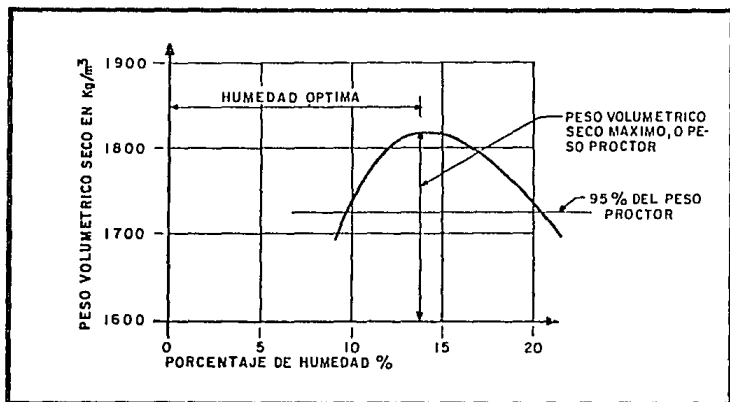


Fig.2. Prueba Proctor estándar y modificada.



e ) Se repite la prueba varias veces, variando cada vez el grado de humedad, con lo que se obtienen pares de valores humedad-peso volumétrico seco.

Con estos pares de valores se dibuja la siguiente gráfica IV.



Gráfica IV. Porcentaje de humedad-peso volumétrico seco.

En la gráfica IV, podemos observar que existe un cierto contenido de humedad para el cual el peso volumétrico es máximo ; este peso se conoce como P.V.S.M. o peso Proctor, y el contenido de humedad, como humedad óptima.

La razón de la existencia de un peso volumétrico máximo es que a todos los suelos al incrementarse su humedad, se les proporciona un medio lubricante entre sus partículas que permiten un cierto acomodo de estas cuando se sujetan a un cierto trabajo de humedad. Si se sigue aumentando la humedad, con el mismo

trabajo de humedad, se llega a obtener un mejor acomodo de sus partículas y en consecuencia un mayor peso volumétrico, si se aumenta más la humedad todavía, el agua empieza a ocupar el espacio que deberían ocupar las partículas del suelo y por lo tanto comienza a bajar el peso volumétrico del material, para el mismo trabajo de humedad. Siendo así, si se aumenta o disminuye la humedad será necesario aumentar el trabajo del equipo de humedad, lo que en general, no es económico.

#### B ) PRUEBA PROCTOR MODIFICADA.

En la prueba Proctor modificada se utiliza un pistón de 4.5 Kg (10 lb), el cual se deja caer libremente de una altura de 45.7 cm (18 pulg). El suelo se compacta en 5 capas dando 25 golpes a cada una, en un molde similar al de la prueba anterior. Como se puede apreciar en la fig. 2.

En todos los aspectos las dos pruebas son semejantes únicamente la energía de humedad es aproximadamente 4.5 veces mayor en prueba Proctor modificada, que en la Proctor. La energía de humedad se calcula en el laboratorio con la siguiente fórmula:

$$E_c = Nn Wh/V$$

En donde :

$E_c$  es la energía específica de humedad.

$N$  es el número de capas.

$n$  es el número de golpes por capa.

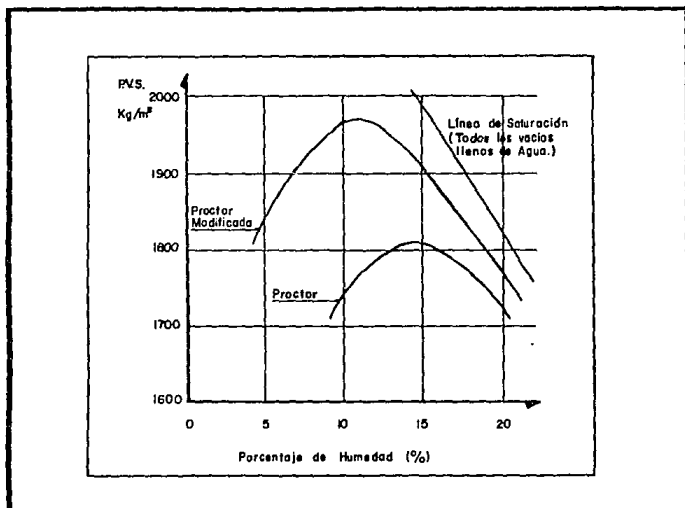
$W$  es el peso del pistón.

h es la altura de caída del pisón.

V es el volumen del molde.

Aplicando la fórmula anterior se tiene que la energía específica de humedad para la prueba Proctor estándar es de 6 Kg cm/cm<sup>3</sup> (12300 lb pie/pie<sup>3</sup>), y de 27.2 Kg cm/cm<sup>3</sup> (56200 lb pie/pie<sup>3</sup>), para la prueba Proctor modificada.

Debido a la mayor energía de humedad utilizada en la prueba Proctor modificada, el peso volumétrico seco máximo que se obtiene es de 5 a 10% mayor que el obtenido en la prueba Proctor estándar. La diferencia normal es de alrededor de 5% para materiales granulares (menor para arenas uniformemente graduadas), y de aproximadamente del 10% en suelos cohesivos. El contenido óptimo de agua es generalmente de 3 a 8% menor en la prueba Proctor modificada la gráfica V, es un ejemplo de la prueba Proctor y la prueba Proctor modificada efectuadas en el mismo material. Donde se observa que la densidad se incremento 9% y el contenido óptimo de agua disminuyó 3% como se menciona anteriormente.



Gráfica V. Diferencia entre la prueba Proctor estándar y modificada.

### C ) PRUEBA PORTER.

Tanto la prueba Proctor como la Proctor modificada han dado muy buen resultado en suelos cuyos tamaños máximos son de 10 mm (3/8 pulg), en suelos con partículas mayores el golpe de martillo no resulta uniforme y por lo tanto la prueba puede variar de resultado en un mismo material. Para evitar esta dificultad de ideó la prueba Porter, que consiste en lo siguiente :

- a ) Se toma una muestra de material y se seca.
- b ) Se pasa por la malla de 25 mm (1 pulg), y se determina el porcentaje en peso retenido en la malla, si el porcentaje es menor de 15% se usará para la prueba el material que pasó la malla. Si el porcentaje retenido es mayor que el 15%, se separa del material original una muestra que pase la malla de 1 pulg y que sea retenida en la malla No. 4; de esta muestra se pesa un tanto igual al peso del retenido, el que se agrega al material que paso la malla de 1 pulg, con este nuevo material se procede a la prueba.
- c ) A 4 Kg de la muestra así preparada, se le incorpora una cantidad de agua conocida y se homogeniza con el material.
- d ) Con este material se llena en tres capas, un molde metálico de 6 pulg de diámetro por 8 de altura con el fondo perforado. Cada capa se pica 25 veces con una varilla de 5/8 de pulg (1.2 cm) de diámetro, por 30 cm de longitud con punta de bola.
- e ) Sobre la última capa se coloca una placa circular ligeramente menor que el diámetro interior del cilindro y se mete el molde en una prensa de 30 toneladas.
- f ) Se aplica la carga gradualmente de tal manera que en 5 minutos se alcance una presión de 140.6 Kg/cm<sup>2</sup>, la cual debe mantenerse durante un minuto, e inmediatamente se descarga en forma gradual durante un minuto.

Si al llegar a la carga máxima no se humedece la base del molde, la humedad ensayada es inferior a la óptima.

- g ) Se prosigue por tanteos hasta que la base del molde se humedezca al alcanzar la carga máxima. La humedad de esta prueba es la humedad óptima. Se determina entonces el peso volumétrico seco de la muestra dentro del cilindro; a este peso se le conoce como "peso máximo Porter", y es el peso comparativo para el trabajo de campo.

A partir de las pruebas de laboratorio anteriores surgió el concepto de Grado de Humedad, definido como la relación entre dos pesos volumétricos secos, el que tiene el suelo y el máximo adoptado, expresado en por ciento, mencionado anteriormente.

#### II.2.2.- PRUEBAS DE CAMPO O CONTROL DE LA COMPACTACION EN CAMPO.

El problema en cualquiera de los métodos existentes radica en medir la humedad para poder calcular el peso volumétrico suelto en función del peso volumétrico húmedo, que se obtiene en las pruebas de campo.

Después de la compactación en campo es necesario verificar si el peso volumétrico especificado se obtuvo, por lo que se recurre a las pruebas de campo siendo la más comunes las siguientes :

- A ) Medida física de peso y volumen; ó de sustitución con arena.
- B ) Mediciones nucleares.
- C ) Método del globo.
- D ) Muestreo con tubo.
- E ) Prueba de carga estática de soporte.
- F ) Otras pruebas.

A ) Medida física de peso y volumen o método de sustitución con arena.

La prueba física consiste en lo siguiente: Se excava un agujero de 10 a 15 cm de diámetro o un cuadrado de 15 cm por lado a la misma profundidad de la capa por probar. El material excavado es cuidadosamente recogido y prensado. Se seca para determinar la humedad y el peso volumétrico seco. El volumen del agujero es medido.

El método usado generalmente es llenándolo con arena de peso volumétrico constante que se tiene en un recipiente graduado .

Conocidos el peso seco de la muestra y el volumen del agujero, se calcula el peso volumétrico seco de la muestra, que debe ser igual o mayor que el peso volumétrico seco especificado.

## B ) Mediciones Nucleares.

Se realizan por medio de un aparato nuclear que determina la densidad de los suelos y su contenido de agua, estos aparatos se han usado desde la década de los cincuenta. Los densímetros nucleares modernos cuentan con una microcomputadora que calcula directamente el peso volumétrico húmedo, el peso volumétrico seco, el grado de compactación y el contenido de humedad, dando los resultados al minuto y no hay necesidad de hacer las pruebas destructivas descritas en el inciso anterior.

La firma Seaman Nuclear Co. de Milwaukee que es la que fabrica estos aparatos; determina rápidamente por medio de ellos el mínimo de pasadas requerido para alcanzar la densidad especificada, de balastro necesaria y el método óptimo que en algunos casos, puede dividirse en varias etapas con la aplicación del DUO-FACTOR que también se fabrica. Según esto en ocasiones es necesario dar 2 ó 3 pasadas concentrando toda la carga disponible en el eje con llantas neumáticas y al llegar a determinado valor de la densidad, es conveniente ir cambiando la carga hacia el rodillo metálico, hasta terminar a veces en una repartición de 50 y 50 y en otros con el 100% de la presión disponible concentrada en el rodillo de acero.

El principio de medición del aparato nuclear es el siguiente: Una fuente encapsulada muy pequeña de radio-berilio del orden de 4.5 milicuries, emite rayos gama hacia el material que se está investigando; al chocar estos rayos con los átomos



del material (arena, arcilla, limo, grava, etc) son reflejados hacia un detector (diodo), que esta relacionado con un medidor de tiempo de extraordinaria precisión, al obtenerse la cifra de los rayos a una tabla elaborada específicamente para cada medidor, muestra el correspondiente valor del peso volumétrico del material investigado. Este aparato evita la perdida de tiempo y rastros de otras pruebas. Una desventaja del método nuclear es la posibilidad de exposición del operador a radiaciones peligrosas. Sin embargo, si se toman las debida precauciones, la exposición individual a la radiación puede mantenerse dentro de los niveles de seguridad de la Comisión Internacional de Energía Atómica.

#### C ) Método del globo.

Al igual que en la prueba de medida física de peso, se hace un agujero y el volumen del sondeo puede determinarse llenando un globo colocado en el sondeo con agua proveniente de un aparato calibrado. En este caso, el volumen de agua utilizado equivale al volumen del sondeo. Tiene como desventajas la posible ruptura del globo.

El método del globo y el de la medida física de peso y volumen tienen una desventaja muy importante, y esta radica en que la determinación del contenido de humedad por los métodos tradicionales requiere de un tiempo de entre 18 y 24 horas de secado del material, con la consecuencia de que se conoce el grado de compactación alcanzado por cierta capa cuando esta ya ha

sido cubierta por otras. para evitar esto. J. W Hilf desarrollo un método rápido para control de la compactación el cual se basa en el peso volumétrico de campo y en pruebas Proctor efectuadas en muestras con el contenido de humedad de campo y con otros dos contenidos de agua preestablecidos. Con este método los resultados pueden estar disponibles en una hora aproximadamente.

D ) Muestreo con tubo.

En suelos finos, especialmente en arcillas, el muestreo con tubo (extracción de núcleos) es comúnmente usado para obtener muestras para pruebas de densidad. Se hace penetrar un tubo en el material compactado y posteriormente se extrae con su contenido. Este método es más rápido que los métodos de sustitución.

E ) Prueba de carga estática de soporte.

En algunos países como Alemania, Austria y Suiza las pruebas de carga estática de soporte se especifican como pruebas de compactación en la construcción de carreteras.

En este tipo de prueba se utiliza una placa de carga con un diámetro de 300 mm. El módulo de elasticidad o módulo de deformación se calcula de acuerdo con la siguiente fórmula :

$$E_v = 1.5r_p / S$$

En donde :

r es el radio de la placa de carga.

p es la carga por área unitaria.

S es la deflexión.

El valor de  $E_{v1}$ , obtenido en la primera operación de carga es normalmente cerca de la mitad del valor  $E_{v2}$  obtenido en cargas repetidas.

Se especifican valores mínimos de  $E_{v2}$  para las distintas capas durante la construcción de caminos, así como para diferentes tipos de suelos.

El módulo de elasticidad da una mejor indicación de la resistencia de una base ó sub-base que una prueba de densidad. Para materiales gruesos, como enrocamientos y gravas, existe una relación significativa entre el módulo de elasticidad y la densidad. En los materiales finos, las propiedades elásticas están altamente influenciadas por el contenido de agua, lo que hace que las pruebas de carga de soporte no sean aplicables como prueba de densidad. Una dificultad que presentan las pruebas de carga de soporte, es que en grava ó arena uniformemente graduada, una capa superior con un bajo grado de compactación da como resultado un módulo de elasticidad bajo, aun cuando el material de la capa inferior este bien compactado.

F ) Otras pruebas.

Como el problema principal es la determinación de la humedad, se han desarrollado últimamente algunos métodos entre los que destacan principalmente el denominado "SPEEDY", que consiste en colocar un peso conocido de suelo mezclado con carburo de calcio dentro de un recipiente hermético provisto de un manómetro. El carburo reacciona con la humedad del suelo, produciendo gas acetileno y por lo tanto una presión que es registrada en el manómetro, el que se puede inclusive graduar en gramos de agua, obteniéndose rápidamente de esta manera el porcentaje de humedad y así poder calcular el peso volumétrico seco.

Otro método rápido es el de Helf, propuesto por el mismo y su ventaja es que puede llegar a conocerse en el término aproximado de una hora el grado de compactación alcanzado, de un modo más preciso.

Esto se logra porque el método no requiere el conocimiento del contenido de agua de la muestra obtenida para fines de control. El mismo Helf sugiere un método rápido para el control del contenido de agua en el campo que, si no es totalmente riguroso resulta suficientemente aproximado y supera a los tradicionales, a juicio de su autor, sobre todo porque las pruebas que se hacen se efectúan directamente sobre el material objeto del control, con lo que se toman en cuenta heterogeneidades en la obra; esta misma ventaja esta presente en

el método propuesto para controlar la compactación.

### II.2.3. - METODOS DE COMPACTACION DE SUELOS O PRINCIPIOS DE COMPACTACION.

Es conveniente mencionar los métodos de compactación, ya que los esfuerzos mecánicos empleados en la compactación son combinación de uno o más de los siguientes efectos :

a ) Presión estática.

b ) Impacto.

c ) Vibración.

d ) Amasamiento.

a ) Presión estática.

Este método se basa en la aplicación de una fuerza en una determinada área, generando una presión sobre el suelo a compactar, el efecto de esta fuerza es de la capa superior hacia las capas inferiores, es decir, que las primeras capas cerca de la superficie se densifican antes que las de abajo.

El principio de presión estática tiene la desventaja de que al aplicar una presión mayor, la fuerza de fricción que se desarrolla entre las partículas de un material son mayores. Esta fricción es la resistencia que oponen las partículas del suelo para deslizarse dentro de la masa del mismo.

Otra desventaja es que las características granulométricas del material varíen debido al incremento de presión, el suelo desarrolla mayor fricción interna y lo que se logra es romper o quebrar el material al ser compactado.

b ) Por impacto.

El efecto de impacto proporciona una mayor fuerza en la superficie del suelo que una carga estática. Esto provoca que una onda de presión viaje desde la superficie generando grandes presiones a grandes profundidades. Por lo tanto este método se basa en dejar caer un cuerpo de gran peso sobre suelos y enrocamientos, la presión que ejerce este sobre la superficie a compactar a llegado a registrar efectos de compactación a profundidad de 10 a 20 m.

c ) Por vibración.

Este método combina los métodos anteriores descritos, es decir, aplica una cierta presión, pero al mismo tiempo se somete al material a rápidos y fuertes impactos o vibraciones, produciendo oscilaciones esto ocasiona que las partículas del suelo presenten movimientos y quedan eliminada la fricción interna que existe entre ellas. Como consecuencia, se propicia el acomodo de las partículas, encontrando éstas nuevas posiciones que hacen el volumen tan pequeño como sea posible.

d ) Por amasamiento.

La compactación por amasamiento se consigue por penetración, más que por el efecto del bulbo de presión producido ó generado por el efecto de amasado que se produce cuando un compactador "pata de cabra", penetra en un material ejerciendo presión hacia todos lados, obligando a parte del y aire a salir a la superficie.

La compactación por este método da lugar a que las capas inferiores del material se densifiquen primero y las capas superiores después. Conseguiéndose que el bulbo de presión disminuya al ir aumentando al compactación hasta alcanzar la requerida por proyecto ó especificación. Por esto se dice que un compactador "pata de cabra" emerge ó sale cuando el material se encuentra debidamente compactado. En la figura 3 se muestran estos métodos.

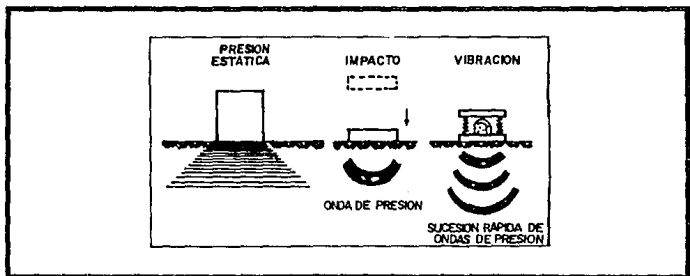


Fig. 3 Métodos de compactación.

## **CAPITULO III**

**CRITERIOS QUE SE DEBEN  
CONSIDERAR PARA EL DISEÑO DE  
MEZCLAS DE CONCRETO  
COMPACTADO RODILLADO**



### **III. - CRITERIOS QUE SE DEBEN CONSIDERAR PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO COMPACTADO RODILLADO**

#### **III.1. - MATERIALES**

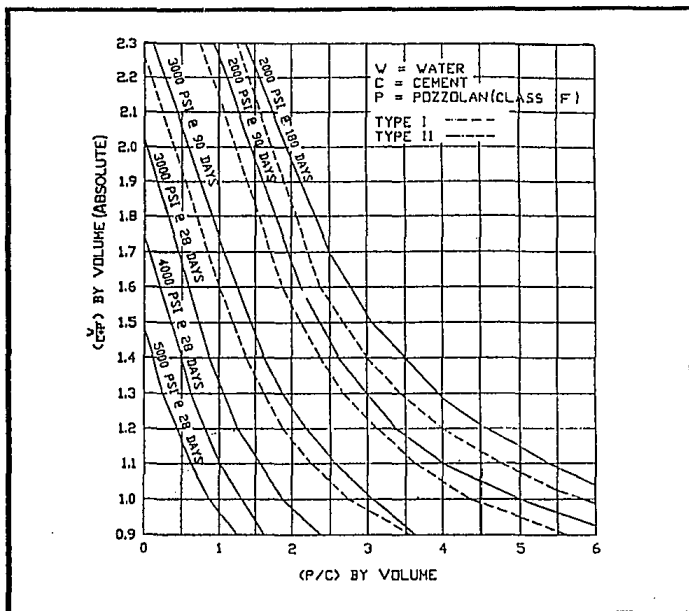
La selección de los materiales y su procedimiento son controlados por los requerimientos de diseño, disponibilidad de materiales en la región y la planeación de los procedimientos de colocación. Uno de los principios de proporcionamiento de concreto masivo es el de tener el máximo de agregados con la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

Uno de los principales objetivos del proporcionamiento de las mezclas del concreto compactado rodillado es el de dar compactibilidad y estabilidad a la masa de concreto para que esta alcance la resistencia, durabilidad y permeabilidad requeridas por un determinado proyecto, así como obtener una adecuada unión entre las capas.

El concreto compactado rodillado puede ser elaborado o fabricado con cualquiera de los tipos básicos de cemento Portland o una combinación de cemento y puzolanas, que son los materiales junto con los agregados, el agua y un adecuado grado de compactación de los cuales depende la resistencia del mismo.

El tipo de cementante tiene un efecto significativo en el

grado de hidratación y en el desarrollo de esfuerzos, teniendo efectos significativos que afectan la resistencia a edades tempranas del concreto. 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 gráfica VI puede utilizarse como guía para el proporcionamiento de la mezclas 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.



Gráfica VI. Proporción de los materiales a emplear en mezclas de CCR.

La eficiencia de las puzolanas en la reducción del calor de hidratación, depende de los requerimientos de resistencia y de 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 de hidratación 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 la resistencia por el uso de puzolanas. Las estructuras que requieren alta resistencia o altos contenidos de cemento y que utilicen altos porcentajes de puzolanas tienen dos beneficios economía y menor calor de hidratación.

En general, en México no se emplean las puzolanas, pero en la mayoría de los recientes proyectos donde se utiliza el concreto compactado rodillado se emplean las puzolanas clase F (Fly ash), las cuales tienen como propósito reducir el calor de hidratación, el costo de la obra y como un mineral que se adiciona a la mezcla para dar trabajabilidad a las partículas finas.

Los agregados para concreto compactado rodillado son materiales pétreos clasificados como gravas, arenas y puzolanas. Los agregados pueden ser producto de la explotación y trituración de bancos de roca o ser extraídos de depósitos naturales de cauces de ríos. La selección de los agregados y el control de los mismos son factores importantes que influyen en la calidad y propiedades del concreto compactado rodillado, por lo que es necesario tener un control al almacenar las gravas y las arenas, clasificándolas y separándolas de manera que no se mezclen entre sí, con el fin de obtener la granulometría del proyecto. 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 entre 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 varios bancos de agregados que inclusive no estén contemplados dentro de las graduaciones del ASTM o los requerimientos de calidad del ACI.

En el concreto compactado rodillado normalmente no se tienen ahorros importantes en el costo del material si se emplean agregados mayores a 76 mm (3 pulg), ya que estos tienden a segregarse. Si el costo del material es un factor importante dentro de la selección del tamaño máximo del agregado, entonces el costo que se genere por controlar la segregación tendrá que tomarse en cuenta, o deberán de considerarse las consecuencias que tenga la segregación sobre la resistencia, la unión entre juntas y los requerimientos de permeabilidad.

Cuando se utiliza concreto masivo o convencional el control de la temperatura es más importante que el costo que se tiene por la selección del tamaño máximo del agregado.

En el concreto compactado rodillado las diferencias en el requerimiento de cemento para agregados de 38 a 76 mm (1 1/2 a 3 pulg) son menores que para un concreto normal. Además se puede

disminuir el contenido de cemento hasta un 15% cuando se utiliza el tamaño mayor; esto da como resultado una reducción del 15% en el calor de hidratación.

Los requerimientos de graduación de los agregados para diferentes mezclas de concreto compactado rodillado varían significativamente de una a otra, esta variación afecta la consistencia del concreto compactado rodillado, al igual que los requerimientos de agua y cemento necesarios para llenar los espacios vacíos en el agregado y para cubrir las partículas al formar un volumen de concreto sólido.

La graduación del agregado fino tiene una gran influencia sobre los requerimientos de pasta de cemento así como en la compactabilidad del concreto compactado rodillado. 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 antes mencionada. Cuando no se emplean puzolanas un incremento del 5% en el porcentaje del material que pasa por la malla No. 100 puede ser benéfico para reducir el volumen de pasta necesario. En la figura 4 se muestran las graduaciones típicas de los agregados para concreto compactado rodillado como también para concreto normal.

La graduación del agregado y el contenido de finos afecta la compactabilidad relativa del CCR y puede influir en el número de

pasadas con rodillo vibratorio.

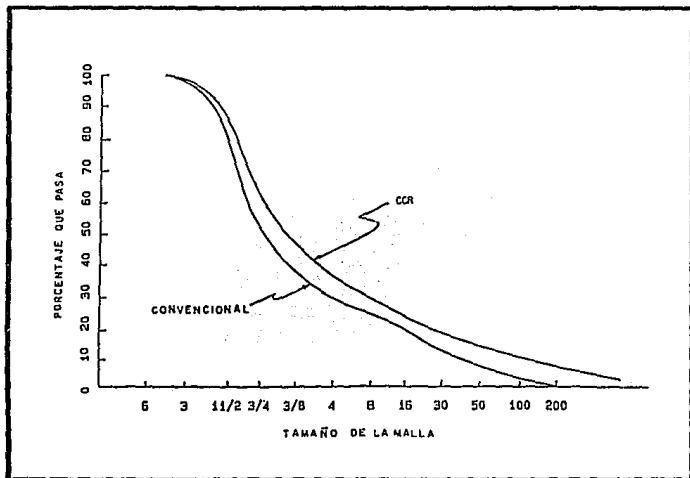


Fig.5 Graduación típica de los agregados para CCR y concreto normal.

### III.1.1. - PROPORCIONAMIENTO DE LOS AGREGADOS.

La cantidad de esfuerzo requerido 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 concreto del CCR compactado en el lugar siempre que se cuente con un gran equipo vibratorio. Esto permite el empleo de los agregados que se tengan disponibles en el lugar y producir un CCR aceptable.

El proporcionamiento del agregado grueso para un requerimiento mínimo de mortero depende del porcentaje de vacíos, del área superficial y de la forma de las partículas. Cuando las graduaciones se controlan mediante cribado y la consecuente división de los agregados en fracciones de tamaños separados, se puede controlar el contenido de vacíos dentro de ciertos límites.

La graduación en el agregado fino tiene un efecto que ayuda a tener requerimientos mínimos de pasta de cemento. En lugares donde no se tienen puzolanas disponibles, puede resultar económico mezclar arena o introducir partículas minerales muy finas para reducir los vacíos del agregado fino.

Es conveniente contar con un gran porcentaje de tamaños pequeños de agregado para reducir la segregación. Desde un punto de vista económico esto resulta en el uso de todos los tamaños y reduce el desperdicio de las fracciones pequeñas de agregados. El volumen absoluto de agregado grueso por volumen unitario de concreto se debe encontrar dentro de los límites mostrados en la tabla No. 1.



T.M.A. (pulg)	6	4 1/2	3	1 1/2	3/4	3/8
T.M.A. (mm)	152	114	76	38	19	9.5
Volumen absoluto						
% del volumen unitario.	63-64	61-63	57-61	52-56	46-52	42-48

Tabla No.1

Para cualquier graduación ó tamaño máximo de agregado, el volumen mínimo de agregado que produce una consistencia de revenimiento nulo puede establecerse proporcionando la fracción de mortero que produzca aproximadamente la resistencia requerida y ajustando las proporciones del agregado grueso y del mortero hasta obtenerse un revenimiento nulo. Las proporciones del agregado fino, cemento, y agua deben mantenerse fijas durante estos ajustes.

El volumen mínimo de pasta puede determinarse mediante curvas de peso volumétrico máximo de manera similar a la determinación de la humedad óptima en suelos (mencionado con anterioridad para suelos).

El procedimiento es como sigue: Usando la relación agua-cemento ó agua-material cementante, se añade el agregado fino en incrementos iguales y se mide el peso volumétrico de especímenes obtenidos por vibración prolongada; se gráfica el peso volumétrico contra el volumen de pasta calculado y de esta manera se puede determinar el volumen de pasta que produzca el máximo peso volumétrico. Este volumen de pasta como relación del volumen

total de mortero debe incrementarse en un 5 a 10% al proporcionar mezclas masivas. En mezclas especiales diseñadas para juntas de construcción o juntas frías, se tiene que incrementar esta relación de volumen mínimo de pasta en un 20 a 25%.

### III.2. - CRITERIOS QUE SE DEBEN CONSIDERAR PARA EL DISEÑO DE LAS MEZCLAS

El desarrollo del concreto compactado rodillado durante los últimos 20 años a través del mundo, a dado lugar a un sinnúmero de criterios para el proporcionamiento o diseño de la mezclas, haciendo muy difícil generalizar cualquiera de estos criterios como un método estándar; ya que dependiendo de la localización y tipo de la obra, 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 difieren significativamente.

De estos criterios para el diseño de la mezclas existen tres diferentes, estos son :

- I.- Proporcionamiento del CCR para alcanzar los límites especificados de consistencia.
- II.- Contar con las mezclas de prueba para seleccionar la combinación de agregados y material cementante más económica.
- III.- Proporcionamiento de CCR utilizando los conceptos de compactación de suelos.

Otros criterios 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).

A continuación se describirán estos criterios para el diseño de las mezclas.

### III.2.1. - PROPORCIONAMIENTO DEL CCR PARA ALCANZAR LOS LIMITES ESPECIFICADOS DE CONSISTENCIA

El proporcionamiento empleado para obtener la trabajabilidad óptima para tener una adecuada compactación se basa en la Prueba Vebe, para determinar la trabajabilidad y optimizar la proporción de agregados.

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.

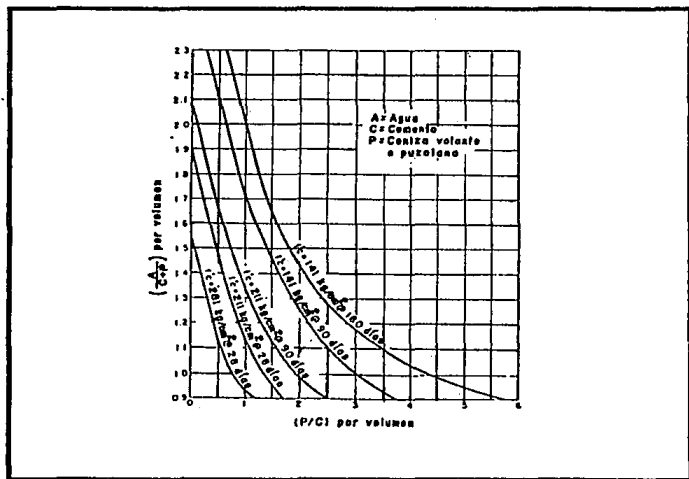
El proporcionamiento del agregado grueso depende simultáneamente de los efectos combinados de los huecos o vacíos del agregado, el área de los mismos y la forma de las partículas. Cuando se controlan las graduaciones mediante la observación directa y la separación de los agregados dependiendo de sus 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 tamaño máximo del agregado incrementará la densidad seca y reducirá el contenido de vacíos. Para cualquier tamaño máximo del agregado, 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.

La resistencia del concreto depende esencialmente de las proporciones de cemento, puzolana y agua. El tipo de cemento tiene un efecto importante en la hidratación y en la rapidez de desarrollo de la resistencia y, por ende, determina la resistencia a edades tempranas, según pruebas realizadas. A edades mayores de los 28 días, la diferencia en la resistencia debido a los distintos tipos de cemento disminuye, e incluso los cementos que desarrollan la resistencia más lenta llegan a producir las más altas. Para la mayoría de los cementos tipos I y II, la gráfica VII puede servir para proporcionar concretos con igual resistencia para distintas proporciones de cemento y cenizas volantes. También se puede utilizar con otro tipo de puzolanas; sin embargo, la forma de las partículas de otros tipos de puzolanas por lo general no permite la reducción en el contenido de agua que comúnmente se logra con el uso de cenizas

volantes. Por ello, la relación puzolana-cemento (P/C) máxima permisible será de 2 cuando la puzolana no sea ceniza volante. La demanda de agua para cierta proporción de los materiales también limitará la relación agua-material cementante  $\{A/(C + P)\}$  mínima. Se han utilizado mezclas de cenizas volantes con la relación P/C máxima y la relación  $A/(C + P)$  mínima, de acuerdo a la gráfica VII; sin embargo, un incremento en la rigidez de la mezcla tiene que esperarse al reducirse la relación P/C debida a las diferencias básicas en el contenido de agua.



Gráfica VII. Proporción de los materiales para mezclas de CCR.

El contenido de vacíos del agregado fino se determina mediante la medición del peso seco y generalmente 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 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 :

a ) 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.

b ) Grafique la densidad contra los volúmenes de pasta calculados.

c ) 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%.

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 más cerca de la tabla No. 2. Utilizando el procedimiento del ACI 211.3 y el contenido de agua de la tabla No. 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, lográndose resistencias mayores.

Un método para el proporcionamiento de las mezclas de CCR enfocado a obtener el peso volumétrico máximo tiene los siguientes pasos básicos:

TIPO DE MEZCLA	TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO (PULG.)					
INTERIOR	3/8	3/4	1 1/2	3	4 1/2	6
	CONTENIDO DE AGUA (lb/yd <sup>3</sup> )					
	195	180	165	145	135	130
DE CAPA	215	200	185	-	-	-

Tabla No. 2

a ) Se puede determinar el volumen mínimo de pasta como se vio anteriormente (del inciso a al c). En lugar de éstas pruebas, se han encontrado relaciones convenientes entre el volumen de pasta libre de aire y el volumen de mortero libre (Pv) de 0.38 para mezclas internas y de 0.48 para mezclas de liga.

b ) Se seleccionan las relaciones P/C y A/(C + P) de la gráfica VII para una mezcla de prueba.

c ) Se determina el volumen de agregado grueso (Vag) a partir de la tabla No. 2 o mediante las pruebas mencionadas anteriormente

sobre los agregados.

d ) Se calcula el volumen de mortero libre de aire por metro cúbico ( $V_a$ ), considerando un 2 % de aire atrapado con la fórmula siguiente :

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

En donde  $C_v$  = volumen unitario de concreto.

e ) Se calcula el volumen de las pasta libre de aire ( $V_p$ ), usando la relación de volumen de pasta del paso a, ( $P_v$ ), con la fórmula siguiente :

$$V_p = V_a P_v$$

f ) Se determina el volumen de agregado fino ( $V_{af}$ ) con la fórmula :

$$V_{af} = V_a (1 - P_v)$$

g ) Se determina el volumen de agua de la prueba con la fórmula:

$$V_w = V_p \left[ \frac{A}{(C+P)} \right] / \left[ 1 + \frac{A}{(C+P)} \right]$$

h ) Se determina el volumen de cemento  $V_c$  con la fórmula :

$$V_c = V_w / \left[ \frac{A}{(C+P)} \right] * \left[ 1 + \left( \frac{P}{C} \right) \right]$$

i ) Se determina el volumen de ceniza volante o puzolana ( $V_f$ ) con la fórmula :

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

j ) Se establecen los pesos de los materiales multiplicando los volúmenes individuales por sus pesos volumétricos respectivos.

k ) Se verifica la consistencia de la mezcla para determinar la duración mínima de vibración externa en segundos necesarios para alcanzar el peso volumétrico máximo compactado.

l ) Con los volúmenes finales de agregado grueso se hacen dos



mezclas adicionales, una con la relación  $A/(C+P)$  más alta y otra con la relación más baja. Se gráfica la resistencia contra la relación  $A/(C+P)$  para la elección final de la mezcla.

m ) Revisé la consistencia de la mezcla mediante el empleo de la prueba Vebe, para determinar el mínimo tiempo de vibración externa en segundos necesarios para asegurar la máxima densidad de compactación.

n ) Con los volúmenes finales de agregado grueso se hacen dos mezclas adicionales, una con la relación  $A/(C+P)$  más alta y otra más baja. Se gráfica la resistencia contra la relación  $A/(C+P)$  para la elección final de la mezcla.

### III.2.2. - PROPORCIONAMIENTO DE LA MEZCLA DE PRUEBA PARA OBTENER LA COMBINACION AGREGADO Y MATERIAL CEMENTANTE MAS ECONOMICA

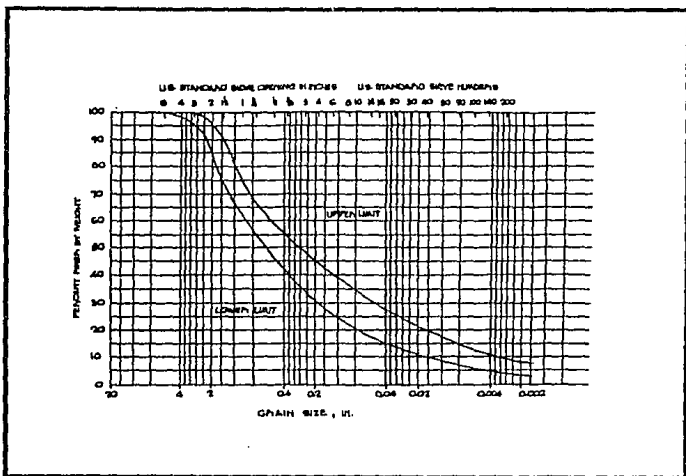
El proporcionamiento de las mezcla del CCR se basa en la combinación más económica del material cementante y agregados que proporcionen la resistencia de diseño requerida y que se puede usar en campo, es la que se selecciona para el proyecto. Basándose en los resultados de pruebas físicas de las que se elaboran las muestras, se fija una graduación del agregado mientras 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.

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 29.66 kg/m<sup>3</sup> a 296.6 kg/m<sup>3</sup> con resistencias a un año que varían de 580 a 5300 psi.

Al hacer el primer proporcionamiento de la mezcla, esta se elabora sin puzolanas y el segundo se elabora con la misma cantidad de cemento y 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.

Utilizando los bancos de material 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 No. 4 y en la gráfica VIII, se emplea para fijar la graduación de proyecto.



Gráfica VIII Graduación sugerida de los agregados para CCR.

TAMARO 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	95-96	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	31-34	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

Tabla No.3. Graduación típica de CCR.

El contenido de agregado fino en CCR usualmente esta dentro del rango de 35 a 50% de la graduación combinada, este contenido de finos se necesita para disminuir la segregación y el rompimiento del agregado grueso al chocar roca contra roca durante la compactación. El contenido de finos permisibles depende de la plasticidad. La tabla No.4 muestra los límites que se han utilizado. Si los finos no son plásticos, se permite una mayor cantidad de ellos, pero en la mayoría de los proyectos de CCR se ha utilizado un 10% del peso total del agregado.

Para seleccionar 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.

LIMITE LIQUIDO	INDICE PLASTICO	MAXIMO PORCENTAJE QUE PASA. 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 No.4 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.

### III.2.3. - PROPORCIONAMIENTO UTILIZANDO LOS CONCEPTOS DE COMPACTACION DE SUELOS

Este procedimiento se ha utilizado 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 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 emplean unos moldes de compactación de 6 x 12 pulgadas en lugar de los de 4 x 4.6 pulgadas para introducir agregados mayores. La compactación depende de la energía que se aplique al espécimen.

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 tienen 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  $A/(C+P)$ ).

El contenido de agua se expresa como porcentaje del peso 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  $A/(C+P)$ . 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.

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

### III.3. - MEZCLADO

Debido a la gran variedad de compactadores vibratorios disponibles en la actualidad, con el CCR cambian los conceptos de control de producción del concreto masivo, desde la salida del concreto de la planta hasta su colocación.

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, ya que la secuencia de colocación de los materiales es muy importante en el ensayo y error para determinar la mejor metodología y el tiempo de mezclado mínimo permisible para cada mezcla.

Por ello es deseable el uso de mezcladoras continuas para minimizar la pérdida de tiempo en las operaciones de dosificado, aunque la producción requerida pueda lograrse tanto con las plantas continuas como con las dosificadoras (de bacha).

a ) Plantas dosificadoras de bacha.

Las mezcladoras de bacha convencionales han sido muy utilizadas para producir CCR. Las mezcladoras capaces de trabajar con un tamaño máximo de agregado de 76 mm (3 pulg) y hasta 152 mm (6 pulg) no tienen problemas para mezclar un concreto sin revenimiento y con agregados grandes como lo es el CCR, aunque se puede requerir un mayor tiempo de mezclado que para el convencional. Para conocer lo adecuado de la mezcla, se puede determinar la variación en el peso volumétrico de los especímenes de prueba completamente compactados, tomados del último tercio de la bacha al ser descargada.

Se pueden presentar variaciones en la humedad libre de los agregados que pueden ser problemáticos debido al bajo requerimiento de agua de la mezcla. La mayoría de los operadores cometen el error de sobreestimar la humedad libre y proporcionan muy poca agua a las mezclas iniciales. Esto es indeseable porque en general las mezclas iniciales son usadas para cubrir las



juntas de construcción y tienen que contar con un exceso de humedad para una adecuada unión. Es preferible empezar con una mezcla húmeda y reducir el agua en mezclas subsecuentes hasta obtener la consistencia deseada. Las dificultades de compactar una mezcla excesivamente húmeda se pueden reducir o eliminar esparciendo una capa más delgada. El exceso de agua sube al colocar capas subsecuentes, eliminando cualquier deficiencia en la resistencia de la mezcla húmeda.

Existen ciertas desventajas al usar mezcladoras de bacha, ya que al manejar grandes volúmenes de concreto por este método se requiere de un sistema complicado de plantas; además mientras más sea la capacidad de la mezcladora se requerirá más tiempo de mezclado debido al mayor volumen, ya que resulta más tardado lograr una mezcla más íntegra.

Por ello, el tiempo que toma pesar y cargar una bachada aumenta al incrementarse el tamaño de esta y se llega a un punto en el que el aumento del volumen de la bachada no significa un beneficio para la producción.

b ) Mezcladoras continuas.

Este tipo de mezcladoras tienen la ventaja de dosificar y alimentar continuamente los ingredientes de manera precisa y consistente al sistema de mezclado, para así obtener una producción alta y uniforme. Además, con este método de mezclado baja el costo de la planta con relación a la capacidad de la producción. Las únicas desventajas que se pueden presentar son la

precisión de los sistemas de medición del agua y de los materiales cementantes (cemento y cenizas volantes, pero como se menciono anteriormente se acepta una variación en los límites de  $\pm 4 \%$ ), así como en el desempeño de la mezcladora en la distribución adecuada de los componentes de la mezcla.

En presas que se han construido se ha generalizado mucho el uso de este tipo de mezcladoras.

#### III.4. - TRANSPORTE

El volumen de material a ser colocado y el acceso al área de colocación son los factores principales que intervienen en la selección del equipo para transportar al CCR desde la mezcladora, la mayor parte del equipo y de los procedimientos de transporte del concreto convencional son aplicables al CCR, sin embargo, las características que implica su nula fluidez hacen necesaria la aplicación de procedimientos de manejo especiales para prevenir la segregación.

Existen dos métodos para transportar al CCR, por bacha y en forma continua. La selección del método puede estar influenciada por el tipo de equipo de mezclado utilizado, pero si hay un control adecuado, se puede utilizar un método de transporte por bachas aunque la mezcladora sea continua y, de manera similar, se puede usar equipo de transporte continuo aunque la mezcladora sea de bacha.

La selección del equipo de transporte utilizado para mover al CCR desde la planta mezcladora hasta el área de colocación estará influenciada por el tamaño máximo de agregado de la mezcla. La experiencia indica que un concreto con un tamaño máximo de agregado de 38 mm (1 1/2 pulg) puede ser transportado y colocado con el equipo diseñado para el transporte de agregados y movimiento de tierras sin que se presente segregación apreciable. El concreto con tamaño máximo de 76 mm (3 pulg) tiene una distinta tendencia a segregarse cuando se descarga sobre una superficie dura, tal como sucede cuando se coloca una capa sobre otra previamente compactada. Los problemas de segregación durante el transporte y colocación de un CCR con tamaño máximo de agregado de 152 mm (6 pulg) resultan tan severos que su uso con el equipo actual no resulta práctico. El uso de un tamaño máximo de agregado de 76 mm (3 pulg) resulta menos difícil, aunque también existe riesgo de segregación durante el transporte y colocación, lo que requiere de restricciones en el tipo de equipo y en los procedimientos a usar. El costo que implica estas restricciones debe ser evaluado en los análisis económicos relacionados con la selección del tamaño máximo del agregado.

A continuación se describirán brevemente los métodos de transporte de CCR más comunes:

Transporte en bachas.

El equipo para transporte en bachas consiste en alguna forma contenedora montada sobre una unidad de acarreo. Las unidades más

comunes son los camiones de descarga trasera o inferior, los cuales pueden variar en capacidad desde unos cuantos metros cúbicos hasta el uso de camiones fuera de carretera que pueden acarrear hasta 29 m<sup>3</sup> por ciclo de carga. La selección del tamaño del equipo debe basarse en la capacidad de colocación requerida, la duración del ciclo (tiempo de duración de un viaje redondo de una unidad) y en el volumen total a ser colocado. Existen otras consideraciones adicionales como son el costo de la unidad de transporte, el acceso al área de colocación, los requerimientos de extendido del CCR y el costo de preparación y mantenimiento de los caminos y puntos de acceso. Cuando se utilizan camiones es recomendable que las llantas se limpien antes de entrar en contacto con la superficie previamente compactada.

Equipo no agitador.

El equipo no agitador se ha desarrollado para transporte de agregados, para minería y para movimientos de tierras, y puede ser utilizado para CCR con poca o ninguna modificación. El cemento tiende a acumularse en las partes expuestas debido a su extremada adhesividad y por esta razón la mayoría de las unidades se diseñan con descarga trasera o inferior con poco o ningún control del flujo de los materiales fuera de la unidad. El costo de manejar la segregación resultante tiene que considerarse en la selección del equipo de transporte.

#### Equipo agitador.

Las revolvedoras montadas sobre camión convencionales por lo general no deben ser utilizadas para transportar CCR. Dada la consistencia del CCR los aditamentos para el amasado de la mezcla de concreto, tales como cuchillas o paletas, están sujetos a un desgaste excesivo y la posibilidad de falla mecánica es alta. Además, la descarga resulta extremadamente lenta. Por estas razones el uso de este tipo de camiones está limitado a obras pequeñas.

#### Cubos.

El transporte de cubos en camiones o vagones de ferrocarril es otro método de transporte intermitente utilizado regularmente para el concreto convencional. Los cubos se llenan en la planta de mezclado y se transportan cerca del área de colocación mediante grúas, las cuales completan la fase de transporte. El uso de éstas grúas posibilita el uso de equipo fijo al camino, como son los vagones de ferrocarril.

#### Transporte continuo.

La colocación continua del CCR se puede lograr mediante transportadores de banda. Generalmente es necesario contar con una tolva al final de la banda transportadora principal para retención temporal a fin de evitar que existan interrupciones por espera de los vehículos de acarreo. Se recomienda que la tolva tenga un tamaño mínimo del doble de la capacidad de los dos

vehículos de acarreo más grandes que se vayan a utilizar. El material no se debe retener en la tolva de almacenamiento durante más de 5 ó 10 minutos. El tiempo de exposición en la banda transportadora debe ser mínimo, con 5 minutos como límite deseable y 10 minutos como límite práctico. El transportador se debe tapar para proteger la mezcla y evitar que se seque o se moje con la lluvia, especialmente en los tramos largos y de preferencia en todo el sistema. Al igual que en los sistemas de transporte del concreto convencional, se debe prestar especial atención a los anchos, velocidades, protección, mantenimiento, ángulos, sistemas de respaldo, refacciones, etc., de las bandas.

### III.5. - COLOCACION

El CCR se tiene que colocar en capas lo suficientemente delgadas para poder ser compactadas por el rodillo vibratorio. En pruebas de campo, se ha comprobado que el espesor óptimo de las capas fluctúa entre 20 y 30 cm (8 a 12 pulg). En Japón existe una variación del método ya que se extienden hasta 4 o 5 capas y después se compactan, llegando a tener espesores de 75 o hasta 100 cm. La velocidad de colocación varía en cada caso particular y se ve afectada por las interrupciones en la construcción. En la práctica se ha determinado que el lapso de tiempo que transcurre desde la colocación y extendido hasta el comienzo de la compactación debe ser menor de 4 horas. Generalmente la colocación y el extendido se hacen con bulldozers de hasta 50 HP.

La colocación puede ser continua o variar a intervalos que dependen de la madurez del concreto. En ocasiones los intervalos máximos llegan a ser de 2 a 3 días, en vez de los 4 a 5 días permisibles en el concreto convencional. El extendido del CCR antes de la compactación es una operación muy importante en el proceso productivo y debe ser eficiente para mantener el ritmo de compactación ya que se pueden necesitar varias unidades de equipo extendido para trabajar al ritmo de un solo compactador vibratorio grande.

A continuación se mencionan los métodos más comunes de colocación del CCR :

#### Colocación con bachas.

El equipo que deposite al CCR debe de complementarse con equipo que lo extienda en capas de 20 a 30 cm de espesor al ritmo en el que el CCR sea transportado y compactado. Los tractores y las motoconformadoras son los equipos prácticos para este fin. El equipo montado sobre neumáticos es preferible, ya que el concreto no se adhiere a las llantas, lo que sucede en las orugas cuando se utilizan vehículos montados sobre estas. El extendido se facilita si el CCR se coloca en hileras o camellones. Los camiones o motoescrepas que transportan el CCR pueden operar sobre la superficie recién compactada sin afectar al concreto. Sin embargo, se tiene que evitar que este equipo circule sobre lodo y polvo, ya que las llantas sucias contaminan la superficie del CCR y se afecta la calidad de ésta, además de que se pueden

presentar problemas en las juntas.

#### Colocación continua.

Cuando el concreto se coloca con transportadores de banda en operación continua, lo mejor es tener la menor cantidad de equipo posible en el área de colocación para minimizar los movimientos de equipo. Para lograr esto, se tiene que conocer bien la producción del transportador para que la compactación pueda ser continua.

#### Combinaciones de equipo.

Puede resultar práctico el combinar la transportación por bachas (intermitente) con la continua cuando las condiciones de la obra y el equipo de extendido permitan aprovechar las ventajas de ambos procedimientos.

#### Bacha a transportador.

Las distancias largas de la planta de mezclado al área de colocación pueden imposibilitar el uso de un solo transportador de banda para recorrer la distancia completa; además se pueden presentar obstáculos en el terreno que no pueden ser sobrepasados por las bandas. En este caso se pueden combinar los transportadores de banda con otro tipo de equipo, como pueden ser camiones.



Equipo auxiliar.

Ciertos equipos originalmente diseñados para la colocación de otro tipo de materiales pueden ser adaptados para colocar CCR. Tal es el caso de las pavimentadoras o "finishers" que, previa modificación, se han utilizado con éxito en trabajos de pavimentación con CCR.

El siguiente paso es la compactación del CCR, que se describirá ampliamente en el siguiente capítulo.

## **CAPITULO IV**

**PROCEDIMIENTOS DE COMPACTACION  
DEL CONCRETO COMPACTADO  
RODILLADO**

#### **IV. - PROCEDIMIENTO DE COMPACTACION DEL CONCRETO COMPACTADO RODILLADO (CCR)**

Una vez colocado, el CCR debe de compactarse para reducir los vacíos al mínimo. En el concreto convencional esto se logra con vibración interna, la cual resulta laboriosa, lenta, costosa y además requiere de un estricto control de calidad. En el CCR la compactación se logra mecánicamente con rodillos vibratorios, lo que incrementa la producción, reduce la mano de obra y facilita el control de calidad.

Tanto el tamaño máximo del agregado como la graduación afectan la compactabilidad y la selección del equipo de compactación tanto en el campo como en el laboratorio. Mientras mayor tamaño tenga el agregado, más pesado tendrá que ser el equipo de compactación y se requerirá una energía más alta. Con agregados más pequeños, el tamaño del equipo necesario se reduce y las capas tendrán que ser más delgadas para que se logre una compactación uniforme.

La compactabilidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados con la graduación de los agregados. Generalmente, el CCR puede compactarse hasta reducir el contenido de vacíos a sólo 0.5 a 1.5% si se utiliza una graduación en la que exista la suficiente cantidad de partículas de tamaños menores para ocupar los espacios que dejan los tamaños mayores. La presencia de finos (partículas que pasan por la malla No. 200)

es deseable en mezclas pobres, por lo que no hay necesidad de lavar los agregados. El porcentaje típico de finos es del 5 al 10% en peso. Si no se incluyen finos en la mezcla, el contenido de vacíos aumentará y la compactación se hará más difícil, a menos que la deficiencia de finos sea compensada con la adición extra de cenizas volantes y/o cemento, lo que obviamente eleva el costo.

#### IV.1. - PROCEDIMIENTOS DE COMPACTACION

Existen muchos tipos de compactadores, pero no todos son aplicables o no pueden utilizarse para el CCR, pero aquí es donde quizá intervengan en mayor grado y dependiendo del volumen a compactar hacer mayor incapié en que clase de rodillo se va a utilizar, considerando todas las variables de peso, frecuencia de vibración, que se reflejarán en el número de pasadas que es necesario aplicar al CCR, ya que también influirá en el tiempo y costo de compactación.

##### EQUIPO PESADO :

Las pruebas iniciales al CCR indicaron que la compactación se lograba satisfactoriamente con el uso de compactadores vibratorios autopropulsados de doble tambor, con un peso de 10 toneladas. Los mejores resultados se obtuvieron con frecuencias mínimas de alrededor de 1500 cpm con una fuerza dinámica de 8.9 kg/mm. Debido a que este tipo de equipo es muy común y fue

utilizado en las primeras aplicaciones del CCR, se especificó su uso en la presa de Willow Creek, la primera en el mundo en ser completamente diseñada y construida aplicando el concepto del CCR. Puesto que el desempeño de este tipo de compactador fue satisfactorio, su uso ha sido especificado para un gran número de proyectos posteriores. Para una mezcla típica con un tamaño máximo de agregado de 3 pulg, con 4 pasadas del compactador se puede obtener un grado de compactación de 98 a 100%.

La experiencia a demostrado que se pueden obtener resultados aceptables con equipo de menor tamaño pero con mayor número de pasadas.

Los factores clave para obtener una compactación adecuada son una humedad correcta, una graduación apropiada, el control del tiempo de compactación, una frecuencia relativamente alta y una elevada energía de salida.

El personal familiarizado con el equipo que se utiliza con el CCR generalmente está compuesto por personas que trabajan con materiales para rellenos y enrocamientos, por lo que comúnmente olvidan que el CCR es un concreto real y que debe ser tratado como tal. El CCR debe ser compactado aproximadamente 10 minutos después de su colocación, ya que de no hacerse esto, la humedad disponible para la compactación disminuye por evaporación y por hidratación del cemento. Además, una compactación tardía puede afectar seriamente la resistencia inicial. Los materiales para rellenos pueden humedecerse y compactarse varias veces, pero hacer esto con el CCR resulta imposible.

Los datos iniciales que se han publicado a partir de pruebas de laboratorio indican que los compactadores neumáticos no compactan adecuadamente el CCR que se utiliza en presas; pero pueden utilizarse en las pasadas finales.

Durante la construcción de la presa Willow Creek la compactación se llevó a cabo mediante cuatro pasadas de compactadora vibratoria auto-impulsada, de rodillo doble, teniendo cada capa un espesor de 0.30 m de espesor.

Se han utilizado compactadores con el tambor revestido de goma en la construcción de pavimentos de CCR y se han obtenido buenos resultados. Generalmente se usan en conjunto con los compactadores vibratorios. Debido a que normalmente las mezclas para pavimentos no tienen agregados mayores de 25 mm (1 pulg) y tienen un mayor contenido de cemento, se puede obtener una superficie lisa con mayor facilidad.

Las pavimentadoras modificadas para CCR cuentan con una barra apisonadora trasera con la cual se obtienen grados de compactación de 95 a 98%. Posteriormente se debe compactar el pavimento con compactadores de neumáticos y/o de tambor de acero.

Cuando no hay soportes en los bordes del pavimento se tienen que tomar precauciones especiales ya que los rodillos tienden a empujar hacia afuera al material de los bordes. Se puede formar una grieta longitudinal paralela al borde entre 25 a 150 mm hacia adentro. Estos problemas se pueden minimizar manteniendo al compactador a una distancia de 25 a 50 cm del borde del pavimento. Si se daña el borde durante la compactación, se puede

retirar a mano el CCR dañado y el área retirada se puede sustituir al colocar la franja adyacente.

En México en la construcción de la presa La Manzanilla se utilizó para la compactación un rodillo liso vibratorio de 10 toneladas y para la presa Trigomil se empleo un rodillo liso vibratorio DYNAPAC CC-43 de 10 ton de capacidad. En la tabla No. 6 del Capítulo V se presenta un resumen del equipo de compactación que se ha utilizado en diversas obras construidas con CCR en México. Además en el Capítulo VI se describe en forma detallada las obras construidas empleando CCR en nuestro país y el equipo que se utilizó en las mismas.

#### EQUIPO LIGERO :

El equipo pesado de compactación no puede operar eficientemente en ciertas áreas durante la construcción de presas (cerca de la cimbra, de obstáculos, etc.). Se ha estudiado el comportamiento de algunos equipos de menor tamaño con resultados variables.

Los rodillos autopropulsables ligeros (hasta 2 ton) no vibratorios, aplanan la superficie pero no proporcionan una compactación profunda. Los compactadores vibratorios de placa utilizados en rellenos de arena son completamente inadecuados. Los rodillos vibratorios manuales se pueden utilizar en mezclas pobres colocadas en capas de hasta 23 cm. El equipo con fuerza dinámica de hasta 4.4 kg/mm puede compactar capas de 23 cm (9 pulg) o menos si se dan de 4 a 6 pasadas con un equipo de un

tambor. El equipo menor es generalmente inadecuado. La compactación completa en áreas reducidas se puede obtener con el uso de pisones vibratorios con un área de impacto de 0.09 a 0.18 m<sup>2</sup>, con una fuerza de aproximadamente 19,500 kg/m<sup>2</sup>, aunque no se obtiene una superficie lisa.

#### IV.2. - TIEMPO DE COMPACTACION

El CCR se colocará dentro de los treinta minutos siguientes al mezclado, es decir, una regla que se sigue es que debe depositarse a los 10 minutos posteriores al mezclado, extenderse dentro de los 10 minutos posteriores a la descarga y compactarse dentro de los 10 minutos posteriores a la colocación.

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, por lo que mientras más rápido sea compactado el CCR mejores serán los resultados.

Se ha observado que el personal acostumbrado a trabajar con concreto convencional tiende a darle más importancia a conceptos tales como tiempo, segregación, limpieza de la superficie y, en general, a todos los conceptos relacionados con una buena calidad del concreto, que a la obtención de una producción elevada. En cambio, el personal relacionado con la construcción de terraplenes y rellenos de roca y tierra tiende a obtener una

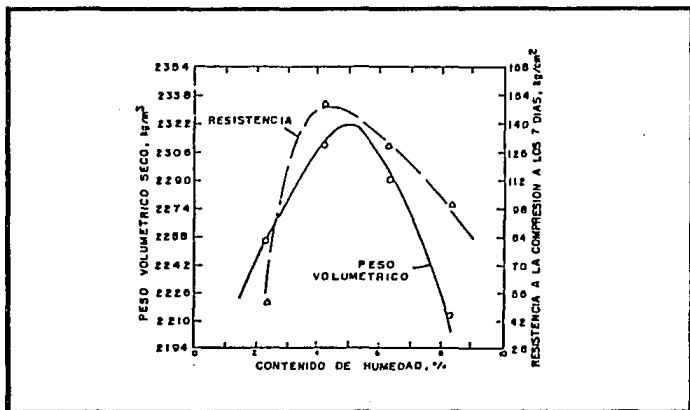


elevada producción de CCR, pero olvida que el material es un concreto real y que no puede ser rehumedecido o recompactado. Además, no aprecian el hecho de que el proceso de hidratación del cemento se inicia inmediatamente después del mezclado y por ello no puede haber esperas o retrasos en la compactación. Si esto ocurre, la resistencia y el peso volumétrico del CCR serán menores a los especificados, aunque en apariencia se encuentre bien compactado.

En el CCR la sobre compactación 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, esta pérdida de resistencia se puede demostrar en el campo. Los tractores utilizados para extender el CCR no debe operar en capas compactadas recientemente ya que las orugas tienden a desprender el CCR compactado. Si el material desprendido se recompacta dentro de los 20 minutos posteriores a su mezclado y dentro de los 10 minutos posteriores al daño, su compartimiento a largo plazo será aceptable. Si éstos límites de tiempo se exceden, el material recompactado tendrá una resistencia muy baja o nula. Una prueba de campo simple para verificar si la recompactación del CCR fue adecuada consiste en la aplicación de aire comprimido sobre el área recompactada. El material que no haya adquirido la resistencia adecuada se desprenderá con facilidad.

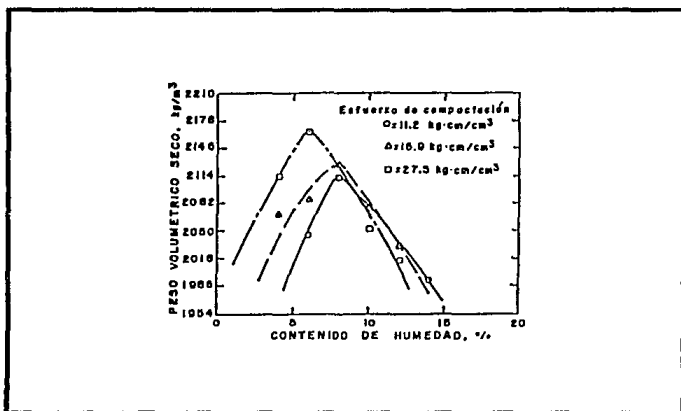
#### IV.3. - HUMEDAD OPTIMA

Una vez que el material haya salido de la mezcladora, durante el proceso de colocación y compactación no es permitido añadir agua, debiéndose suspender la colocación del concreto en caso de lluvia, ya que al afectar el contenido óptimo de humedad, se afecta el peso volumétrico y por lo tanto la resistencia del concreto compactado. Cada mezcla tiene un contenido óptimo de humedad con el cual se puede obtener el peso volumétrico seco máximo con un esfuerzo de compactación dado y bajo ciertas condiciones de campo. Si la humedad es superior o inferior a la óptima, el peso volumétrico será menor. En la gráfica VIII se muestra la relación que existe entre el peso volumétrico y la resistencia, con diferentes contenidos de humedad. La resistencia máxima se obtiene aproximadamente con el contenido óptimo de humedad, al igual que el peso volumétrico seco máximo.



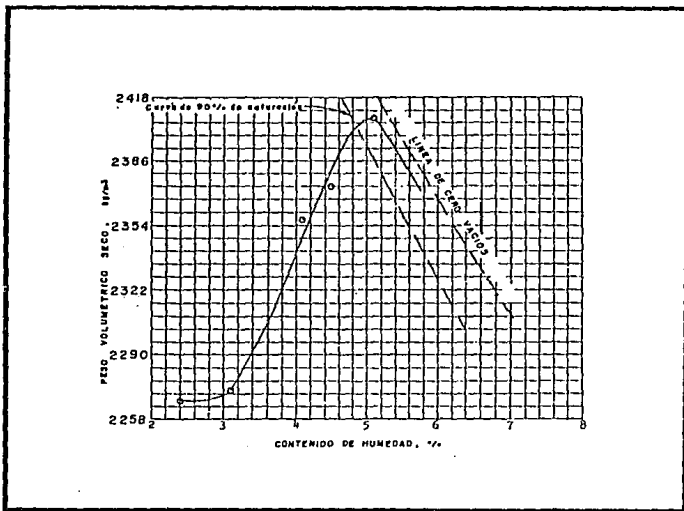
Gráfica VIII Relación entre el peso volumétrico y la resistencia.

En la gráfica IX se muestran las curvas de contenido de humedad-peso volumétrico para diferentes esfuerzos de compactación. Las pruebas de laboratorio utilizadas para obtener el contenido óptimo de humedad y su correspondiente peso volumétrico seco máximo son similares a las utilizadas en la compactación de suelos. Con éstos procedimientos de compactación en el laboratorio (con pisón o por vibración) se fabrican también los cilindros de prueba.



Gráfica IX Curvas de contenido de humedad-peso volumétrico seco.

En la gráfica X se muestra la curva de compactación resultante en una mezcla de CCR compactada utilizando un método modificado consistente en la aplicación de 55 golpes a cada una de 5 capas colocadas en un molde de 15 cm (6 pulg) de diámetro, con un pisón de 4.5 kg (10 lbs) que se deja caer de una altura de 46 cm (18 pulg). Este fué el resultado de un experimento realizado por la Estación Experimental de Vías Fluviales del Ejército de los E.U. y se determinó que los rodillos vibratorios deben operar en mezclas de CCR con un contenido de humedad 1% menor a la óptima para evitar que el rodillo se hunda en la mezcla.



Gráfica X Curva de compactación resultante de una mezcla de CCR.

Se puede utilizar un aparato Vebe modificado para determinar la humedad necesaria para una adecuada compactación en el campo. Este procedimiento se puede usar bajo ciertas condiciones, pero no es necesariamente aplicable a cualquier condición de campo.

Si hay limitaciones en el equipo de laboratorio o en la experiencia de los operadores no se podrán establecer las proporciones de la mezcla de CCR que se deberá de utilizar en el proyecto. Si los cilindros para determinar el peso volumétrico o la resistencia se hacen con métodos deficientes (tamaño

inadecuado del molde, baja energía de compactación), los resultados de las pruebas no serán representativos de las condiciones existentes en el campo, ya que generalmente serán inferiores a los que se pueden obtener. Esto puede dar como resultado que se utilice un exceso de cemento o ceniza volante y una especificación más estricta para los agregados, es decir, que se sobrediseñe la mezcla innecesariamente. Durante la construcción se tienen que comparar los resultados obtenidos en el laboratorio con los resultados de campo para determinar su similitud.

Si la prueba Vebe modificada para determinar la trabajabilidad es utilizada para una mezcla compactable en el campo pero que no lo sea en el laboratorio, se requerirá de un porcentaje adicional de cemento, ceniza volante y/o agua. En Japón éste problema se ha solucionado ya que han desarrollado un aparato tipo Vebe de mucho mayor tamaño que trabaja adecuadamente con mezclas de CCR con agregados grandes. Este aparato, además de ser mucho más grande, usa una frecuencia más alta y proporciona una energía de compactación mucho mayor que el aparato Vebe convencional.

Una ventaja más del CCR consiste en que los supervisores con experiencia pueden determinar visualmente si a la mezcla le sobra o le falta agua. Si la mezcla tiene un ligero exceso de humedad (alrededor de 0.3%), se formarán ondas en la mezcla con el paso del equipo y además el material se adherirá al tambor del compactador. Si la mezcla está demasiado seca, habrá segregación

y será difícil compactarla al peso volumétrico adecuado. Si hay supervisión continua, se pueden hacer ajustes inmediatos en la mezcla cuando sea necesario. No es raro que se presente la necesidad de hacer ajustes en el contenido de humedad de 0.1% cada 30 minutos cuando las condiciones ambientales y de temperatura cambien continuamente o, por el contrario, se pueden presentar períodos de 10 horas continuas durante las cuales no se requiera variar el contenido de agua.

#### IV.4. - PRESION DE PORO

Si el exceso de volumen de agua es mayor que el volumen de vacíos en el CCR compactado, se desarrolla una presión de poro. Dicha presión de poro no es común cuando se trabaja con concreto convencional. Uno de los efectos perjudiciales que acarrea la presencia de ésta presión es la reducción de la resistencia al corte.

La presión de poro es una presión interna que tiende a separar a las partículas de los agregados. Estas partículas sólo pueden acercarse unas a otras si el agua que las separa es desplazada. Al pasar los compactadores se genera un movimiento de las partículas que altera la estabilidad interna de la mezcla al estarse hidratando. La acción de un camión que se desplaza continuamente sobre una mezcla con un exceso de agua y de presión de poro equivale a deformar continuamente un cilindro de concreto convencional contenido en un molde de plástico o de cartón, en

lugar de protegerlo mientras se lleva a cabo el fraguado.

El exceso de agua causante de la presión de poro tiende a emigrar a la superficie de la capa de CCR colocada. Esto deja un volumen extra de vacíos y además se produce microagrietamiento por el paso del agua y se contamina la superficie, lo que interfiere con la unión de las capas superiores. En el concreto convencional esto equivale al agua del sangrado.

El exceso de agua que causa los problemas relacionados con la presión de poro es extremadamente bajo, ya que el porcentaje de vacíos en una mezcla bien graduada es tan pequeño (0.5 a 1.5%) que el agua no tiene hacia donde desplazarse. Durante la construcción resulta evidente el exceso de agua por la acción del compactador y el supervisor debe hacer los ajustes inmediatos para corregir la situación.

#### IV.5. - RELACION AGUA CEMENTO

En las mezclas típicas de CCR, los ajustes de hasta 50% en el contenido de cemento o material cementante (cemento + cenizas volantes) tienen poco efecto en la demanda de agua. Se puede llegar a cierto punto en el que la adición de material cementante aumente el contenido de agua requerido, pero éste aumento en la humedad está relacionado básicamente con la compactación de la mezcla y no con el contenido de cemento. Dado que la mezcla fresca tiene un comportamiento similar al de un material térreo, la adición de material cementante extra tiene un efecto parecido



al de simplemente agregar finos minerales inertes. En la tabla No.5 se muestran los requerimientos típicos de agua para mezclas de CCR elaboradas con el mismo tipo de agregados y colocadas con el mismo equipo.

E.K. Schrader señala que la relación agua-cemento tiene limitaciones como herramienta de diseño para mezclas de CCR debido a que se debe contar con un contenido óptimo de humedad para controlar la compactación, independientemente del contenido de cemento.

TMA (pulg)	CEMENTO (kg/m <sup>3</sup> )	CENIZA (kg/m <sup>3</sup> )	AGUA TOTAL (% en peso)	AGUA SOBRE EL ESTADO SSS (% en peso)
3	48	19	6.1	4.4
3	104	0	6.1	4.5
3	104	48	6.2	4.5
1 1/2	187	80	6.6	4.8

Tabla No.5 Requerimientos típicos de agua para mezclas de CCR.

Sin embargo, se pueden desarrollar curvas para mezclas de CCR que muestren el efecto de la relación agua-cemento en la resistencia. Este tipo de curvas tiene mejor aplicación en las mezclas de CCR con alto contenido de cemento. Existe la duda de si el decremento de la resistencia al aumentar el contenido de agua se debe a una relación agua-cemento más alta o si se debe al menor peso volumétrico. Si se disminuye la relación agua-cemento al punto de que no exista la humedad suficiente para una adecuada compactación, también decrecerá la resistencia del CCR

endurecido. De cualquier manera, existe un estrecho rango de contenido de agua que permite obtener un CCR de consistencia adecuada para trabajarlo en campo. La cantidad de agua requerida para la compactación depende de las características de los agregados, del contenido de cemento y de las condiciones de campo y debe utilizarse independientemente de la relación agua-cemento. En el CCR la relación agua-cemento puede variar de 0.4 a 2.0 para que el revenimiento sea nulo. Si el contenido de cemento se aproxima a cero, la relación agua-cemento tiende a infinito y, aún así, el revenimiento se mantiene nulo. En general, la variación de la resistencia se puede atribuir a los cambios en el contenido de cemento y no necesariamente a los cambios en la relación agua-cemento.

Varios autores han encontrado limitaciones en la "ley de Abrams" sobre la relación agua-cemento (en la cual considera que la resistencia del concreto es inversamente proporcional a dicha relación) ya que se ha establecido que el diseñar mezclas "no convencionales" de concreto basándose únicamente en la relación agua-cemento puede ser un serio error. El Dr. Duff Abrams estipuló que su ley sólo era aplicable a mezclas trabajables. Dado que el CCR es un concreto "no convencional" y de difícil trabajabilidad (cero revenimiento), se debe hacer énfasis en la utilización del contenido óptimo de agua para la compactación con el contenido mínimo de cemento para lograr la resistencia mínima necesaria. Por todo lo anterior, la relación agua-cemento no es un parámetro importante para diseñar mezclas de CCR. Además, si

se quieren obtener relaciones agua-cemento bajas y se intenta lograr esto aumentando el contenido de cemento, se incrementará el costo, la contracción y el potencial de agrietamiento en el concreto.

Las mezclas de CCR con una graduación apropiada y además con un contenido de humedad y una compactación adecuados, tendrán una impermeabilidad y un peso volumétrico similares o aún mejores que los del concreto convencional. Si se quiere mejorar la calidad de la mezcla reduciendo la relación agua-cemento mediante la disminución de la cantidad de agua, no se obtendrá la compactación adecuada, el peso volumétrico decrecerá y la permeabilidad se incrementará.

#### IV.6. - ESPESOR DE LAS CAPAS

En los primeros estudios sobre el CCR se usaban capas con un espesor de 15 a 23 cm (6 a 9 pulg). Se ha aumentado el espesor de las capas, ya que se minimizan las juntas horizontales, las cuales originan filtraciones, segregación y zonas de baja resistencia al corte. Cuando se utiliza CCR para pavimentos, la tendencia es colocar capas más delgadas, teniendo la capa superior entre 13 y 23 cm (5 a 9 pulg) con agregados más pequeños para obtener una superficie más uniforme.

Las juntas horizontales de construcción pueden ser planeadas o pueden presentarse de manera imprevista. Cuando una capa no se cubre al empezar su fraguado inicial, deja de ser trabajable y se

transforma en junta fría o junta de construcción no planeada. El tiempo de fraguado varía con la temperatura, el contenido de cemento de la mezcla, y el tipo y las características retardantes de los aditivos, si los hay. Con relación a esto, parece haber una ventaja definitiva en el uso de aditivos retardantes del fraguado ya que se puede prolongar el tiempo disponible para el trabajo y se cuenta con cierta holgura en el caso de retrasos imprevistos.

El tratamiento de las juntas horizontales de construcción para el CCR difiere para el concreto convencional en el hecho de que no aparece agua superficial durante el fraguado. Esto es, no se forma la película superficial de lechada comúnmente llamada "nata". La aparición del agua superficial es el resultado del sangrado o separación del exceso de agua del gel del cemento, la cual es desplazada a la superficie por los materiales más pesados. La cantidad de agua de sangrado es proporcional al volumen de pasta en la mezcla y al espesor promedio de pasta que cubre a los agregados y a los finos minerales. El CCR contiene un 25% menos de pasta que el concreto convencional y la reducción proporcional en el espesor de la capa que cubre a los agregados es aún mayor debido al mayor volumen de agregado. Es común que durante la consolidación completa del CCR aparezca pasta en la superficie; sin embargo, esta pasta no se debilita con la adición subsecuente de agua y, si se cura apropiadamente, no habrá necesidad de removerla antes de colocar otra capa.

Si la junta de construcción se mantiene limpia y húmeda

mientras está expuesta, no se requerirán tratamientos especiales. Si la superficie se ha dejado secar completamente, entonces se tiene que limpiar con chorros de arena húmeda.

Se ha demostrado que se puede lograr una unión satisfactoria entre juntas horizontales de construcción mediante el uso de mezclas de "estratificación" con un tamaño máximo de agregado de 38 mm (1 1/2 pulg) o aún menor, y con un volumen de pasta al menos 20% mayor que el volumen mínimo de pasta que produzca la máxima densidad. Generalmente ocurre cierta segregación durante el manejo y extendido del concreto sobre una junta de construcción endurecida, independientemente del tamaño máximo de agregado. La mezcla de estratificación debe, por lo tanto, tener un exceso de pasta suficiente para fluir durante la compactación y llenar los vacíos entre las partículas segregadas. La consistencia de la mezcla de estratificación debe ser "muy húmeda" para poder ser usada antes de la colocación de capas gruesas y tiene que distribuirse en una capa de aproximadamente 8 cm (3 pulg) de espesor y cubrirse con una capa de CCR de espesor suficiente, antes de ser compactada. Bajo éstas condiciones, la resistencia a la tensión de la masa de concreto se asegura en la junta de construcción. Los requerimientos esenciales de la mezcla de estratificación parecen ser un exceso de pasta, un exceso de humedad y un exceso de resistencia con relación a la mezcla masiva de CCR. No parece haber ventajas con el uso de un tamaño máximo de agregado menor a 19 mm (3/4 pulg) en la mezcla de estratificación. Cuando la mezcla masiva contiene un tamaño

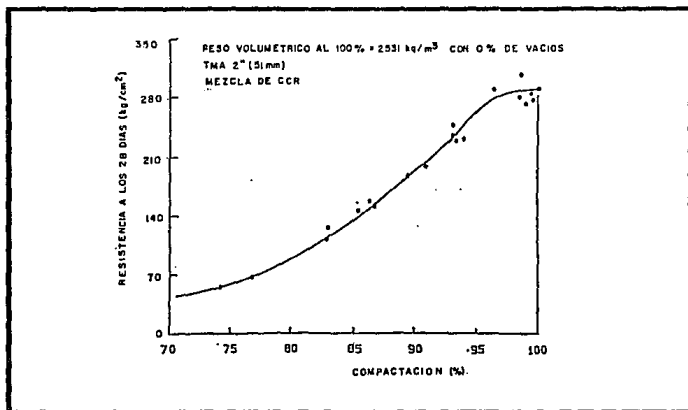
máximo de agregado de 38 mm (1 1/2 pulg) puede ser posible una unión completa sin la necesidad de una mezcla de estratificación especial, si se proporciona un exceso de volumen de pasta en la capa subsecuente. Sin embargo, el exceso de agua puede provocar problemas en el soporte de los rodillos vibratorios.

En los Estados Unidos los compactadores más utilizados han sido los de 10 toneladas de peso y se ha visto que actúan efectivamente dando de 3 a 6 pasadas a capas con espesores desde 23 hasta 61 cm. Los compactadores pequeños no son muy efectivos con éstos espesores de capa. En Japón se acostumbra a compactar capas de hasta 1 m, las cuales constan de 3 subcapas pero se compactan en una. El hecho de colocar varias subcapas ayuda a controlar la segregación y proporciona cierta precompactación.

Estudios recientes del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los E.U. han demostrado que las capas de 60 cm de espesor y con un T.M.A. de 3 pulgadas pueden compactarse satisfactoriamente si el contenido de agua es un poco superior al normal.

En la construcción de presas de CCR se pueden presentar áreas en las cuáles el peso volumétrico del concreto compactado sea menor al especificado. Sin embargo, mientras el peso volumétrico promedio sea mayor al especificado, éstas áreas aisladas no son críticas. En la construcción de pavimentos de CCR sí es importante reconocer la posibilidad de que se presenten áreas de bajo peso volumétrico y por ende de menor resistencia, ya que en éste caso el área débil no se encuentra rodeada de material más resistente, como sucede en el caso de las presas.

Con unas dos pasadas del compactador vibratorio pesado, el CCR se aproxima a su peso volumétrico máximo, el cual alcanzará con un promedio de tres a cuatro pasadas. En la gráfica XII se puede apreciar que conforme el peso volumétrico del CCR se aproxima a su máximo, la resistencia varía cada vez menos si se dan pasadas adicionales. Con esto se ha determinado que el exceso de compactación es perjudicial para el desarrollo de la resistencia.



Gráfica XII Resultados de una prueba de compactación de una mezcla de CCR.

#### IV.7. - PRUEBAS PARA DETERMINAR EL PESO VOLUMETRICO

Debido a la velocidad de producción, la determinación del peso volumétrico es esencial para determinar el grado de compactación obtenida en el campo. En el laboratorio se puede determinar extrayendo los especímenes endurecidos del molde y pesándolos. El volumen se obtiene mediante métodos de desplazamiento de agua y de esta forma se determina el peso volumétrico.

En la tabla No.6 se presenta un resumen de los resultados de pruebas de laboratorio en las que se utilizaron dos distintos métodos de compactación vibratoria, el de sobrecarga que consiste de una placa de acero y un molde vibratorio y el del pisón neumático accionado por un compresor. De estos resultados se deduce que el método del pisón neumático es el más indicado, pues con éste se obtienen los pesos volumétricos más altos.

Tamaño del molde	15 x 30		15 x 30	
	Sobrecarga P.V.	Pruebas	Pistón P.V.	Pruebas
Mezcla 1 (TMA 3 pulg)	2342	29	2458	221
Mezcla 2 (TMA 3 pulg)	2318	11	2453	228
Mezcla 3 (TMA 3 pulg)	2310	24	2447	228
Mezcla 4 (TMA 1.5 pulg)	2355	17	2467	183
		81		860
TOTAL DE PRUEBAS	2331		2456	
PROMEDIO				

Tabla No.6



En el campo, la mejor manera de medir el peso volumétrico es con un densímetro nuclear. El contenido de humedad se determina simultáneamente con el peso volumétrico y así se puede conocer el grado de compactación alcanzado.

Es sumamente importante calibrar el densímetro para cada mezcla diferente de CCR. La experiencia ha demostrado que los errores pueden ser de aproximadamente  $\pm 4\%$  si el densímetro no es calibrado adecuadamente. Se tienen que practicar perforaciones en el CCR para poder introducir los vástagos del densímetro. Generalmente se utiliza el peso volumétrico promedio para determinar el grado de compactación.

La medición del peso volumétrico se tiene que llevar a cabo inmediatamente después de la compactación para que las pasadas adicionales del compactador se apliquen de manera inmediata en caso necesario. Si se deja pasar 1 hora, la mezcla endurece y resulta muy difícil introducir los vástagos del densímetro nuclear.

Los métodos de sustitución con arena y el del globo se han utilizado pero son extremadamente difíciles de ejecutar en CCR. Una mezcla típica de CCR no se puede excavar a mano con facilidad y ésto implica que la excavación del sondeo tome más de una hora. Además, el material adyacente al sondeo se ve alterado.

#### IV.8. - 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 forman parte de un PG 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 períodos 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 tienen cuidado con él. Por otra parte, si se tiene personal de inspección, es difícil para ellos aceptar los requisitos y métodos relacionados con el CCR.

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.

Para asegurar la calidad en la construcción de CCR debe darse especial atención al control anticipado de los materiales utilizados, debido a que resulta ineficiente realizar las pruebas de control de calidad cuando el concreto lleva ya 28 o 90 días de colocado y que además no resulta seguro hacer pruebas a los 2 días de edad, el control de calidad se debe llevar a cabo mediante pruebas e inspecciones a los materiales que componen el CCR antes de mezclarlos, además de revisar periódicamente las

plantas de producción de agregados y de mezclado del concreto; a diferencia de colocarlo y depender después de pruebas de aceptación.

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.

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.

#### **IV.B.1. - CONTROL DE LA 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 promedios diarios. En la presa Willow-Creek, el material no plástico (ASTM C117, ASTM D4318) 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.

#### IV.8.2. - CONSISTENCIA DEL CCR

Normalmente la descripción de la consistencia del concreto mediante ensayos 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 Vebe modificado, se ha utilizado 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 resulto adecuada.

Los estándares del ACI 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 los cilindros, los cuales generalmente no se tienen disponibles sino hasta pasados ciertos días, semanas o meses después de que el concreto sea colocado. El problema en el caso del CCR es que antes de disponer de cilindros que permiten saber la resistencia del concreto y hacer ajustes en caso necesario para cumplir con resistencias de diseño a 90 o más días, y 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 ensayes para evaluar la variabilidad del concreto producido en comparación con los índices permitidos.

Normalmente la calidad del concreto es controlada por ensayes 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 ensaye 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 aumentando la resistencia. Particularmente en el CCR más resistencia no significa mejor calidad.



#### IV.8.3. - MONITOR DE LA CALIDAD DEL CONCRETO

El Monitor de la 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-Vail). 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 delgado 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 el 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.

#### IV.8.4. - 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 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 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
Diámetro 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

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.

En el 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% 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 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 ensaye 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 (MND) utilizando el modo de transmisión directo. 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.

#### IV.8.5. - CURADO Y PROTECCION

Los requerimientos de curado y protección del CCR son similares a los del concreto convencional, ya que se deben de mantener las condiciones de humedad y temperatura favorables para la hidratación del campo.

##### CURADO :

El CCR debe mantenerse continuamente húmedo durante 7 días o hasta ser cubierto por una capa de concreto adicional. Se puede utilizar agua, arena u otros materiales que cubran al CCR pero que puedan ser removidos de la superficie con facilidad. Las superficies que estarán permanentemente expuestas pueden cubrirse con agua, compuestos curantes de membrana líquida, asfalto, algún otro líquido o incluso tierra. No es necesario el curado de la superficie compactada bajo condiciones constructivas en las cuales se aplican capas sucesivas sin permitir el secado de la superficie expuesta.

#### PROTECCION :

En climas cálidos o en condiciones climáticas en las cuales la pérdida de agua superficial es acelerada, es necesario proteger al CCR. En éstas condiciones es necesario añadir agua a la superficie para sustituir la humedad evaporada. La mayoría de los problemas que generalmente se presentan en la construcción del concreto en climas cálidos, tales como el incremento en la demanda de agua, la pérdida de revenimiento y el agrietamiento por contracción plástica, no son severos en el CCR debido principalmente al bajo requerimiento de agua y los métodos de transporte, colocación y compactación utilizados. Sin embargo, se tienen que tomar ciertas medidas para controlar la temperatura cuando el agrietamiento térmicamente inducido sea importante.

En clima frío se tiene que proporcionar una protección suficiente a las superficies expuestas durante 7 días después de la colocación cuando las temperaturas del aire se esperen iguales o menores a la temperatura de congelación. Esta protección se puede lograr con esferas aislantes, paja, tierra o algún otro material aislante.

#### IV.8.6. - PRUEBA DE EVALUACION DEL MEZCLADO Y COLOCACION

Conviene hacer notar que los resultados de las pruebas que se realicen en especímenes ensayados en el laboratorio, sólo servirán para el diseño preeliminar 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.

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.

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 CCR cuando se interrumpa la colocación del material por uno o más días.

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 de las 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.

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.

El coeficiente promedio de variación de resistencia de los cilindros, es aproximadamente 2.7 veces el coeficiente promedio de variación de las propiedades de la mezcla fresca, según pruebas que se realizaron en mezclas frescas de varios proyectos de CCR. 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



deseo 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 tienen 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.

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 bacha (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.

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 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 ensaye se realiza en una porción de mortero de la mezcla después de criba.

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 pulg, 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 ensaye.

Cada uno de estos procedimientos (ASTMC-94 y CRD-C 55) fue desarrollado para mezclas de concreto convencional y cada uno evalúa la eficiencia de la mezcladora. El mezclado de materiales de CCR 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.

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.

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

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 ensayos. Si en los documentos del contrato no se especifica un tiempo inicial de mezclado, éste 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 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 equivalente en metros cúbicos por minuto.

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 ensayo 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.

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 °C (40 a 80 °F).

## **CAPITULO V**

**SELECCION DEL EQUIPO DE  
COMPACTACION Y CALCULO DEL  
COSTO DE COMPACTACION POR M<sup>3</sup> DE  
CCR**

## **V. - SELECCION DEL EQUIPO DE COMPACTACION Y CALCULO DEL COSTO DE COMPACTACION POR M3 DE C.C.R.**

La selección del equipo adecuado para la compactación del CCR, es el punto crítico sobre el cual radica la economía de este procedimiento constructivo. Aunque es muy importante analizar 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 realizable.

### **V.1. - COMPACTADORES**

Existen varios tipos de compactadores, pero su diferencia fundamental radica en la forma de compactar. Principalmente se tienen los compactadores de neumáticos y los metálicos.

#### **V.1.1. - 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 autopropulsables y se pueden dividir en cuanto al tamaño de sus llantas en : de llantas pequeñas y 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, tienen 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).

#### V.1.2. - COMPACTADORES METALICOS

Existen dentro de los compactadores metálicos dos grandes grupos que son los compactadores estáticos y vibratorios.



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

#### V.1.2.1. - 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 kg 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.

#### V.1.2.2. - 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 por 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.

#### V.2. - EQUIPO DE COMPACTACION APLICABLE AL C.C.R.

Debido a la gran variedad de marcas y tipos de compactadores de rodillos lisos vibratorios (individuales o tándem) actualmente en el mercado, no representa ningún problema el disponer de un compactador que sea aplicable al CCR. Sin embargo, se deben de mantener dentro de ciertos límites algunas características

técnicas del equipo para obtener resultados satisfactorios.

A continuación se presentan las características de los compactadores vibratorios que se han utilizado en la mayor parte de las obras construidas con CCR.

Ancho del tambor	1.67 a 2.44 m
Peso estático	7 a 14 ton (en la mayoría de los casos 10 ton.)
Diámetro del tambor	1.22 a 1.67 m
Fuerza dinámica	8 a 9.8 kg por mm de ancho del tambor
Velocidad	2.4 km/hr máximo
Frecuencia	1800 a 2500 vibr/min
Amplitud	0.8 mm

Estos datos son generales y no necesariamente se tienen que respetar todos los límites ya que, por ejemplo, un compactador de 10 toneladas con una frecuencia menor de 1800 vibr/min puede compactar satisfactoriamente al CCR. Los compactadores deben ser autopropulsables de uno o dos rodillos lisos vibratorios en tándem para proporcionar un mayor rendimiento.

A continuación se mencionan las marcas más importantes de compactadores así como los modelos aplicables al CCR.

## DYNAPAC

Modelo CC 43 : Rodillo vibratorio tándem.

Peso estático (por tambor) :	10.8 ton
Anchura de compactación :	1670 mm
Amplitud nominal :	0.4/0.8 mm
Fuerza centrífuga (en cada tambor)	5000 kp/10000 kp
Frecuencia :	Hasta 2500 vibr/min

Este compactador tiene tracción y vibración en ambos cilindros, así como doble amplitud. Este modelo se utilizó en la construcción de la presa Trigomil.

Modelo CA 25 : Rodillo vibratorio de tambor individual.

Peso estático :	9.7 ton
Anchura de compactación :	2132 mm
Amplitud nominal :	0.8/1.6 mm
Fuerza centrífuga :	8200 kp/16600 kp

Existen dos versiones CA25 std y CA 25D (con motor de tracción en el cilindro). Además cuenta con doble amplitud.

## BOMAG

Modelo EW 210 : Rodillo vibratorio de tambor individual.

Peso estático :	7938 kg
Diámetro del tambor :	1499 mm
Ancho del tambor :	2134 mm
Amplitud (doble) :	2.7 mm

Frecuencia : 1400 a 1850 vibr/min

Modelo BW 210D : Rodillo vibratorio de tambor motriz.

Peso estático : 8664 kg

Diámetro del tambor : 1499 mm

Ancho del tambor : 2134 mm

Amplitud (doble) : 2.6 mm

Frecuencia : 1450 a 1850 vibr/min.

#### TAMPO

Modelo RS-188A : Rodillo vibratorio tándem.

Peso estático (por tambor) 7250 kg

Diámetro de cada tambor : 1524 mm

Ancho del tambor : 2134 mm

Amplitud : 0.74 mm

Frecuencia : 2200 vib/min

#### RAYGO

Modelo 400-A : Compactador vibratorio de un rodillo liso.

Peso estático : 9072 kg

Frecuencia : 1100 a 1500 vibr/min

Este compactador tienen la desventaja de tener una frecuencia de vibración muy baja.

Modelo 600-A : Compactador vibratorio de un rodillo liso.

Peso estático : 12927 kg

Frecuencia :

1100 a 1500 vibr/min

INGERSOLL-RAND

Modelo SP-60 : Compactador vibratorio de un rodillo liso.

Peso estático : 9752 kg

Frecuencia : 1400 vibr/min

Diámetro del tambor : 1520 mm

Ancho del tambor : 2540 mm

En la tabla No. 6 se presenta un resumen del equipo utilizado en México.

EQUIPO	OBRA
Rodillo estático ROLL-O-MATIC (TRICICLO) Rodillo vibratorio INGER SOLL Rand SP-48 Compactador de neumáticos BROS RED SEAL	PAVIMENTACION DEL TRAMO CIUDAD JUAREZ, CHIHUAHUA.
Compactador estático de 10 ton Compactador vibratorio DYNAPAC CA-25 Compactador de neumáticos de 7 ton	PAVIMENTACION DE UN TRAMO DE LA AUTOPISTA MEXICO-CUERNAVACA.
Compactador de rodillo liso vibratorio de 10 ton	PAVIMENTACION DEL PATIO DE CONTENEDORES DEL PUERTO DE VERACRUZ.
Rodillo liso vibratorio de 10 ton	PRESA "LA MANZANILLA"
Rodillo vibratorio de 10 ton DYNAPAC CC-43	PRESA "TRIGOMIL"

Tabla No. 6 Equipo de compactación usado en obras construídas en México.

### V.3. - FACTORES A CONSIDERAR PARA UNA COMPACTACION ECONOMICA

La selección del equipo adecuado requiere que prácticamente se establezcan las características que debe reunir dicho equipo. Estas se pueden resumir en cuatro puntos :

- 1.- El equipo adecuado debe proporcionar los pesos volumétricos requeridos.
- 2.- Debe obtener estos pesos volumétricos con el menor costo posible.
- 3.- Tiene que ser adaptable a las características de la obra.
- 4.- Tiene que estar respaldado por un sistema de servicios apropiado.

Generalmente resulta conveniente elegir el equipo más pesado disponible, lo que permite la colocación de capas de mayor espesor y la consecuente reducción en los costos resultantes del menor uso de los tractores para extender el CCR. También se obtienen ahorros en el salario del operador. Aunque el costo horario de los compactadores remolcados es menor que el de los autopropulsados, siempre es preferible el uso de éstos últimos.

Otros factores que pueden influir en la selección del equipo de compactación son la disponibilidad de servicios de consultoría, capacitación y de mecánicos entrenados, así como la facilidad para conseguir refacciones.

### V.3.1. - CALCULO DEL COSTO DE COMPACTACION

Para poder calcular los costos totales de la compactación, se tiene que conocer el costo unitario o costo por m<sup>3</sup> compactado. Este costo unitario se calcula con la siguiente fórmula :

$$C.U. = HMD / Q$$

En donde :

C.U. = costo unitario de la compactación (\$ / m<sup>3</sup>).

HMD = costo horario del compactador (\$ / hr).

Q = capacidad del compactador (m<sup>3</sup> / hr).

El costo horario del compactador, esta integrado por la suma de los siguientes cargos :

a ) . - Cargos fijos :

Son los que se derivan de los correspondientes al :

- Cargo por depreciación.
- Cargo por inversión.
- Cargo por seguros.
- Cargo por mantenimiento mayor y menor.

b ) . - Cargos por consumos :

Los cargos por consumo son los que se derivan de las erogaciones que resulten por el uso de :

- Combustibles.
- Otras fuentes de energía.
- Lubricantes.



- Llantas.
- Piezas especiales de desgaste rápido.

c ) . - Cargos por operación :

Es el que se deriva de las erogaciones por concepto de pago de salario al personal encargado de la operación de la máquina.

La capacidad horaria del compactador (Q) se calcula con la siguiente fórmula :

$$Q = 1000 \times F ((A \times V \times E) / P)$$

En donde :

Q = Capacidad horaria del compactador (m<sup>3</sup> / hr).

F = Factor de eficiencia.

A = Ancho del tambor (m).

V = Velocidad de trabajo (km / hr).

E = Espesor de las capas (m).

P = Número de pasadas para obtener el peso volumétrico especificado.

V.3.2. - REDUCCION DEL COSTO DE COMPACTACION

Al aplicar la fórmula  $C.U = HMD / Q$  resulta obvio que si se quiere reducir el costo C.U al mínimo, se tiene que reducir HMD e incrementar Q. A continuación se describen algunas formas de lograr esto.

a ) . - Reducción del costo del compactador (HMD) :

El costo y la capacidad de un compactador están directamente relacionados. En los trabajos de compactación se toma en cuenta como el factor más importante la capacidad del compactador. Mientras más grande sea el compactador, menor será el costo por m<sup>3</sup> compactado. Por lo tanto, mientras más grande sea la obra, mayor será la diferencia en el costo total de compactación. Además, los compactadores más pesados permiten la colocación de capas de mayor espesor, reduciendo de esta manera los costos de los tractores y de las motoconformadoras utilizadas en la colocación de las capas, así como el costo de operación.

Cuando hay disponibilidad para rentar equipo de compactación usado, esto puede resultar conveniente siempre y cuando dicho equipo sea confiable y cumpla con los requisitos de selección.

b) . - Aumento de la capacidad del compactador (Q) :

Una vez puesto a trabajar el equipo de compactación, su capacidad horaria efectiva tiene que ser medida a la capacidad efectiva del compactador es menor que su capacidad teórica. Esta reducción se debe a que en la práctica un compactador no trabaja durante una hora en la misma dirección, y los cambios de dirección consumen tiempo no efectivo. Resulta obvio que el equipo que puede trabajar en ambas direcciones reduce la magnitud de los tiempos muertos en comparación con aquel que sólo puede trabajar en una dirección y que requiere de maniobras lentas para poder llevar a cabo las pasadas posteriores. Debido al requerimiento de traslapar las pasadas de las franjas paralelas sobre las franjas ya compactadas, el factor de eficiencia "F" se

ve reducido.

Otro factor que debe ser tomado en cuenta para poder obtener una capacidad alta es el rendimiento del operador de la máquina. Es muy común que los operadores del equipo de compactación tengan poco interés en llevar a cabo su trabajo minuciosamente, ya que generalmente son trabajadores menos calificados que los trabajadores de otro tipo de equipo (tractores, motoconformadoras, etc.). Esto da como resultado que no se obtenga el grado de compactación requerido. Sin embargo, esto se puede solucionar haciendo ver al operador del compactador lo importante que resulta su desempeño y haciéndolo responsable de las operaciones de compactación.

Se tiene que prestar especial atención al factor de eficiencia, que se define de la siguiente manera :

$$F = \text{capacidad real/capacidad teórica}$$

Sin embargo, la capacidad "Q" depende principalmente de la relación  $(A \times V \times E)/P$  de la fórmula. Debido a que el ancho del tambor "A" no se puede aumentar una vez que se ha seleccionado el equipo, la relación  $(V \times E)/P$  tiene que ser objeto de la mayor atención. La velocidad de trabajo "V" está determinada por el motor y la transmisión del compactador. Generalmente debe seleccionarse una velocidad en el rango de 3 a 6 km/hr y ajustar la relación E/P.

Debido a que las condiciones del material a compactar (en este caso CCR) pueden cambiar en diferentes sitios e incluso en el mismo sitio, hasta la fecha no existen reglas teóricas para

obtener la relación óptima entre el espesor de las capas "E" y el número mínimo de pasadas "P" para obtener el peso volumétrico requerido. En ciertos países se tiene la costumbre de estipular en los contratos el espesor de las capas, el número de pasadas y el peso del rodillo, lo que facilita la supervisión, pero afecta seriamente la economía de la compactación. Un método práctico para seleccionar la óptima relación E/P es la construcción de una rampa o bordo de prueba con el mismo material que se utilizará en la obra.

Un bordo de prueba con una altura de 1 m normalmente será suficiente para determinar los resultados de la compactación con un equipo en particular. Se deben de dar las pasadas con el compactador vibratorio de rodillo liso a la velocidad seleccionada constante, sobre las franjas predeterminadas. En la fig. 5 se indican franjas de 2, 3 y 4 pasadas, aunque el número de pasadas es variable. Una vez compactadas, se extraen núcleos de cada franja a diferentes alturas y se determina su peso volumétrico. Se puede encontrar que con 2 pasadas se obtuvo el peso volumétrico requerido al nivel de 30 cm. En pruebas similares se puede encontrar que se obtiene el peso volumétrico de proyecto a 55 cm para la franja de 3 pasadas y a 80 cm para la franja de 4 pasadas.

Para obtener la máxima capacidad se debe seleccionar la relación E/P óptima. En el ejemplo anterior, las diferentes relaciones E/P son las siguientes :

$$30/2 = 15 ; \quad 55/3 = 18 ; \quad 80/4 = 20$$

Para el ejemplo anterior, la relación E/P óptima se obtiene compactando capas con un espesor de 80 cm con 4 pasadas, lo que da como resultado una capacidad óptima y, consecuentemente, un costo unitario mínimo.

Cabe mencionar que el anterior es un ejemplo ilustrativo, ya que, como se mencionó anteriormente, el espesor que se ha utilizado en la mayoría de las aplicaciones es de 30 cm y el número de pasadas es de 3 a 6.

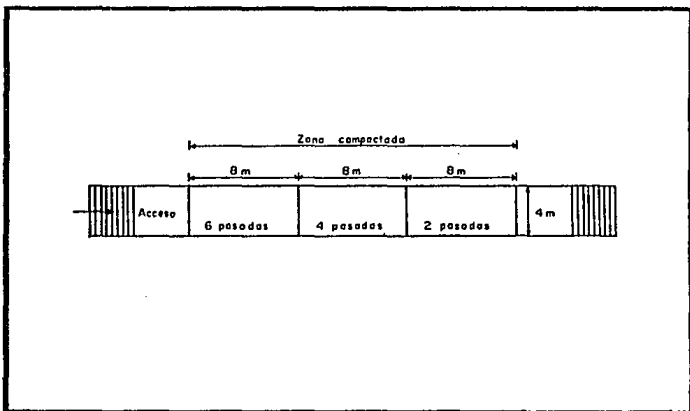


Fig. 5 Rampa y dimensiones de un borde de prueba.

## CONSTRUCCION DE LA RAMPA DE PRUEBA.

A continuación se enumeran algunas recomendaciones para que los datos obtenidos de la rampa de prueba sean lo más reales posibles :

- 1 . - La rampa tiene que ser construida sobre suelo bien compactado.
- 2 . - Los hombros de la rampa tienen que estar bien compactados antes del paso del equipo sobre las franjas de prueba, para así prevenir que el material se desplace hacia los lados.
- 3 . - En cada punto de prueba se debe determinar el peso volumétrico a lo largo de toda la profundidad de la capa, ya que éste es menor cerca de la superficie.
- 4 . - En ocasiones se puede utilizar la rampa o bordo como parte del cuerpo de la obra, con tan sólo dar el número de pasadas adicionales para obtener el peso volumétrico de proyecto en toda la rampa. Esto permite ahorros importantes.

En la fig. 6 se presentan las dimensiones del bordo de prueba que se utilizó para determinar el número óptimo de pasadas para la presa Trigomil, en el Estado de Jalisco.

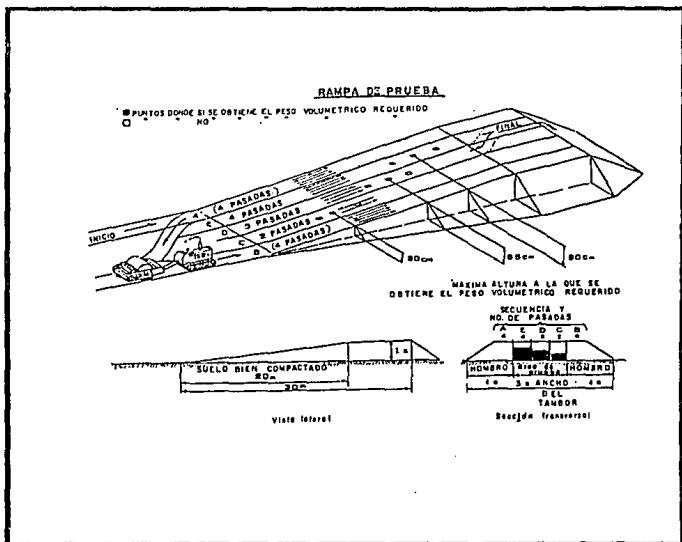


Fig 6 Bordo de prueba de la presa "Trigomil".

#### V.4. - CALCULO DEL COSTO DE COMPACTACION POR M3 DE C.C.R.

A continuación se muestran dos ejemplos del costo de compactación por m3 de CCR con dos marcas distintas de compactadores aplicables al CCR.

I.- COMPACTADOR DYNAPAC CC42

A) Cálculo del costo directo hora-máquina (HMD) :

Datos generales :

Precio de adquisición: N\$ 493 634.00

Valor inicial (Va): N\$ 493 634.00

Valor de rescate (Vr): 10% = N\$ 49 363.40

Tasa de interés (i): 6.80 %

Prima de seguros (s): 2 %

Vida económica (Ve): 5 años

Horas por año (Ha): 2,000 hr/año

Motor Diesel de 125 HP

Factor de operación: 0.70

Potencia de operación: 125 x 0.70 = 87.5 HP op.

Factor de mantenimiento (Q): 0.80

Capacidad del cárter: C = 22 litros

Cambios de aceite: t = 100 horas

Precio del combustible: Pc = N\$ 0.90 litro

Precio del lubricante: Pl = N\$ 2.52 litro

Salario base del operador: N\$ 24.00

F.S.R: 1.6922

1.- Cargos fijos:

a) Depreciación:

$$D = \frac{Va - Vr}{Ve} = \frac{493\ 634 - 49\ 363.40}{5 \times 2000} = N\$ 44.43$$



b) Inversión:

$$I = \frac{V_a + V_r}{2Ha} (i) = \frac{493.634 + 49.363.40}{2 \times 2000} (0.068) = \text{N\$ } 9.23$$

c) Seguros:

$$S = \frac{V_a + V_r}{2Ha} (s) = \frac{493.634 + 49.363.40}{2 \times 2000} (0.02) = \text{N\$ } 2.71$$

d) Mantenimiento:

$$M = QD = 0.8 \times 44.43 = \text{N\$ } 35.54$$

SUMA DE CARGOS FIJOS POR HORA: N\$ 91.91

2.- Cargos por consumo:

a) Combustible:

$$E = e \cdot P_c = 0.20 \times 87.5 \times \text{N\$ } 0.90 = \text{N\$ } 15.75$$

b) Lubricantes :

$$A1 = (c + a1) P1$$

$$c = 0.0035 \times 87.5 = 0.30625$$

$$a1 = C/t = 22/100 = 0.22$$

$$A1 = (0.30625 + 0.22) 2.52 = \text{N\$ } 1.33$$

SUMA DE CARGOS POR CONSUMO POR HORA: N\$ 17.08

3.- Cargos por operación:

$$C_o = S_o/H = \frac{24 \times 1.6922}{8 \times 0.75} = \text{N\$ } 6.77$$

SUMA POR CARGOS POR OPERACION POR HORA: N\$ 6.77

COSTO DIRECTO HORA-MAQUINA (HMD) = N\$ 115.76

B) Capacidad horaria del compactador (Q)

Ancho del tambor (A): 1.675 m

Velocidad de trabajo (V): 2.4 km/hr

Espesor de las capas (E): 0.3 m

Número de pasadas (P): 3

Factor de eficiencia (f): 85%

$$Q = f \times \frac{A \times V \times E}{P} \times 1000 = 0.85 \times \frac{1.675 \times 2.4 \times 0.3}{3} \times 1000$$

$$Q = \underline{341.7 \text{ m}^3/\text{hr}}$$

C) Costo de la compactación:

$$C.U = \text{HMD}/Q = \text{N\$ } 115.76/341.7 = \text{N\$ } 0.34$$

$$C.U = \underline{\text{N\$ } 0.35 / \text{m}^3}$$

## II.- COMPACTADOR COMPACTO CV-27AS:

A) Cálculo del costo directo hora-máquina (HMD) :

Datos generales :

Precio de adquisición: N\$ 439 810.00

Equipo adicional: 2 llantas de N\$ 2 400.00 c/u = N\$ 4 800.00

Valor inicial (Va): N\$ 435 010.00

Valor de rescate (Vr): 10% = N\$ 43 501.00

Tasa de interés (i): 6.80 %

Prima de seguros (s): 2 %

Vida económica (Ve): 5 años

Vida económica de las llantas (Hv): 3,400 horas

Horas por año (Ha): 2,000 hr/año

Motor Diesel de 140 HP

Factor de operación: 0.70

Potencia de operación:  $140 \times 0.70 = 98$  HP op.

Factor de mantenimiento (Q): 0.80

Capacidad del cárter:  $C = 18.9$  litros

Cambios de aceite:  $t = 100$  horas

Precio del combustible:  $P_c = \text{N\$ } 0.90$  litro

Precio del lubricante:  $P_l = \text{N\$ } 2.52$  litro

Salario base del operador:  $\text{N\$ } 24.00$

F.S.R: 1.6922

1.- Cargos fijos:

a) Depreciación:

$$D = \frac{V_a - V_r}{V_e} = \frac{435\,010 - 43\,501}{5 \times 2000} = \text{N\$ } 39.15$$

b) Inversión:

$$I = \frac{V_a + V_r}{2Ha} (i) = \frac{435\,010 + 43\,501}{2 \times 2000} (0.068) = \text{N\$ } 8.13$$

c) Seguros:

$$S = \frac{V_a + V_r}{2Ha} (s) = \frac{435\,010 + 43\,501}{2 \times 2000} (0.02) = \text{N\$ } 2.39$$

d) Mantenimiento:

$$M = QD = 0.8 \times 39.15 = \text{N\$ } 31.32$$

SUMA DE CARGOS FIJOS POR HORA: N\\$ 81.00

2.- Cargos por consumo:

a) Combustible:

$$E = e P_c = 0.20 \times 98 \times \text{N\$ } 0.90 = \text{N\$ } 17.64$$

b) Lubricantes:

$$A1 = (c + a1) P1$$

$$c = 0.0035 \times 98 = 0.343$$

$$a1 = C/t = 18.9/100 = 0.189$$

$$A1 = (0.343 + 0.189) 2.52 = \text{N\$ } 1.34$$

c) Llantas:

$$L1 = V11/Hv = 4 \ 800/3 \ 400 = \text{N\$ } 1.41$$

SUMA DE CARGOS POR CONSUMO POR HORA: N\$ 20.39

3.- Cargos por operación:

$$C_o = S_o/H = \frac{24 \times 1.6922}{8 \times 0.75} = \text{N\$ } 6.77$$

SUMA POR CARGOS POR OPERACION POR HORA: N\$ 6.77

COSTO DIRECTO HORA-MAQUINA (HMD) = N\$ 108.16

B) Capacidad horaria del compactador (Q)

Ancho del tambor (A): 2.133 m

Velocidad de trabajo (V): 2.4 km/hr

Espesor de las capas (E): 0.3 m

Número de pasadas (P): 6

Factor de eficiencia (f): 85%

$$Q = f \times \frac{A \times V \times E}{P} \times 1000 = 0.85 \times \frac{2.133 \times 2.4 \times 0.3}{6} \times 1000$$

$$Q = 217.6 \text{ m}^3/\text{hr}$$

C) Costo de la compactación:

$$C.U = \text{HMD}/Q = \text{N}\$ 108.16/217.6 = \text{N}\$ 0.50 /\text{m}^3$$

$$C.U = \underline{\text{N}\$ 0.50 /\text{m}^3}$$

En los ejemplos anteriores se puede apreciar que la compactación resulta más económica con el compactador tandem DYNAPAC CC42, aunque su precio de adquisición sea más alto y su ancho de tambor menor que el del compactador CV-27AS. Esto se debe principalmente a la reducción en el número de pasadas.

#### V.5. - SELECCION DEL EQUIPO DE COMPACTACION PARA CCR

Resulta necesario hacer énfasis en la compactación y selección del equipo para la construcción de estructuras de CCR, ya que estos dos puntos tienen una gran importancia, debido a que de su adecuada ejecución dependen propiedades tan importantes como el peso volumétrico (y por ende su resistencia), la permeabilidad, la durabilidad y la calidad del concreto.

Sin embargo no se puede establecer una regla general para determinar el equipo a utilizar, el número de pasadas, el espesor de las capas, etc., pues existe un sin número de variables que difícilmente pueden ser iguales en dos proyectos distintos. Por ello la selección de un equipo en particular depende

principalmente de los resultados que arroje al ser utilizado en un bordo de prueba en el sitio, bajo las mismas condiciones que prevalecerán durante la construcción de la obra. Debido a que dos modelos y marcas distintas de equipo pueden obtener resultados similares, otros factores para determinar la preferencia de uno sobre otro serían el costo, el rendimiento y la disponibilidad de servicio.

En base a lo anterior, se puede establecer la siguiente secuencia de pasos para la selección del equipo de compactación para CCR :

1.- Se determinan las características deseables del equipo que se utilizará en la obra, peso estático, frecuencia, amplitud, carga lineal estática, número de tambores vibratorios, etc., apoyándose en experiencias obtenidas en proyectos previos.

2.- Se elige el equipo que cumpla con la mayor parte de las especificaciones determinadas en el paso 1. Dependiendo de las marcas y modelos disponibles, se escogerá el que resulte más económico pero deberá estar respaldado por un sistema de servicio apropiado.

3.- Se construye un bordo de prueba en el sitio de la obra para determinar si el equipo elegido puede obtener los pesos volumétricos de diseño, así como para establecer el espesor de las capas y el número de pasadas.

4.- Se calcula el costo horario del compactador y su capacidad en m<sup>3</sup> por hora para determinar el costo de la compactación por m<sup>3</sup>.

5.- Si con el compactador inicialmente elegido resulta muy difícil obtener el peso volumétrico de diseño o si el costo de compactación resulta excesivamente elevado, se repetirá la secuencia de selección a partir del paso 2 hasta encontrar el equipo óptimo.

Si aplicamos esto a cualquier equipo de los mencionados con anterioridad en este capítulo se puede obtener una compactación adecuada de manera económica.

## **CAPITULO VI**

### **USOS DEL CONCRETO COMPACTADO RODILLADO**



## **VI. - USOS DE CONCRETO COMPACTADO RODILLADO**

El CCR ha sido empleado con éxito en la construcción de presas y pavimentos, aunque la granulometría es distinta para ambos casos.

Los parámetros de diseño son similares a los utilizados para este tipo de obras cuando se aplica concreto convencional, lo que varía es el proceso constructivo. A continuación se hará una descripción del uso del CCR en la construcción de presas y pavimentos.

### **VI.1 - USO DEL CONCRETO COMPACTADO RODILLADO EN PRESAS**

El tipo de materiales a utilizar y el método más adecuado para emprender la obra, son las decisiones más importantes para determinar el diseño y la construcción de una presa.

La experiencia en construcciones pasadas a base de concreto convencional y materiales graduados nos han indicado cuales son las ventajas e inconvenientes de estos materiales que poseen virtudes y defectos en porcentajes similares. En cambio la utilización del CCR reúne las características óptimas, tanto del concreto convencional, como de los materiales graduados, reduce los costos de construcción y aumenta la funcionalidad y eficiencia de las presas sin poner en riesgo la seguridad.

Al ser analizadas las condiciones de una boquilla para presas y la disponibilidad de materiales con el fin de elegir el

tipo de cortina, se consideran todos aquellos aspectos topográficos, hidrológicos y geotécnicos que determinarán las características y el diseño de toda la obra.

En nuestro país las cortinas de materiales graduados han sido predominantemente elegidas, sobre todo por su adaptabilidad a un amplio rango de condiciones geotécnicas de la boquilla. Cuando el sitio elegido permite construir tanto una cortina de gravedad como una de materiales graduados; el costo de construcción es el factor determinante en la elección final. Sin embargo, algunas factores como el tamaño y la localización de otras estructuras tales como el vertedor, podrían darnos la pauta a elegir la cortina de concreto, siempre y cuando el incremento en el costo total fuera aceptable.

Si analizamos la evolución de la construcción de cortinas de concreto podremos observar que los métodos de diseño han mejorado notablemente con el paso del tiempo, sin embargo los procedimientos constructivos permanecen igual que en el pasado. Se siguen teniendo demoras por la inestabilidad dimensional del concreto masivo, provocado inicialmente por el proceso exotérmico de la hidratación del cemento, esto impone grandes limitaciones en la velocidad de colado y en el tamaño de los monolitos. La necesidad de proporcionar juntas de contracción, cimbras en las caras transversales de los monolitos y, algunas veces, sistemas de enfriamiento, ya sea en la masa de concreto o en los materiales que la constituyen, causa demoras en la construcción, además de otros inconvenientes.

El problema ha disminuido al utilizar cementos puzolánicos o con moderado calor de hidratación; pero la construcción sigue siendo una actividad semi-continua que necesita gran cantidad de mano de obra. La contribución de las dosificadoras de mayor capacidad ha sido insignificante para mejorar la eficiencia del procedimiento, pues la colocación y la compactación del concreto, así como la fabricación de las cimbras, impiden obtener el rendimiento deseado. La baja eficiencia en el procedimiento de construcción ha dado lugar a que en la actualidad los costos del concreto masivo aumenten considerablemente, tanto en términos absolutos como en relación con los costos de cortina de tierra y enrocamiento.

Por otro lado, los avances en el diseño, logrados gracias al desarrollo de métodos de análisis más confiables y a los adelantos tecnológicos que han hecho posible fabricar un equipo de construcción más potente, han tenido como consecuencia la construcción de cortinas de materiales graduados, cuyas alturas son cada vez mayores.

En teoría, el óptimo procedimiento de construcción se obtendrá, al mínimo costo, al lograr conjuntar las ventajas que ofrece la construcción de ambos tipos de cortina, de concreto y materiales graduados. En la actualidad el uso del concreto compactado rodillado reúne tales ventajas.

A continuación se enunciarán algunas ventajas y desventajas en la construcción de una cortina de concreto, de materiales graduados y de CCR; para ello se supone una boquilla de 60 m de

altura y una longitud de corona de 185 m como se aprecia en la fig.7.

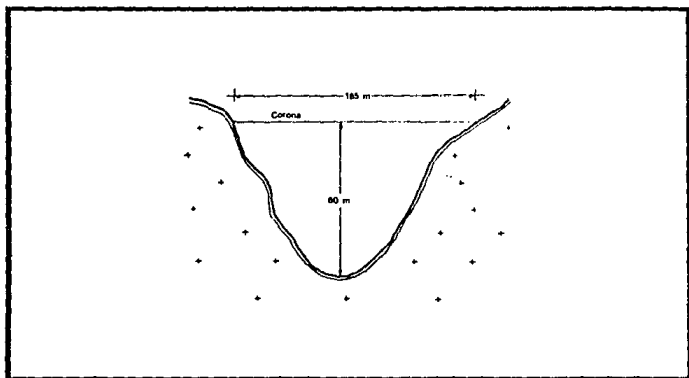


Fig. 7 Corte longitudinal de una boquilla.

Ventajas :

- Requieren menor volumen por colocar (95 500 m<sup>3</sup>).
- El material es homogéneo.
- Los materiales para la fabricación del concreto son fáciles de almacenar.
- El vertedor se encuentre en el cuerpo de la cortina.
- Las propiedades del concreto son controlables.
- El concreto resiste al desbordamiento.

Desventajas :

- La temperatura y el secado ocasionan cambios volumétricos.
- El proceso de construcción es semi-continuo.

- La estructura, por ser rígida, admite deformaciones mínimas en la cimentación.

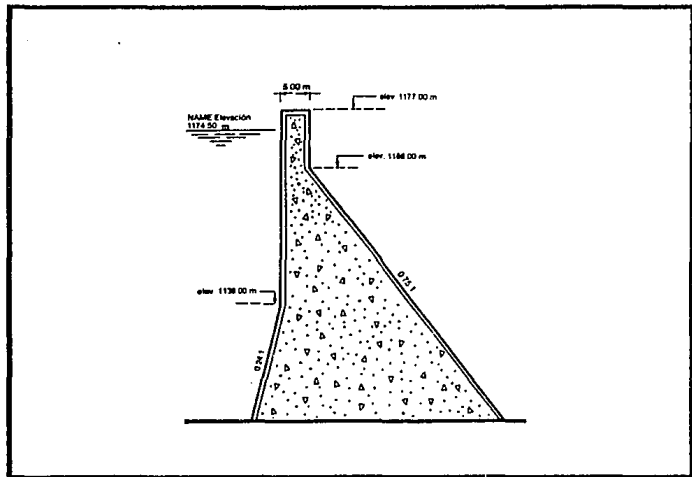


Fig.8 Sección de una cortina de concreto.

Para cortinas de materiales graduados como la que se presenta en la fig. 9

Ventajas :

- Mayor eficiencia por el empleo constante de maquinaria pesada.
- Operación continua.
- Estructura flexible.

Desventajas :

- Mayor volumen de material por colocar (666 000 m<sup>3</sup>)

- Se necesitan diferentes equipos de compactación para los distintos materiales que forman la cortina.
- Es difícil encontrar los materiales idóneos.
- No se conoce con exactitud la interacción de los materiales.

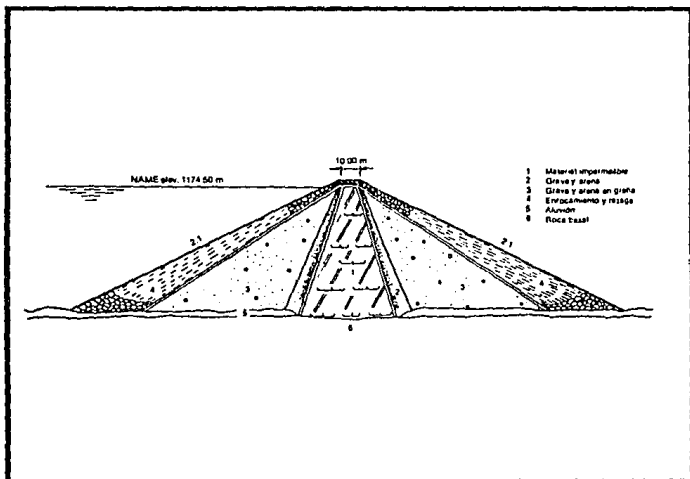


Fig. 9 Sección de una cortina de materiales graduados.

#### CORTINAS DE CONCRETO COMPACTADO RODILLADO.

##### Ventajas :

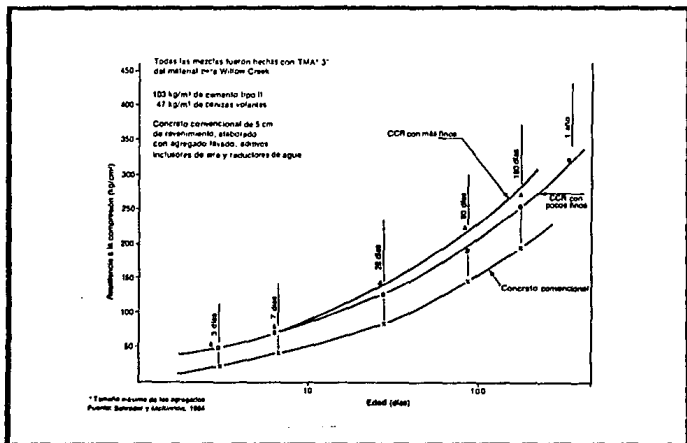
- El diseño de las mezclas para CCR no depende directamente de determinar las relaciones agua-cemento apropiadas para obtener la resistencia y la trabajabilidad requeridas, ni tampoco las

relaciones grava-arena, como ocurre en el caso del concreto convencional.

- De acuerdo con el criterio empleado normalmente en la dosificación es común utilizar, en la construcción de cortinas de gravedad, de 250 a 300 kg/m<sup>3</sup> de cemento, para fabricar concretos cuyas resistencias varíen entre 100 y 140 kg/cm<sup>2</sup>, sin embargo si se observan, las curvas de la gráfica XIII que relacionan el contenido de cemento con la resistencia a la compresión del CCR, puede apreciarse que para un contenido de aproximadamente 125 kg/m<sup>3</sup> se obtienen resistencias a la compresión de 210 kg/cm<sup>2</sup> a los 90 días, lo que significa una disminución en el consumo del cemento hasta del 60%. Por lo tanto desde el punto de vista económico, el procedimiento resulta atractivo.

- Los cambios volumétricos potenciales ocasionados por la pérdida de humedad o el acortamiento por secado son significativamente menores en el CCR, 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 al método de colocación, puesto que el concreto convencional se coloca en hiladas de 45 a 60 cm, mientras que el CCR es colocado en capas sucesivas y uniformes, cuyo espesor puede variar entre 20 y 30 cm. Las capas delgadas permiten una mejor disipación del calor.



Gráfica XIII Edad-resistencia del concreto convencional y CCR.

- Las mezclas pueden hacerse con equipo convencional o por medio de una planta de mezclado continuo y puede transportarse por medio de bandas, camiones de volteo o motoescrepas o una combinación de éstos y se extiende con la ayuda de maquinaria pesada y posteriormente se compacta con la ayuda de un rodillo liso vibratorio, esto da como resultado colocar un mayor volumen de CCR en un menor tiempo.
- Las cortinas de concreto requieren cimbras. Las cimbras no son necesarias al construir cortinas de CCR. Esto significa un ahorro sustancial en el costo; sin embargo, puede afirmarse que sólo un estudio económico determinará la factibilidad de construir una u



otra cortina.

Desventajas :

- Debe ponerse especial cuidado en los contenidos de agua y cemento de las mezclas de CCR, ya que no es permitido añadir agua, cemento y agregados a la mezcla, una vez que ésta haya salido de la mezcladora. Debido a que si presenta mayor cantidad de agua afectara la resistencia y la maquinaria pesada se atasca.
- Debe impedirse que la superficie se contamine y en caso de lluvia, debe suspenderse la colocación.

En la fig. 10 se muestran opciones para presas de CCR.

Cuando se va construir una cortina de CCR es de vital importancia conocer el comportamiento del material, así como sus características después de terminada la obra. Toda esta información es recabada mediante pruebas de laboratorio, las cuales permiten conocer los parámetros de diseño, las características y propiedades de las mezclas. Además de los ensayos de laboratorio, los resultados son verificados mediante la construcción de un bordo de prueba, el cual nos dará una información más real de lo que puede pasar durante la construcción.

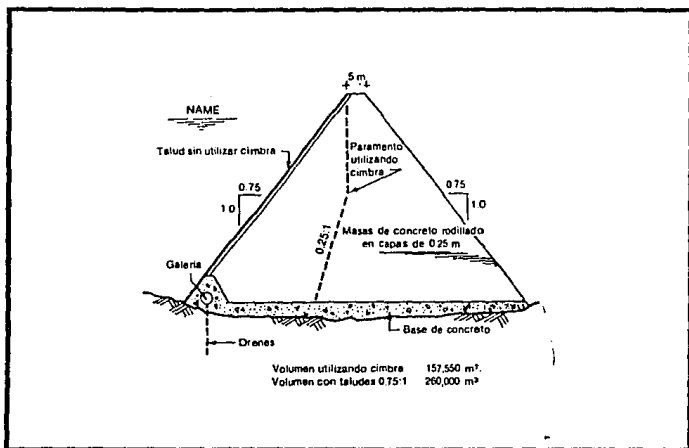


Fig. 10 Opciones de cortinas para presas de CCR.

Entre las características de la mezcla, estudiadas en el laboratorio se destacan las siguientes :

- Resistencia a la compresión simple.
- Resistencia a la tensión.
- Resistencia al esfuerzo cortante en pruebas triaxiales.
- Módulo de elasticidad.
- Relación de Poisson.
- Resistencia al esfuerzo cortante entre capas.
- Densidad.
- Permeabilidad.
- Durabilidad.

- Estabilidad dimensional.

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 del laboratorio deben verificarse con la información obtenida del bordo de prueba.

Mediante la construcción de un bordo de prueba se pretende determinar :

a ). - 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 del 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 esté 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.

b ). - 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 CCR cuando se interrumpa la colocación de material por uno o más días.

c ) . - Tratamiento de paramentos y definición de la geometría de la sección.

Si se ha elegido una sección con paramento vertical o casi vertical, se pondrán a prueba los procedimientos de construcción propuestos.

En caso de no utilizar un sistema de soporte o cimbra para el paramento de aguas arriba, deberán realizarse pruebas para definir el talud permisible y verificar las condiciones consideradas para el diseño.

d ) . - Adherencia del CCR a la cimentación y a los empotramientos.

Debido a la gran importancia de un desplante adecuado, se obtendrán núcleos para evaluar la adherencia existente entre la primera capa de CCR y la roca basal. Se comprobará la adherencia a todo lo largo del contacto. Se debe tener especial cuidado al seleccionar el método y el equipo de compactación en las zonas a las que no pueda llegar el rodillo vibratorio, para asegurar la homogeneidad del material.

Las perspectivas de construir presas de CCR son amplias, en México se utilizó CCR para el relleno de desvío de la Presa Hidroeléctrica Peñitas en Chiapas con un volumen de 50 000 m<sup>3</sup> para desplante del canal de conducción del vertedor auxiliar que

se especificó un tamaño máximo de agregado de 76.2 mm y con una resistencia a la compresión de 60 kg/cm<sup>2</sup> a un año .

En la presa La Manzanilla, que se construyó sobre el arroyo Ibarrilla, a sólo 3 Km de la ciudad de León, Guanajuato. Siendo esta la primera presa construida de CCR en el país. Los principales datos de esta obra son :

- Finalidad : Control de avenidas y recarga de acuíferos
- Area de la cuenca : 53 Km<sup>2</sup>
- Avenida máxima extraordinaria : 317 m<sup>3</sup>/s
- Capacidad total : 1 300 000 m<sup>3</sup>
- Altura de la cortina : 36 m
- Longitud del vertedor : 7.5
- Volumen de CCR : 20 300 m<sup>3</sup>

La construcción se inició en noviembre de 1986, con la limpia del cauce y laderas, para colocar concreto convencional sobre el conglomerado continental del cauce y uniformizar la zona de trabajo. La dosificación del CCR que se utilizó fué el resultado del bardo de prueba que se realizó previo a la construcción. La unión entre concreto convencional y CCR, así como en juntas frías, se efectuó con CCR de liga (el cual se obtuvo eliminado la grava de 38 a 76 mm de la dosificación normal de CCR), que se colocó en espesor de 8 cm previo a la colocación de CCR normal, para tener un espesor de capa de 30 cm. La producción de CCR fue discontinua, trabajando dos turnos entre semana y uno en sábados, lo que requirió el tratamiento de esas juntas frías con concreto de liga. El control de compactación se

realizó con calas de 30 x 30 x 20 cm, aceptando densidades superiores a 2 200 kg/m<sup>3</sup>. La mezcladora fue de tipo continuo con paletas y el transporte del CCR se efectuó con camiones y se extendió con un cargador frontal; la compactación se realizó con 6 pasadas de rodillo liso vibratorio de 10 toneladas y el CCR se curó superficialmente con aspersión de agua después de 4 horas de compactado. La impermeabilización de la cortina se obtuvo colocando una pantalla impermeable de 50 cm de ancho de concreto convencional entre el CCR y las formas prefabricadas autoportables en el paramento aguas arriba. Para la construcción de la galería se colocó grava bien graduada a manera de cimbra. Las obras de control, vertedor, dado de corona, superficie de desplante, liga de CCR con laderas, membrana impermeable y recubrimiento de la galería se realizaron con concreto convencional.

Las dificultades que se presentaron durante la construcción fueron el deterioro de la mezcladora al utilizar ceniza y el manejo de ésta, por lo que se sustituyó por la misma cantidad de arena limosa; la descarga de los camiones de volteo produjo segregación; la poca tolerancia de las formas prefabricadas dificultó su colocación; no se logró compactar el CCR cerca del paramento aguas abajo y formar un talud 0.8:1 (el talud natural del CCR es casi 1:1), por lo que se dejó un sobre ancho de 20 cm y se colocaron escalones de concreto convencional para formar el talud requerido. El retiro de la grava de la galería fue difícil y tardado por la alta compacidad que alcanzó el material, por lo

que es conveniente utilizar material uniforme o algún otro método. En dos ocasiones el agua sobrepasó la cortina en construcción sin causar daños. La obra fue terminada en 8 meses.

En la presa Trigomil, cuyas características son:

- Volumen de CCR : 361 500 m<sup>3</sup>
- Altura aproximada : 100 m
- Ancho de corona : 5 m
- Capacidad total : 324 000 000 m<sup>3</sup>
- Obra de toma definitiva para un gasto de 30 m<sup>3</sup>/s
- Longitud transversal : 250 m

El relieve topográfico de la zona donde se construyó la presa Trigomil, y el desnivel existente entre el lecho del río y la corona de la cortina que es de 100 m y el desnivel entre la corona y el banco de roca que es de 180 m, hicieron pensar en una planeación que hiciese económicas las instalaciones, con acarrees mínimos de materiales para la fabricación de CCR y utilizar lo menos posible acarrees en camiones por lo que se consideró mover los agregados y el concreto a base de bandas y tuberías de transportación. Para ello se planearon todas las instalaciones desde el banco de roca hasta la cortina en forma escalonada; es decir, partiendo del banco de roca que es la parte más alta, se construyeron dos plataformas de explotación de roca y más abajo una carga del producto. En el siguiente nivel se instaló una tolva receptora de roca para alimentar la trituradora primaria. En otro nivel más abajo, se instaló la trituradora secundaria, y una cribadora comunicadas por medio de bandas transportadoras.

Paralelamente a las instalaciones de las trituradoras se construyeron en tres niveles, tres almacenes de agregados de los diferentes tamaños necesarios para el CCR.

Bajo estos almacenes de agregados se estuvo y se revistió con concreto armado, un túnel de recuperación de agregados con una banda de 42 pulgadas en su interior. Posteriormente eran transportados hasta las tolvas superiores de una planta de concreto Ross 220 que se instaló en el nivel más bajo del túnel de recuperación de agregados y que coincide con el nivel de la corona de la cortina.

De este nivel de la corona de la cortina se efectuó la maquila de CCR, ahí se encontraban las básculas y los silos que contenían cemento y ceniza volante, los cuales se vertían en la planta mezcladora, esta entregaba la mezcla de CCR ya lista para transportarla por medio de tuberías y bandas transportadoras al lugar de colocación; esta conducción tenía al final un amortiguador de energía y una tolva de recepción, el cual vaciaba el concreto a camiones Dumpcret, los cuales transportaban y distribuían el concreto a lo largo y ancho de la cortina. Una vez vaciada la mezcla se extendía con un cargador frontal sobre neumáticos (D-5) uniformemente en toda el área de la cortina siguiendo una misma dirección con un espesor de 25 a 30 cm y era compactada con un rodillo liso vibratorio de 10 toneladas DYNAPAC CC-43, dando 6 pasadas a una velocidad de 3 km/h con el fin de obtener una alta compactación y eliminar zonas de filtración en el concreto.



De esta forma se aprovecho la topografía del sitio, los desniveles existentes para manejar por gravedad en forma escalonada los materiales existentes en el mismo sitio, desde el banco de roca, su procesamiento de triturado, la transportación de los bancos , la maquila de los concretos, la bajada de los mismos hasta el propio sitio de colocación con el mínimo de camiones de acarreo de estos materiales; puesto que de otra forma se habrían multiplicado los caminos de acceso, los acarreos y por lo tanto el costo de la obra.

Cabe mencionar que en el paramento aguas arriba de la cortina se utilizaron unas piezas especiales precoladas de concreto normal con un  $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$  y una sección de  $0.9 \times 0.9 \text{ m}$ .

En la tabla No. 7 se mencionan todas las presas de CCR construidas hasta 1990. Estos datos fueron publicados durante el XVI Congreso de Grandes Presas.

NOMBRE	PAIS	VOL. DE CCR (m3)	ALTURA (m)	AÑO
Shimajigawa	Japón	170 000	89	1980
Millon Brook	G.B.	17 400	27	1981
Willow Creek	E.U.	331 000	52	1982
Winchester	E.U.	24 500	21	1984
Middle Fork	E.U.	42 100	38	1984
Copperfield	Australia	140 000	40	1984
Galesville	E.U.	160 800	51	1985
Ohkawa	Japón	1 000 000	78	1985
Shin-Nakano	Japón	-	74.8	1985
Pamo	E.U.	371 000	80	1985
Eñizama	España	12 000	45	1985
G. Canyon	E.U.	87 500	42	1986
Monksville	E.U.	221 000	42	1986
Zaaihoek	Sudáfrica	120 000	50	1986
Craigbourne	Australia	22 000	25	1986
Saco de N.O.	Brasil	135 000	56	1986
Amble	Sudáfrica	110 000	35	1986
Tamagawa	Japón	1 000 000	103	1986
Mist Kraal	Sudáfrica	35 000	30	1986
Kengkou	China	60 000	56.8	1986
La Manzanilla	México	20 300	36	1986
U. Stillwater	E.U.	1 070 000	87	1987
Olivetles	Francia	153 000	37	1987
Varzea Grande	Brasil	30 000	31	1987
Trigomil	México	361 500	100	1987
Wriggleswade	Sudáfrica	236 000	37	1987
Kneelipoort	Sudáfrica	55 000	50	1987
Wolwedans	Sudáfrica	165 000	70	1987
Mohaled	Sudáfrica	-	162	1987
Mashai	Sudáfrica	-	180	1987
Bucca	Australia	24 000	12	1987
Sakaigawa	Japón	-	120	1987
Gassan	Japón	2 000 000	155	1987
Miyagase	Japón	-	-	1987
Shikomizugawa	Japón	-	-	1987
Asahi	Japón	-	-	1987
Nunome	Japón	-	-	1987
Dohdairagawa	Japón	-	-	1987
Asari	Japón	-	-	1987
Kamuro	Japón	-	-	1987
Riou	Francia	55 000	25	1987
Ain Al Koreima	Marruecos	26 500	26	1987
Rwedat	Marruecos	-	27	1987
Santa Eugenia	España	219 000	80	1987
Tashkumyr	URSS	-	75	1987
Bureya	URSS	-	100	1987
Piñca	Japón	360 000	40	1988
Elk Creek	E.U.	795 000	76	1988
Mano	Japón	101 000	69	1988
Acaua	Brasil	623 000	79	1988
C.de los Arroyos	España	14 000	25	1987

Tabla No. 7 Presas construidas con CCR.

## VI.2 - USO DEL CONCRETO COMPACTADO RODILLADO EN PAVIMENTOS

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 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.

**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.

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 se denomina la

última capa que se construye, y es sobre de 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 tienen 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.

Erróneamente se le da 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 general para los pavimentos, se dice que existen pavimentos flexibles, los cuales 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 CCR.

Las variables que se emplean en el diseño de una 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 el pavimento. El resultado final es estimar y clasificar los ejes tanto separados como en tándem en categorías de peso que usarán el pavimento en el período de vida útil para el que se diseña.

Para determinar el espesor requerido de un pavimento de CCR se requiere conocer 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 rueda.

- Espacio entre ruedas.

- Características de los neumáticos

- Número de repeticiones de carga que se esperandurante la vida útil sobre las diferentes áreas del pavimento.

Para evitar la segregación y obtener una mejor calidad de la superficie se utilizan agregados triturados con tamaños máximos de 20 mm (3/4 pulg) o 16 mm (5/8 pulg), los rangos para cada tamaño se presentan en la tabla No.8

GRANULOMETRIA TIPICA PARA PAVIMENTOS DE CCR		
T.M.A. (mm)	% QUE PASA	
No. MALLA	16	20
1 pulg	-	100
3/4 pulg	100	85-100
5/8 pulg	88-100	75-100
3/8 pulg	70-87	60-83
No.4	50-70	42-63
No.10	35-50	30-47
No.40	18-30	16-27
No.200	10-20	9-19

Tabla No.8 Granulometria típica para pavimentos de CCR.

Cabe mencionar que la granulometria incluye el cemento con la finalidad de limitar el contenido de finos que pasa la malla No. 200, a los límites que se fijan en dicha tabla.

El contenido de cemento en las mezclas de CCR fluctúa de 260 a 330 Kg/m<sup>3</sup>, que representa del 11.5 al 14.5% del peso seco de los agregados. El cemento que se ha utilizado contiene un alto contenido de ceniza volante de tipo sílico-aluminoso, clase F de acuerdo a lo dispuesto en la norma C 618-87 de la ASTM y se ha observado que las resistencias que se logran son mayores además de otras ventajas como bajo calor de hidratación, disminución del agrietamiento debido a contracciones, notable retraso en el proceso de fraguado y un comportamiento adecuado de la mezcla.

A manera de ejemplo, podemos citar que el incremento de la resistencia a tensión indirecta de los especímenes de concreto de 28 a 90 días puede ser hasta del 45%, considerando un contenido de cemento del 15% en peso de los materiales secos, el cual está

constituido de un 50% de ceniza volante.

El contenido de humedad de la mezcla varía de 105 a 130 lt/m<sup>3</sup> que representa de un 4.5 a 5.5% del peso de los agregados secos.

Para elaborar los especímenes de CCR se ha empleado la energía específica de la prueba Proctor Modificada, sin embargo, se tiene la tendencia a utilizar la mesa vibratoria VeBe para elaborar los especímenes, pues se ha visto que los métodos anteriores no son representativos de las condiciones del campo, pues el material se tritura alterando su granulometría original.

El CCR para construcción de pavimentos se suele colocar con pavimentadoras de asfalto u otros equipos similares modificados para manejar la consistencia del CCR y los colados de mayor espesor, o se sugiere que se hagan las combinaciones de equipo que proporcionen el máximo rendimiento con el mínimo costo.

El empleo de CCR para pavimentos evolucionó a partir del uso de firmes de suelo-cemento y de bases estabilizadas con cemento. Difiere del CCR para presas en que requiere un contenido mucho más elevado y el agregado grueso es de menor tamaño.

Ciertas aplicaciones en pavimentos pueden requerir resistencias altas y superficies lisas, sin embargo, una resistencia alta no siempre da como resultado una vida útil más prolongada, sino que resulta en la elevación del costo, mayor contracción, mayor fragilidad (módulo de elasticidad más elevado), mayores exigencias en las juntas y, en general, controles de construcción más restringidos.

Es común lograr un CCR de resistencia elevada en el laboratorio o durante colados de prueba y después confiar en ésta resistencia para la base del diseño sin prestarle mucha atención a los otros factores que afectan el desarrollo de una obra. Cuando lograr una resistencia a la flexión de 42 kg/cm<sup>2</sup> requiere de una mezcla que tiene 7 kg/cm<sup>2</sup> de esfuerzo adicional de contracción, esto no es mejor que una mezcla con una resistencia de 7 kg/cm<sup>2</sup> a la flexión sin el esfuerzo de contracción adicional. Obviamente, la mezcla de 42 kg/cm<sup>2</sup> tendrá una mayor cantidad de material cementante y/o agregados más caros y un costo más elevado y, sin embargo, no es mejor.

En algunos trabajos en aeropuertos se dedica mucho tiempo y dinero para el mejoramiento o tratamiento de la base. Una característica de los pavimentos de CCR es su mayor espesor, y un beneficio adicional de éste es el de una mayor ondulación y menores esfuerzos de ondulación. Al emplear una sección más gruesa debido a una menor resistencia (resultando una economía global debido al reducido contenido de cemento) ocurrirá menor contracción y se minimizará la necesidad de juntas, ya que el agrietamiento será menor. Esto además implica un menor mantenimiento.

Otro punto importante es el acabado de la superficie. Uno de sus principales aspectos es la calidad del rodaje y otro es lograr una superficie "cerrada" sin hendiduras o grietas que puedan contribuir al intemperismo o al deterioro con el tiempo. Ambos aspectos han dado como resultado el uso de granulometrías



más finas, agregados de mayor costo, contenido más elevado de material cementante (con el consecuente aumento en el costo y en la contracción) y un control más estricto. Sin embargo, se puede emplear una mezcla más económica que presente menor contracción y un mejor acabado superficial si se construye un pavimento más grueso y se aplica una delgada capa de revestimiento de concreto asfáltico que proporcione un rodaje más uniforme, además de protección a largo plazo contra la intemperie. Otra ventaja de la aplicación de una superficie de concreto asfáltico consiste en que reduce al mínimo el choque térmico en la parte superior del CCR y evita ciclos rápidos de mojado-secado.

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. El tramo de pavimento que se construyó tiene una longitud de 30 m por un ancho de 3.1 m y un espesor de 15cm. Se encuentra apoyado sobre una sub-base granular de 12 cm de espesor tratada con cemento al 3%. La proporción grava-arena fué de 55-45. El peso volumétrico alcanzado en la sub-base fué del 94% de la prueba Porter Estándar. Cabe aclarar que la subrasante del pavimento de CCR quedó constituida por la anterior sub-base de un pavimento rígido y por el terreno natural. Por otra parte a nivel de subrasante se encuentra un conjunto de ductos que alimentan de energía a las casetas de

peaje.

La planta de mezclado que se empleó en la producción del CCR fué de la marca ELBA tipo bacha trepadora. La dosificación de los materiales fué 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 fué 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 fué 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 se realizó durante un período de una semana, y el carril fue abierto al tráfico 60 horas después de haber sido construido.

Una segunda experiencia fué la pavimentación de dos carriles en el acceso a un patio en una premezcladora ubicada en Ciudad Juárez, Chihuahua. Cada carril tiene una longitud de 50 m, un ancho de 3.3 m y un espesor de 17 cm. Pero antes de proceder a la pavimentación de los dos carriles, se construyó un tramo de prueba de pavimentación con CCR de 65 m<sup>3</sup> en una sección rectangular de 18 m por 3.6 m, con un espesor compacto de 12 cm

sobre un terraplén de 20 cm de espesor compacto. La mezcla de CCR tuvo una relación grava-arena 40-60 y un contenido de cemento del 5% del peso total de la grava, triturada parcialmente con un tamaño máximo de 3/4". Se compacto la subrasante 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 compacto con el rodillo vibratorio, quedando un espesor compacto de 15 cm. Finalmente se dió un acabado a la sub-base con un compactador neumático Moehring PSR-C10 de 9 ruedas. Además se verificó su pendiente longitudinal y transversal.

Una vez realizado el tramo de prueba se pavimentaron los dos carriles. Los aspectos más relevantes en este proyecto fueron los siguientes : los materiales se dosificaron por peso mediante dos dosificadoras, una MIPSAs y otra no identificada. La mezcla fue elaborada en ollas revolvedoras 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 revolvedora 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. Está 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 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 un rodillo vibratorio Ingersoll RAnd SP-48 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. Se dió un riego por aspersión 1.5 horas después de haber sido tendido el material, el curado se hizo con agua limpia durante dos días, y se construyó una junta longitudinal entre los dos carriles.

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.

Se tiene conocimiento de que la Comisión Federal de Electricidad ha utilizado CCR para la construcción de un camino

de acceso a la presa Aguamilpa. Además de que algunas empresas particulares están empezando a darse cuenta de las ventajas que ofrece el CCR para la construcción de pavimentos y están estudiando la posibilidad de emplear esta alternativa.

### VI.3 - OTROS USOS

Puertos Mexicanos, ante la evolución del manejo de la carga, tanto nacional como internacional a modificado sus técnicas de diseño y construcción de los pavimentos de los patios para contenedores, a fin de adecuarlos a los equipos especializados que sobre ellos transitan y a la premura de contar oportunamente con dichos patios para que así, los puertos nacionales no pierdan competitividad en el manejo de carga contenerizada, modalidad que está proliferando a nivel mundial, la cual exige eficiencia, oportunidad, seguridad y mínimos daños a los embarques.

Después de varios cálculos se llegó a la conclusión de usar CCR para construir los pavimentos de los patios contenedores, pues tanto los esfuerzos de tensión inducidos a las capas cohesivas y los normales transmitidos a las terracerías, no sobrepasan los umbrales de resistencia de los materiales. Además el diseño de sus componentes es dinámico y realmente se resume en los procedimientos que se utilizan para el caso de las bases estabilizadas, con las únicas restricciones de que su tamaño máximo de agregado no sea mayor a 3/4 pulg y el porcentaje de la malla No. 200 no sea mayor a 19 para mejores efectos de tendido y

compactación.

Para su diseño se emplea el método multicapa, el cual considera los diferentes módulos de elasticidad de la estructura integral del pavimento, la resistencia a la fatiga por tensión a que está sometido el CCR, el período de diseño y la agresiva acción del tráfico, método que en suma asegura la duración del pavimento.

El control de calidad comprende la determinación de la humedad en planta y en el tendido, granulometrías con y sin cemento, la resistencia a la compresión de cilindros compactados y en corazones de concreto y el cálculo del gasto de los ingredientes que integran el CCR. Los datos que se obtuvieron fueron una resistencia a la compresión promedio de  $320 \text{ kg/cm}^2$  correspondiente a  $42 \text{ kg/cm}^2$  de resistencia a la tensión y un peso volumétrico de  $2360 \text{ kg/cm}^3$ .

El equipo de dosificación y mezclado tipo pug-mill, incluye un sistema de pesado dinámico, silos y tanque de agua, el cual produce  $100 \text{ m}^3$  por hora y controla el pesado continuo de los ingredientes con una aproximación del 2% en peso. El equipo para las actividades de transporte, tendido y compactación, son camiones de volteo, una pavimentadora y compactador de rodillos.

Otra ventaja muy importante por la cual se usó el CCR, es que el rendimiento de la producción es 10 veces mayor que el de concreto vibrado, y que a partir del tercer día de colocado el CCR, en obra, permite su apertura al tránsito, lo que repercute favorablemente en los costos del CCR y en la entrega más pronta

del patio, además de amortizar los costos en menos tiempo y poder percibir los beneficios.

Además de utilizarse en puertos, el CCR puede aplicarse en cimentaciones masivas para diversas estructuras, revestimientos de canales y construcción de bordos y diques de almacenamiento. Para patios de almacenamiento de grandes bodegas y zonas de estacionamiento de grandes centros comerciales, en obras especiales con altos niveles de carga y abrasión como instalaciones militares, almacenes de materiales, etc.

**CAPITULO VII**  
**CONCLUSIONES**



## VII. - CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos a la fecha, se pueden establecer las ventajas del empleo del CCR, en presas. En términos generales, destaca la economía derivada del consumo menor de cemento para la elaboración de mezclas, así como la rapidez y la facilidad de su colocación en comparación con las estructuras erigidas con concreto normal.

La construcción de estructuras con CCR mejorará con la experiencia. Al mismo tiempo, podrán adecuarse las herramientas analíticas que se emplean para el diseño clásico de presas de gravedad.

Con la aparición del CCR como mejora de procedimiento constructivo y de los métodos de diseño para determinar el estado de esfuerzos y deformaciones en cualquier punto de la estructura y su interacción con la roca de cimentación, es posible ensayar variantes en la geometría clásica de las cortinas de gravedad con objeto de que sean igualmente seguras y funcionales, construidas a un costo menor y en un tiempo más corto; además de las ventajas que se tienen al construirse una cortina de CCR, como se vió en el capítulo VI.

Al utilizarse un proceso continuo de elaboración, el método del CCR logra el manejo de grandes volúmenes de materiales con equipos de alta capacidad y eficiencia, lo que produce una importante disminución en el costo por manejo del concreto fresco y reduce la necesidad de usar formas y métodos de enfriamiento

para concreto masivo. Por otra parte, al obtener una densificación más eficiente con la maquinaria pesada que con procedimientos tradicionales se obtiene una mayor resistencia que con el concreto convencional para el mismo contenido de cemento, lo que permite reducir el consumo, aunado al uso de puzolanas con propiedades cementantes, lo que también disminuye el costo, que oscila entre los 26 y 75 doll/m<sup>3</sup> en presas, (lo que depende del consumo de cemento) y entre 61 y 93 doll/m<sup>3</sup> en pavimentos.

En presas con sección de gravedad, se estima que la reducción en el costo de la obra es del 33% y en pavimentos del 50 al 75%.

A fin de que el diseñador cuente con los elementos necesarios para lograr un proyecto adecuado de las estructuras, es indispensable realizar estudios geotécnicos en el sitio. Los estudios geotécnicos determinarán los parámetros mecánicos indispensables para el diseño, como son módulo de elasticidad, la relación de Poisson y la resistencia al esfuerzo cortante. Estos parámetros se obtendrán de preferencia en el campo con procedimientos plenamente conocidos, por ejemplo, con los ensayos de placa y el corte directo; o bien, en el laboratorio con métodos convencionales.

Gracias a los métodos disponibles para el análisis, se pueden conocer los requerimientos de resistencia que debe cumplir el CCR. Se deben efectuar estudios para conocer la potencialidad y la calidad de los materiales que se pueden emplear en la construcción y deben ser elegidos aquellos que

reúnan los requisitos impuestos por el diseño y que conduzcan a la solución económica más conveniente.

El diseño de mezclas para el CCR se encuentra en una etapa de incipiente desarrollo en nuestro país. Por ello es necesario ensayar en el laboratorio y en el campo diversas combinaciones entre los parámetros significativos que condicionan el comportamiento de las mezclas tanto al elaborarse como cuando han endurecido. Esta no es una limitación a la nueva tecnología, sino un reto a la capacidad del ingeniero que diseñará y construirá estas estructuras.

Una vez elegidos los materiales y diseñado la mezcla, se llevarán a cabo bordos de prueba. La finalidad es obtener especímenes para determinar el peso volumétrico óptimo, la resistencia al esfuerzo cortante, el módulo de elasticidad y la relación de Poisson. Con la información de laboratorio y de campo será posible verificar el diseño realizado preliminarmente e, incluso, se podrá definir la sección de la cortina con el factor de seguridad deseado. El análisis de estos resultados permitirá elaborar las especificaciones de construcción y establecer el criterio de control de calidad del CCR, pues es necesario garantizar y vigilar que la obra se construya conforme a proyecto.

Además de los resultados que se obtengan en el bordo de prueba depende la selección del equipo a utilizar para la compactación, aunque cabe señalar que dos modelos y marcas distintas de equipo pueden obtener resultados similares, la

preferencia de uno sobre otro serían el costo, el rendimiento y disponibilidad en el mercado.

Será necesario continuar con los estudios acerca de la preparación de la superficie para desplante; la adherencia entre capas; la colocación en empotramientos; el tiro, tendido y compactación del concreto; la formación del elemento impermeable cuando sea requerido por el proyecto; el procedimiento de colocación de formas prefabricadas cuando se requieran paramentos verticales o con pendiente muy grande; y sobre el equipo idóneo para la construcción.

Con la información obtenida del diseño y conocidas las zonas críticas, tanto estructural como geotécnicamente, será posible establecer un programa de instrumentación con la que se puedan evaluar las consideraciones realizadas en el diseño, durante la construcción y en la fase de operación para conocer su comportamiento ante las acciones que las afectan.

Finalmente se puede concluir que la construcción de pavimentos de CCR resulta una alternativa sumamente económica, pero debido a 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 se debe tener un mejor control de calidad.

De experiencias obtenidas en tramos de prueba realizadas en México se sabe que la prueba Proctor Modificada ha funcionado muy bien para obtener la densidad máxima y el contenido óptimo de humedad, pero también se recomienda utilizar el densímetro

nuclear para medir la densidad y obtener el contenido de humedad, sólo que esto aumenta el costo debido a que el equipo que se utiliza es importado.

Actualmente, se están realizando investigaciones más profundas sobre la aplicación de CCR a pavimentos, se habla por ejemplo de colocarlo en dos capas con una energía de precompactación más alta, para lograr una superficie de rodamiento de mayor calidad. Otra aportación de estas investigaciones es el tratamiento que se ha seguido en las juntas transversales para evitar la reflexión en la carpeta, el cual ha sido la inclusión de mallas geosintéticas a lo largo de la junta aserrada. Por lo anterior, es importante mencionar que en medida que se entienda cual es el comportamiento del material podemos aprovechar mejor sus propiedades mecánicas.

Se recomienda que antes de iniciar la construcción de un tramo de prueba, se realicen todos los estudios necesarios para el desarrollo del proyecto final, ya que sin el apoyo de estos, es difícil que se obtengan resultados satisfactorios.

Es decir, construir más kilómetros de carreteras y un mayor número de presas, las cuales son obras de infraestructura que influyen directamente en el desarrollo del país.

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- Alcáraz Lozano F.  
" Diseño y Construcción de Pavimentos. Factores que Afectan la Compactación "  
División Educación Continua ; Facultad de Ingeniería, UNAM.
- 2.- Alcáraz Lozano F.  
" Compactación en el Campo "  
División Educación Continua ; Facultad de Ingeniería, UNAM.
- 3.- Juárez Badillo E. y Rico Rodríguez A.  
" Mecánica de Suelos " tomo I y II  
Ed. Limusa México
- 4.- Marsal J.R. y Reséndiz Nuñez D.  
" Prensa de Tierra y Enrocamiento "  
Ed. Limusa México
- 5.- Nichols Jr. H.L.  
" Movimiento de Tierras "
- 6.- Peurifoy L. R.  
" Métodos Planación y Equipo de Contrucción "  
Ed. Diana S.A.
- 7.- Ponce Serrano A.  
" Trabajo del Equipo de Compactación "  
Facultad de Ingeniería, UNAM. Tesis Profesional.
- 8.- Terrón Sierra  
" Métodos mecánicos de Pruebas de Laboratorio en Compactación de Suelos para Vías Terrestres "  
Facultad de Ingeniería, UNAM. Tesis Profesional.
- 9.- Zeevart L.  
" Mecanica de Suelos " Vol. II  
Facultad de Ingeniería, UNAM.
- 10.- UNAM., Facultad de ingeniería  
" Breve Descripción del Equipo Usual de Construcción "
- 11.- UNAM., Facultad de ingeniería  
" Factores de Consistencia y Precios Unitarios "  
FUNDEC A.C.
- 12.- García Suárez F.  
" Estudios Económicos Sobre Conveniencia de la Compactación de Materiales por Capas Delgadas "  
Facultad de Ingeniería, UNAM. Tesis Profesional.
- 13.- Neville A.M.  
" Tecnología del Concreto " tomo I y II  
IMCYC. A.C.

- 14.- Schrader E.K.  
" Comportamiento de Presas de Concreto Compactado con Rodillo "  
cursos IMCYC.
- 15.- Schrader E.K.  
" Diseño y Construcción de Presas con ccrepobre "  
cursos IMCYC.
- 16.- Keifer O.  
" Pavimentos de Concreto Compactado con Rodillos "
- 17.-Muños Hernández A.  
" Procedimiento Constructivo de la Cortina de concreto y Rodillado de la Presa Trigomil "  
Facultad de Ingeniería, UNAM. Tesis Profesional.
- 18.- UNAM., Facultad de Ingeniería  
" Apuntes de Movimiento de Tareas " Tomos I y II
- 19.- Mosqueda Tinoco Antonio  
" Presas de Concreto Rodillado "  
Revista Ingeniería Hidráulica en México Vol. I Num. II  
Epoca Septiembre - Diciembre de 1985.
- 20.- Nieto Rodriguez J.A.  
" Aplicaciones Práctica. Evaluación de Mezclas, Colocación y Control de Calidad del Concreto Compactado con Rodillos Dentro de los Pavimentos en las Carreteras y Aeropuertos de México "  
Facultad de Ingeniería, UNAM. Tesis Profesional.
- 21.- Castañeda Zavala S.  
" Concreto Compacto con Rodillo "  
Facultad de Ingeniería, UNAM. Tesis Profesional.
- 22.- Corona Ballesteros P.  
" Concreto Compactado con Rodillo "  
Revista IMCYC. Vol. V Nº 51 Agosto 1992
- 23.- Figueroa Gallo, Donato  
" Carreteras de C.C.R. la Mejor Solución "  
Revista IMCYC. Vol. II Nº 17 Octubre 1989
- 24.- Macolm R.H. Dunstan  
" Avances Recientes en Obras de Concreto Compactado con Rodillo "  
Revista IMCYC. Vol. 21 Nº 147 Julio 1983
- 25.- Schrader E.K.  
" Concreto para Cortinas Compactado con Rodillos "  
Revista IMCYC. Vol. 20 Nº 139 Nov 1982
- 26.- Torres Herrera  
" Concreto Compactado Rodillado en Presas y Pavimentos "  
C.N.A. 1990