

18
25



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS
PROFESIONALES ACATLAN

APLICACIONES DEL CONCRETO COMPACTADO
CON RODILLOS (C. C. R.) EN OBRAS
DE INGENIERIA CIVIL

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A

BENJAMIN JIMENEZ ALVARAZ

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



1992



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

INTRODUCCION.

CAPITULO I.- CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS (C.C.R.).

1.1. Antecedentes históricos y definición del C.C.R.....	1
1.2. Características de los materiales.....	5
1.2.1. Agregados.....	5
1.2.1.1. Condición de trabajabilidad.....	5
1.2.1.2. Condición de resistencia propia.....	6
1.2.1.3. Condición de estabilidad físico-química.....	6
1.2.2. Cemento.....	9
1.2.3. Agua.....	10
1.2.4. Aditivos.....	11
1.3. Propiedades del Concreto Compactado con Rodillos.....	12
1.3.1. Resistencia a la compresión.....	12
1.3.2. Resistencia a la tensión.....	14
1.3.3. Esfuerzo de adherencia en juntas horizontales para el Concreto Compactado con Rodillos.....	16
1.3.4. Estado de la superficie en el C.C.R.....	16
1.3.5. Moldeabilidad de la capa de recubrimiento.....	19
1.3.6. Durabilidad del concreto rodillado.....	20
1.3.6.1. Resistencia al congelamiento.....	20
1.3.6.2. Permeabilidad.....	20
1.3.7. Función de la ceniza volante.....	22

CAPITULO 2.- IMPORTANCIA DEL C.C.R. EN LAS OBRAS DE INGENIERIA CIVIL.

2.1. El Concreto Compactado con Rodillos en las obras de Ingeniería Civil.....	23
2.2. Proceso Constructivo.....	25
2.2.1. Preparación de la sub-rasante.....	25
2.2.2. Mezclado del concreto y producción.....	25
2.2.3. Transporte.....	27
2.2.4. Colocación del concreto.....	28
2.2.5. Compactación vibratoria.....	30
2.2.6. Juntas.....	37
2.2.7. Curado.....	38
2.2.8. Textura final del C.C.R.....	39

2.3.	Equipo utilizado.....	40
2.3.1.	Clasificación general del equipo.....	40
2.3.1.1.	Equipo de dosificación.....	40
2.3.1.2.	Equipo de transporte.....	40
2.3.1.3.	Equipo de colocación.....	41
2.3.1.4.	Equipo de compactación.....	41
2.3.2.	Breve descripción del equipo existente aplicable a la construcción de obras de C.C.R.....	41
2.3.2.1.	Motoconformadoras.....	42
2.3.2.2.	Compactadores.....	42
2.3.2.2.1.	Compactadores Neumáticos.....	43
2.3.2.2.2.	Compactadores Metálicos.....	44
2.3.2.3.	Camión de volteo.....	45
2.3.2.4.	Pavimentadora.....	46
2.3.2.5.	Planta dosificadora.....	47
2.3.2.6.	Cargadores frontales.....	48
2.4.	Control de Calidad.....	50
2.4.1.	Ensayes de laboratorio.....	52
2.4.2.	Control de C.C.R. en la obra.....	58

CAPITULO 3.- EL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS EN LAS PRESAS.

3.1.	Presa de Willow Creek.....	72
3.1.1.	Introducción.....	72
3.1.2.	Bordo de pruebas.....	73
3.1.3.	Productividad y tiempo de construcción.....	74
3.1.4.	Agregados.....	77
3.1.5.	Mezclado.....	78
3.1.6.	Transporte, tendido y compactación.....	79
3.2.	Presa la Manzanilla.....	80
3.2.1.	Introducción.....	80
3.2.2.	Ensayes de laboratorio.....	80
3.2.3.	Bordo de prueba.....	84
3.3.	Presa Trigomil.....	87
3.3.1.	Introducción.....	87
3.3.2.	Descripción, características y finalidades de la obra.....	87
3.3.2.1.	Excavación de glorieta.....	88
3.3.2.2.	Galerías de exploración, inspección y tratamientos.....	88
3.3.2.3.	Obra de toma provisional.....	88
3.3.2.4.	Atagüas.....	90
3.3.2.5.	Desvío.....	90
3.3.2.6.	Cortina.....	90
3.3.2.7.	Vertedor.....	91
3.3.2.8.	Obra de toma definitiva.....	93
3.3.2.9.	Tapón de cierre.....	98

3.3.3.	Planeación general de la obra.....	97
3.3.3.1.	Instalación y manejo de materiales.....	97
3.3.3.2.	Secuencias de construcción.....	105
3.3.4.	Bordo de pruebas.....	108
3.3.5.	Construcción de la cortina de Concreto Compactado con Rodillos.....	112
3.3.6.	Conclusiones.....	112

CAPITULO 4.- APLICACION DEL C.C.R. EN CARRETERAS.

4.1.	Carretera México-Cuernavaca.....	117
4.1.1.	Datos generales del proyecto.....	117
4.1.2.	Materiales empleados.....	117
4.1.3.	Diseño del espesor del pavimento.....	119
4.1.4.	Proceso constructivo.....	119
4.1.4.1.	Producción.....	119
4.1.4.2.	Colocación.....	120
4.1.4.3.	Compactación.....	120
4.1.4.4.	Curado.....	121
4.1.5.	Control de calidad.....	122
4.1.5.1.	Pruebas de laboratorio.....	122
4.1.5.2.	Propiedades del C.C.R.....	123
4.1.5.2.1.	Propiedades del C.C.R. en estado fresco.....	123
4.1.5.2.2.	Propiedades del C.C.R. en estado endurecido.....	125
4.1.5.3.	Pruebas de campo.....	129
4.1.6.	Comportamiento del pavimento a largo plazo.....	131
4.2.	Tramo de prueba en Cd. Juarez Chihuahua.....	132
4.2.1.	Descripción general de la obra.....	132
4.2.2.	Proceso constructivo.....	132
4.2.3.	Control de calidad.....	133
4.2.4.	Problemas de campo.....	133
4.3.	El Concreto Compactado con Rodillos en España.....	134
4.3.1.	Introducción.....	134
4.3.2.	Desarrollo de los pavimentos de C.C.R. en España.....	134
4.3.3.	Especificaciones de diseño.....	138
4.3.3.1.	Espesores y resistencias.....	138
4.3.3.2.	Juntas transversales, longitudinales y de construcción.....	138
4.3.3.3.	Textura y superficie de acabado.....	139
4.3.4.	Materiales.....	139
4.3.4.1.	Agregados.....	139
4.3.4.2.	Aglutinante.....	140
4.3.4.3.	Contenido de humedad y energía de compactación.....	140
4.3.4.4.	Aditivos.....	141

4.3.5. Construcción de la autovía Sevilla-Granada-Baza.....	141
4.3.5.1. Mezclado.....	141
4.3.5.2. Transporte.....	142
4.3.5.3. Extendido y compactación.....	142
4.3.5.4. Juntas.....	146
4.3.6. Costos.....	148

CAPITULO 5.- DIVERSAS APLICACIONES DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS.

5.1. Patio de selección de troncos en Cayuse Columbia Británica.....	150
5.2. Camino de prueba construido en Fort Lewis, WA.....	152
5.3. Puerto de Tacoma.....	154
5.4. Aeropuerto Internacional de Portland, OR.....	158

CONCLUSIONES.

BIBLIOGRAFIA.

INTRODUCCION

Con el presente trabajo se pretende dar a conocer la técnica del Concreto Compactado con Rodillos, para que una vez que se conozcan sus características y sus ventajas, esta técnica sea utilizada en la construcción de obras de Ingeniería Civil.

En el primer capítulo se hablará del origen y la definición de lo que es el Concreto Compactado con Rodillos, así como de las características de los materiales y las del propio concreto, tanto en estado fresco como en estado endurecido.

En el siguiente capítulo se hará mención del procedimiento que se lleva a cabo en la construcción de pavimentos y el equipo que se utiliza. Posteriormente se tratará el control de calidad del C.C.R.

El capítulo tercero presenta los procedimientos constructivos de tres presas, las cuales son: la presa Willow Creek, construida en Estados Unidos, siendo ésta la primera construida totalmente con Concreto Compactado con Rodillos; la siguiente es la presa la Manzanilla, ésta fue la primera experiencia que se tuvo en México usando la técnica del C.C.R.; y finalmente la presa Trigomil, también construida en México, la cual es la más alta en el mundo y además construida totalmente con C.C.R.

El cuarto capítulo se refiere al Concreto Compactado con Rodillos en carreteras, se presentan dos tramos de prueba construidos con C.C.R. en México, uno en la carretera México-Cuernavaca y el otro en Ciudad Juárez Chihuahua; se finaliza dicho capítulo con la evolución que ha tenido el C.C.R. en España y se menciona el procedimiento constructivo de una autovía construida en ese país.

INTRODUCCION

Con el presente trabajo se pretende dar a conocer la técnica del Concreto Compactado con Rodillos, para que una vez que se conozcan sus características y sus ventajas, esta técnica sea utilizada en la construcción de obras de Ingeniería Civil.

En el primer capítulo se hablará del origen y la definición de lo que es el Concreto Compactado con Rodillos, así como de las características de los materiales y las del propio concreto, tanto en estado fresco como en estado endurecido.

En el siguiente capítulo se hará mención del procedimiento que se lleva a cabo en la construcción de pavimentos y el equipo que se utiliza. Posteriormente se tratará el control de calidad del C.C.R.

El capítulo tercero presenta los procedimientos constructivos de tres presas, las cuales son: la presa Willow Creek, construida en Estados Unidos, siendo esta la primera construida totalmente con Concreto Compactado con Rodillos; la siguiente es la presa la Manzanilla, esta fue la primera experiencia que se tuvo en México usando la técnica del C.C.R.; y finalmente la presa Trigomil, también construida en México, la cual es la más alta en el mundo y además construida totalmente con C.C.R.

El cuarto capítulo se refiere al Concreto Compactado con Rodillos en carreteras, se presentan dos tramos de prueba construidos con C.C.R. en México, uno en la carretera México-Cuernavaca y el otro en Ciudad Juárez Chihuahua; se finaliza dicho capítulo con la evolución que ha tenido el C.C.R. en España y se menciona el procedimiento constructivo de una autovía construida en ese país.

En el último capítulo se mencionan los procedimientos constructivos de varias aplicaciones que se han tenido en Estados Unidos utilizando la técnica del C.C.R., los cuales son: un patio de selección de troncos, un camino de prueba, aplicaciones en el Puerto de Tacoma y en el Aeropuerto Internacional de Portland, Oregón.

CAPITULO I

CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS (C.C.R.)

1.1. DEFINICION Y ANTECEDENTES HISTORICOS DEL C.C.R.

DEFINICION DEL C.C.R.

Para tener una idea más amplia de lo que es el Concreto Compactado con Rodillos, se procederá a definir en primer término lo que es el concreto. El Comité del ACI define el concreto como, "un material compuesto que consiste esencialmente en un medio aglutinante dentro del que se encuentran partículas o fragmentos de agregado; en el concreto de cemento portland el aglutinante es una mezcla de cemento portland y agua". En términos generales lo anterior quiere decir que la cantidad de "medio aglutinante" (pasta) debe ser suficiente para contener todas las partículas o fragmentos del agregado.

Para Robert W. Cannon lo anterior implica que:

1.- La mezcla debe de tener bastante pasta para llenar todas las cavidades del agregado y cubrir toda el área superficial de los agregados, así como, un exceso de pasta suficiente para tomar en cuenta las probables variaciones de la granulometría del agregado.

2.- Los agregados finos deben estar separados del agregado grueso durante los procedimientos de manejo y dosificación, como una medida mínima de control.

El Concreto Compactado con Rodillos se define como "un concreto seco, el cual ha sido compactado por vibración externa utilizando rodillos vibratorios". Difiere del concreto convencional principalmente en la consistencia requerida. Para una compactación efectiva, el C.C.R. debe ser suficientemente seco para soportar el peso del equipo vibratorio, pero suficientemente húmedo para permitir una adecuada distribución de la pasta durante el mezclado y el proceso de vibrado.

Durante la II Conferencia sobre Concreto Compactado con Rodillos que se llevó a cabo en San Diego, California del 29 al 2 de marzo de 1988, todos los autores coincidieron en definir el C.C.R. como una tecnología constructiva que utiliza una mezcla de concreto con revenimiento cero, bajo contenido de cemento (de 80 a 100 kilogramos por metro cúbico), presencia opcional de puzolanas (de 20 a 30 kilogramos por metro cúbico), relación agua/cemento muy baja, buena graduación de agregados con un tamaño máximo del orden de 3 pulgadas (76 mm), que generalmente se mezcla en plantas de proceso continuo y se transporta y coloca usando equipos usuales para movimiento de tierras, en capas del orden de 15 cm y sometiendo cada capa a compactación con equipo vibratorio.

El Concreto Compactado con Rodillos (Concreto Seco Compactado, Roller Compacted Concrete o RCC) es un concreto con propiedades y características de comportamiento similares a las de los tradicionales. La diferencia básica entre ambos tipos es la consistencia en estado fresco debido a las distintas relaciones agua/cemento, que para los Compactados con Rodillo es más baja, del orden de 0.30.

La diferencia anotada anteriormente, tiene grandes implicaciones desde el punto de vista de las condiciones para la colocación del material y del instante en que se pueden dar al servicio las obras con él construidas, ya que ésta hace que sean necesarias altas energías de compactación para la colocación del concreto, similares a las requeridas en las obras de construcción de bases granulares, proporcionándole a las obras construidas con Concreto Compactado con Rodillos la capacidad de poderse dar al servicio inmediatamente se retiren los equipos de compactación.

Con frecuencia suele confundirse el Concreto Compactado con Rodillos con las bases tratadas con cemento BTU (Cement Treated Bases CTB) o con el rolacreto, por lo que vamos a destacar la diferencia que existe entre ambos. El rolacreto se define como una mezcla de suelo-cemento, cuya consistencia sin revenimiento puede igualar o exceder de la del Concreto Compactado con Rodillos, pero que con frecuencia puede contener un volumen insuficiente de pasta para llenar todas las cavidades y recubrir todas las partículas del agregado. Para tener una idea más amplia de dicha diferencia ver figura 1.1.

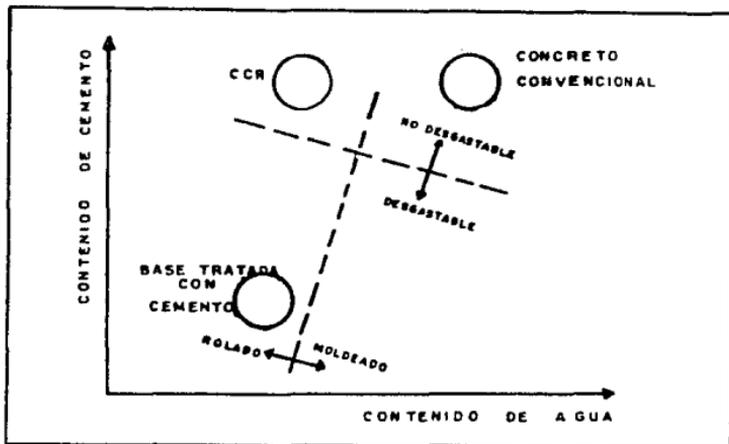


FIGURA 1.1. DIFERENCIA ENTRE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS, CONCRETO CONVENCIONAL, Y BASE TRATADA CON CEMENTO.

FUENTE: SWEDISH EXPERIENCES WITH RCC. CONCRETE INTERNATIONAL, VOL 9, No. 2, FEBRERO 1987

ANTECEDENTES HISTORICOS DEL C.C.R.

El Concreto Compactado con Rodillos se originó en el otoño de 1923, en el camino de Sheridan en Chicago E.U.A., donde se construyó una losa de concreto de 7 u 8" (17.8 a 20.3 cm) de espesor, construida con una técnica conocida como Pavimento de Concreto Comprímido "Armorplated".

El primer registro que se tiene de Concreto verdaderamente Compactado con Rodillos es la pavimentación del aeropuerto de Yakima, en Washington, la cual se llevó a cabo en el año de 1941. A pesar de que el equipo era rudimentario (según las normas actuales), y el diseño de la mezcla y el control tal vez no fueron perfectos, éste pavimento ha prestado muy buen servicio. Durante sus 51 años de servicio solamente se le ha agregado una delgada capa de asfalto.

Más tarde se volvieron a encontrar las palabras Concreto Compactado con Rodillos, en el verano de 1952 en un camino construido en Crawley, Inglaterra. En este proyecto, el contratista erigió una planta central mezcladora con una capacidad promedio de 250 yardas cúbicas (191.2 m³), y un máximo de 390 (298.3 m³). Se pensó entonces que solamente con ese nivel de producción la Compactación con Rodillos sería confiable. El concreto tenía una relación agregado-cemento de 15:1 y una relación agua/cemento de 0.70.

Con lo anterior nos podemos dar cuenta de que existen aplicaciones documentadas de algo parecido al C.C.R. desde los años 40's, pero no es sino hasta los 70's cuando empieza una nueva era en la utilización del Concreto Compactado con Rodillos. La crisis económica elevó los precios del petróleo y consecuentemente la atención se volvió hacia los materiales granulares enriquecidos con cemento. Fue así como el Concreto Compactado con Rodillos se utilizó en forma masiva en presas, entre ellas destacan Tarbela en Pakistán, Willow Creek en Estados Unidos y Tucuri en Brasil.

Con la creciente popularidad del C.C.R. se comenzaron a construir muchas secciones de prueba para pavimentos, en un esfuerzo para encontrar nuevas aplicaciones. Sin duda alguna, de los primeros en esta área lo fue el Cuerpo de la Armada de los Estados Unidos. Como consecuencia se encontró que los pavimentos de C.C.R. podían competir con los pavimentos de concreto convencional. El Concreto Compactado con Rodillos resultó rápido de construir y con ahorros potenciales hasta de un cuarto a un tercio del costo de un pavimento de concreto convencional. Además, la transición entre pavimentación asfáltica y pavimentación con C.C.R. fue relativamente simple, ya que se puede utilizar el mismo equipo con un reducido grupo de personas.

Los primeros reconocimientos de los estudios y aplicaciones del C.C.R. tuvieron origen en las conferencias de la Engineering Foundation, celebrada en Asilomar, California en 1970 y 1972.

Fue en la Segunda Conferencia titulada "Construcción Económica de Presas de Concreto", donde Robert W. Cannon presentó la ponencia "Construcción de Presas de Concreto Usando Métodos de Compactación de Tierra", y en 1972 en el Simposio del ACI "Nuevos Métodos de Mezclado y Colocación del Concreto" realizado en Dallas, Texas. Cannon expuso una

ponencia titulada "Compactación de Concreto Masivo con Rodillo Vibratorio"; en ambas ponencias Cannon mostró los resultados de pruebas aplicadas a concreto transportado en camiones, extendido con un cargador frontal y Compactado con Rodillo Vibratorio.

En el año de 1975 fue empleada otra vez la expresión Concreto Compactado con Rodillos en la "Especificación General de Construcciones No. G-48 para Concreto Compactado con Rodillos" de la Autoridad del Valle de Tennessee. La especificación fue emitida para "regir la producción y el colado del concreto sin revenimiento, mediante métodos de construcción relacionados normalmente con la colocación de Enrocamientos Compactados con Rodillos". El término Rolacreto fue utilizado por primera vez en 1974 por John Lowe III, con referencia al colado urgente de 400 mil metros cúbicos colados en la Presa Tarbela. Describió el rolacreto como "concreto hecho con grava de banco en bruto (sin cribar ni lavar) y muy poco cemento, colocado en forma continua mediante métodos de terraplenado".

El Concreto Compactado con Rodillos (C.C.R.) ha recibido mucha atención durante los últimos años, debido a la creciente aceptación de su empleo como concreto masivo en la construcción de presas. Sin embargo, un avance reciente es el empleo cada vez mayor de C.C.R. como material durable de pavimentación, que soporta cargas pesadas y cuyo costo es relativamente bajo. El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de E.U.A. ha aprobado dicho material para fajas de estacionamiento para naves aéreas, pistas de rodaje, así como para otros pavimentos de instalaciones militares.

1.2. CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES.

1.2.1. AGREGADOS.

Por razones económicas y de estabilidad físico-química, es conveniente que la pasta de cemento sea sustentada por un esqueleto inerte. Este papel es desempeñado por los agregados, los cuales constituyen alrededor de 65 a un 75% del volumen total del hormigón y el cual está integrado por partículas granulares de material pétreo de tamaño variable.

Estas partículas se originan por fragmentación de las rocas de la corteza terrestre, ya sea en forma natural o artificial. Generalmente el árido se constituye mediante el aporte de varias fracciones distintas, conteniendo cada una distintos tamaños de partículas.

Para su integración con el cemento, los agregados deben cumplir ciertas condiciones, las cuales pueden resumirse en tres grupos principales:

1.2.1.1. Condición de Trabajabilidad.

La condición de trabajabilidad puede definirse como el conjunto de características necesarias para que los agregados al ser incorporados al cemento le confieran una trabajabilidad adecuada en su estado fresco, ésta puede subdividirse en:

a) Condición de Granulometría.- Tal como se indicó, los agregados se utilizan separados en fracciones, cada una de las cuales contiene una gama distinta de tamaños de partículas. La distribución de los porcentajes en peso para cada tamaño de partículas se denomina granulometría del agregado.

Dado que no es posible determinar en forma práctica su porcentaje de participación para cada tamaño, ésta se determina haciendo pasar una muestra representativa del agregado por una serie de tamices ordenados, de abertura decreciente. Los pesos retenidos en cada tamiz se expresan como porcentajes del peso total de la muestra y, finalmente, la granulometría del agregado se acostumbra expresar en porcentajes acumulados que pasan por las mallas de la serie utilizada. En la tabla 1.1. de la página 8 se puede apreciar la forma en la que se expresan dichos porcentajes.

b) Condición de Contenido de Granos Finos.- La mezcla necesita de un contenido de granos muy finos, de un tamaño inferior a 0.080 mm, para que tenga una adecuada trabajabilidad. Parcialmente este aporte es efectuado por el cemento, el que está normalmente constituido en su casi totalidad por partículas menores de tamaño, pero, en

mezclas con bajas dosis de cemento, se requiere que también los agregados aporten parte de éstas partículas.

Aun cuando, por las razones expuestas, el contenido de granos finos debería analizarse globalmente, se acostumbra limitar el aporte proveniente de los agregados.

c) Condición de Porosidad.- La porosidad de un agregado está relacionada con la absorción de agua. Una alta porosidad es una característica desfavorable, pues está normalmente asociada a alterabilidad por parte de los agentes atmosféricos; además, introduce un factor de variabilidad en el hormigón al dificultar el control de la dosis de agua, debido a que la cantidad de agua absorbida por el agregado resultante depende de las condiciones de empleo de la mezcla en obra; en particular, de los tiempos de espera que se producen desde la elaboración hasta la puesta en obra de la mezcla.

1.2.1.2. Condición de Resistencia Propia.

El agregado debe ser capaz de resistir los efectos ambientales y las tensiones internas que le producen las sollicitaciones aplicadas sobre el elemento del cual forma parte. Esta última condición es más importante si se considera que, debido a su forma irregular, pueden producirse concentraciones de dichas tensiones internas. La resistencia de un agregado no resulta fácil de medir en forma directa, por lo que se recurre a ensayos indirectos, tal como el ensayo de abrasión o el de trituración.

1.2.1.3. Condición de Estabilidad Físico-Química.

Un agregado debe ser capaz de resistir las acciones físico-químicas generadas por las condiciones ambientales en las que debe subsistir y de las internas derivadas de su incorporación en la mezcla.

a) Estabilidad Química.- Para la estabilidad química de un agregado (árido) deben considerarse básicamente los dos aspectos que se señalan a continuación:

- Inalterabilidad ante los compuestos producidos de fraguado de la pasta de cemento. Los agregados pueden contener componentes combinados con los compuestos producidos durante el fraguado de la pasta de cemento.

De estos componentes, son potencialmente más peligrosos aquellos que en su constitución contienen sílice amorfa, tales como el ópalo, la calciedonia y los vidrios volcánicos, los sulfatos y sulfuros de hierro y calcio, las calizas dolomíticas y las arcillas expansivas, los cuales

al reaccionar forman compuestos expansivos, que pueden llegar a desintegrar la mezcla.

- No incorporación de productos nocivos. El agregado no debe incorporar al hormigón productos que puedan alterar el proceso de fraguado y endurecimiento de la pasta de cemento. Entre los que pueden producir efectos más perniciosos se cuentan, la materia orgánica contenida principalmente en la arena, y las sales solubles en agua adheridas a los áridos.

La materia orgánica y en particular el ácido tánico, contenido en ella, producen un efecto retardador del fraguado que puede afectar la resistencia, especialmente a edades tempranas de la mezcla.

b) Estabilidad Física. - El agregado debe ser capaz de soportar las condiciones ambientales a que va a estar sometida la mezcla. De éstas condiciones, las más nocivas son los ciclos alternados de temperatura o humedad y, dentro de ellas, sin duda los ciclos alternados de temperatura baja y sobre 0° C.

El efecto de estos ciclos de hielo y deshielo está relacionado con la porosidad del agregado, pues se manifiesta a través del importante aumento de volumen que experimenta el agua al congelarse, la cual al estar absorbida por el agregado induce en éste tensiones de tracción, que pueden significar su destrucción progresiva al repetirse en forma cíclica.

La selección y granulometría de los agregados son factores importantes en la calidad y propiedades del C.C.R., aunque los requerimientos de calidad de los agregados utilizados en el concreto no se ven directamente influidos para los requerimientos de resistencia del concreto, la variabilidad del agregado sí afecta significativamente los requerimientos de cemento y agua de la mezcla que, a su vez altera la resistencia y la fluidez. La granulometría ideal para cubrir los requerimientos mínimos de la pasta será la que produzca la máxima densidad variable en seco con la mínima área de la superficie. La granulometría estudiada debe estar complementada con un porcentaje de finos no plásticos que pueden ser cenizas volantes o limos.

Para cualquier granulometría y tamaño máximo del agregado, el volumen mínimo de agregado que produzca una resistencia sin revenimiento, puede ser establecido proporcionando la parte de mortero necesaria para obtener la resistencia requerida aproximada y ajustando las proporciones de agregado grueso y mortero hasta lograr un revenimiento de cero.

Los agregados para Concreto Compactado con Rodillos son materiales pétreos clasificados como gravas, arenas y cenizas volantes. Los agregados pueden ser producto de la explotación de depósitos naturales en los cruces de ríos, o bien, producto de la explotación y trituración de canteras de roca. Estos agregados por lo general son de origen calizo o silíceo y se pueden suministrar en tres, dos o un tamaño, dependiendo de su clasificación.

Se recomienda que de el material utilizado en la dosificación, cuando menos las dos terceras partes, sean producto de la trituración de rocas. Las gravas y arenas se almacenan clasificadas, separándolas de manera que no se mezclen entre sí, a fin de obtener la granulometría de proyecto.

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

Para los materiales de C.C.R. se exige la misma calidad que para los utilizados en el concreto convencional. Normalmente para evitar la segregación y obtener una mejor calidad de la superficie, se utilizan agregados triturados con tamaños máximos de 20 mm (3/4") o 18 mm (5/8") en el caso de pavimentos; los rangos de cada tamaño se presentan en la tabla 1.1. No obstante algunos proyectos han utilizado agregados más gruesos (38 mm, 1 1/2"), pero observaron durante la construcción una segregación significativa, que obligó a disminuir este tamaño máximo.

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

TABLA 1.1. GRANULOMETRIA TIPICA DE LOS AGREGADOS UTILIZADOS EN LOS PAVIMENTOS DE C. C. R.

FUENTE: CARRETERAS DE C. C. R. LA MEJOR SOLUCION.

REVISTA IMCYC, VOL. 2, No. 17, OCTUBRE 1989.

Cabe mencionar que la granulometría incluye el cemento con la finalidad de limitar el contenido de finos que pasa la malla 200, a los límites que se fijan en la tabla 1.1. A pesar de que la calidad del agregado es la misma que para un concreto convencional, el control de la graduación es mucho más estricto y, en algunas ocasiones, no será necesario lavar el material para retirar las partículas que pasan la malla No. 200, si éstas no son plásticas. Se tiene conocimiento de casos en los que el conservar los finos resultó ser benéfico tanto para la compactación de la mezcla como para la obtención de la resistencia requerida.

La cantidad permitida de finos varía del 4 al 6% del peso total del agregado, según el tipo de concreto usado, siempre y cuando los finos no sean plásticos. Los finos plásticos no son recomendables.

1.2.2. CEMENTO.

El cemento se presenta en forma de un polvo finísimo de color gris, que mezclado con agua, forma una pasta que endurece tanto bajo el agua como el aire. Por la primera de éstas características y por necesitar agua para su fraguado se le define como un aglomerante hidráulico.

Es obtenido mediante un proceso de fabricación que utiliza principalmente dos materias primas: una caliza, con un alto contenido de cal en forma de óxidos de calcio, y un componente rico en sílice constituido normalmente por arcilla y eventualmente por una escoria de alto horno.

Estos componentes son mezclados en proporciones adecuadas y sometidos a un proceso de fusión incipiente en un horno rotatorio, del cual se obtiene un material granular denominado clínquer, constituido por cuatro compuestos básicos:

- Silicato tricálcico ($3CaO, SiO_2$)
- Silicato bicálcico ($2CaO, SiO_2$)
- Aluminato tricálcico ($3CaO, Al_2O_3$)
- Ferroatuminato tetracálcico ($4CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3$)

Estos se presentan en cuatro formas mineralizadas en conjunto con una base vítrea, integrada por los dos últimos. Estas fases constituyen un 95% del peso del clínquer, siendo el 5% restante componentes menores, principalmente óxidos de sodio, potasio, titanio, residuos insolubles y otros.

El clínquer es sometido a molienda mediante molinos de bolas hasta convertirlo en el polvo finísimo ya mencionado, adicionándose en esta etapa una proporción de yeso de alrededor de un 5% de su peso, destinado a regular el proceso de fraguado de la mezcla (pasta) de cemento, la que de otra manera endurecería en forma instantánea. El cemento así obtenido se denomina Cemento Portland.

Durante la molienda se pueden adicionar otros productos naturales o artificiales, constituyendo así los cementos portland con adiciones o especiales, los que, junto con mantener las propiedades típicas del portland puro (fraguado y resistencia), poseen además, otros auxiliares especialmente relacionados con la durabilidad, resistencia química y otras. Entre las adiciones más conocidas y utilizadas están, las puzolanas, las cenizas volantes y las escorias básicas granuladas de alto horno.

El concreto adecuado para la Compactación con Rodillos puede ser fabricado con cualquiera de los tipos de cemento portland básicos, pero la tendencia es hacia utilizar cementos con gran cantidad de adiciones activas, tal como los cementos puzolánicos hasta con un 50% de puzolanas pero con un bajo contenido de álcalis, con el objeto de bajar el calor de hidratación producido por los mismos, o los de escoria de alto horno con contenido de dicho material entre 25 y 65%. El contenido de cemento tiene que estar entre 230 y 330 Kg/cm².

La selección del tipo de cemento se basa en los requisitos estructurales y no en el método de colado y compactación del concreto, aunque se deben obedecer las especificaciones estándar para puzolanas a fin de determinar la conveniencia y seleccionar el tipo de puzolana que pueda utilizarse, la selección definitiva de ésta debe basarse en su comportamiento en el concreto requerido para la obra, de acuerdo con las pruebas pertinentes.

La disponibilidad de una puzolana determinada como satisfactoria puede ser la base para decidir si se utiliza o no. La diferencia fundamental en la selección y el proporcionamiento de los cementos y las puzolanas que se emplean en el Concreto Compactado con Rodillos y los utilizados en el concreto para fines estructurales normales, radica en el empleo de mayores volúmenes de puzolanas en el caso del C.C.R., y menos importancia del efecto de éstas en la trabajabilidad, para los concretos convencionales.

1.2.3. AGUA

El agua desempeña dos papeles en su calidad de componente del concreto:

- Participa en el proceso de hidratación del cemento, el cual no puede tener lugar sin su presencia.
- Otorga la trabajabilidad necesaria al concreto, siendo determinante para definir su fluidez.

Para su incorporación en el concreto, el agua debe presentar ciertas características de calidad, las cuales pueden resumirse de la siguiente forma:

- El uso de agua potable está permitido sin necesidad de verificar su calidad.

- El agua de mar solo puede utilizarse en la preparación de concretos de resistencia especificada inferior a 150 Kg/cm^2 .

- El agua con contenidos de azúcares, en forma de sacarosa o glucosa, no puede ser empleada para la preparación de concretos.

- Las aguas de origen desconocido deben ser sometidas a análisis químico.

En lo que se refiere al contenido de agua de la mezcla de los Concretos Compactados con Rodillos debe estar entre 4 y 7%. Se elige aquel contenido que haga que la mezcla en estado fresco se pueda compactar, a la máxima densidad seca, con la energía del ensayo Proctor Modificado.

1.2.4. ADITIVOS.

Los aditivos son productos que se emplean, generalmente en pequeñas cantidades, para modificar algunas de las características del concreto.

Por el bajo contenido de agua, se recomiendan aditivos que le den a la mezcla una mejor trabajabilidad. El tipo de aditivo que se ha utilizado es un retardante, que incrementa el tiempo de trabajabilidad de la mezcla, logrando que las operaciones de compactación puedan efectuarse adecuadamente. La cantidad de retardante varía de 0.5 a 1.0% del peso del cemento. En realidad este porcentaje tendrá que ser medido en la obra para evaluar su correcta dosificación.

1.3. PROPIEDADES DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS.

1.3.1. RESISTENCIA A LA COMPRESION.

Recientes investigaciones realizadas en la Universidad de Purdue, señalan que el C.C.R. presenta en laboratorio características de resistencia muy superiores a las del concreto convencional. Como un ejemplo de estas características se discute a continuación el módulo de ruptura del C.C.R., comparándolo con el del concreto regular. La tabla 1.2. presenta las proporciones en libras por yarda cúbica para varios C.C.R. (Los materiales cumplen con las normas ASTM para concreto hidráulico).

PROPORCIONES PARA CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS, lb/yd.cu					
Agregado grueso 1/2 pulgada			Agregado grueso 1 pulgada		
I	II	III	IV	V	VI
w/c=0.30	w/c=0.40	w/c=0.50	w/c=0.30	w/c=0.40	w/c=0.50
c=475	c=362	c=295	c=393	c=299	c=244
w=143	w=145	w=147	w=118	w=119	w=122
s=1244	s=1337	s=1385	s=1028	s=1104	s=1144
g=2287	g=2287	g=2287	g=2689	g=2689	g=2689

NOTA:

C=CEMENTO
W=AQUA
S=ARENA
G=GRAVA

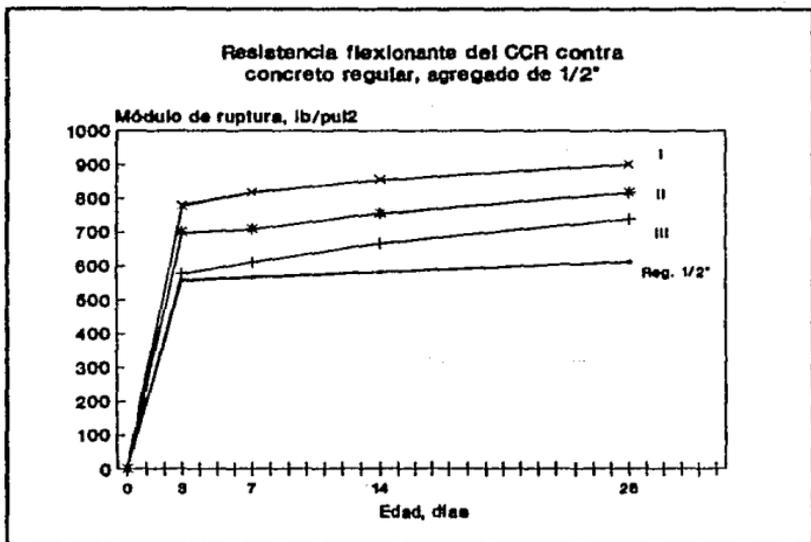
El agregado se considera en estado seco.

TABLA 1.2. PROPORCIONES PARA CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS EN LIBRAS POR YARDA CUBICA. ESTA TABLA ESTA RELACIONADA CON LAS FIGURAS 1.2. Y 1.3.

FUENTE: CONSTRUCCION DE CAMINOS DE BAJO VOLUMEN CON CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS. REVISTA INCYC, VOL. 1, No. 5, OCTUBRE 1968.

Las figuras 1.2. y 1.3. presentan los módulos de ruptura (ASTM C 78-84) de los C.C.R. a diferentes edades y sus respectivos concretos regulares. Las mezclas de C.C.R. se diseñaron siguiendo recomendaciones del Comité ACI 207 "Concreto Compactado con Rodillos", en tanto que los concretos regulares se hicieron con el contenido del C.C.R. más rico según el respectivo tamaño máximo

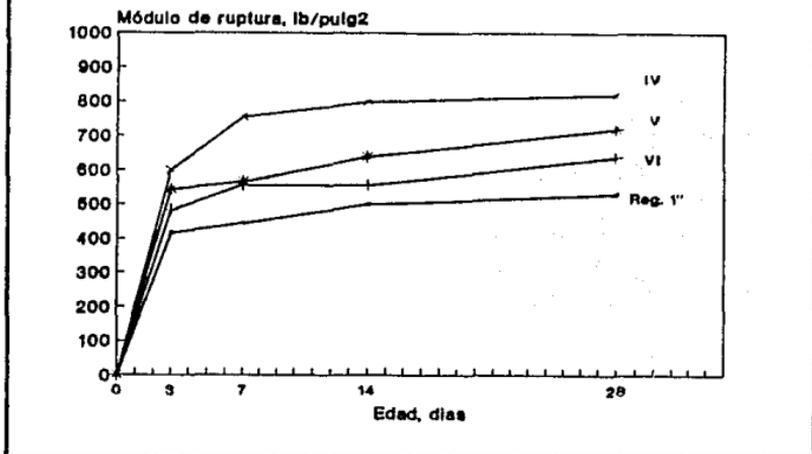
del agregado y con revenimientos de 1 y 1/2 pulgadas. De esta manera, el concreto regular designado como Reg. 1/2" se hizo con 475 lb (217 Kg) de cemento, 251 lb (114 Kg) de agua, 1530 lb (698 Kg) de arena y 1870 lb (853 Kg) de grava (1/2" tamaño máximo) por yarda cúbica de concreto; en tanto que el concreto Reg. 1" se hizo con 393 lb (179 Kg) de cemento, 208 lb (95 Kg) de agua, 1484 lb (668 Kg) de arena y 2050 lb (935 Kg) de grava (1" tamaño máximo) por yarda cúbica de concreto.



**FIGURA 1.2. RESISTENCIA FLEXIONANTE DEL C. C. R. CONTRA
CONCRETO REGULAR, AGREGADO DE 1/2 PULGADA.**

**FUENTE: LA TECNOLOGIA DEL CONCRETO COMPACTADO CON
RODILLOS. REVISTA INCYC, VOL. 1, No. 5,
OCTUBRE DE 1988.**

**Resistencia flexionante del CCR contra
concreto regular, agregado de 1"**



**FIGURA 1.3. RESISTENCIA FLEXIONANTE DEL C.C.R. CONTRA
CONCRETO REGULAR, ACREGADO DE 1 PULGADA.**

**FUENTE: LA TECNOLOGIA DEL CONCRETO COMPACTADO CON
RODILLOS. REVISTA IMCYC, VOL. 1, No. 5,
OCTUBRE DE 1968.**

Como se puede observar en las figuras 1.2 y 1.3, las diferencias en resistencia flexionante están relacionadas con el proporcionamiento de las mezclas. En forma clara, una reducción en el contenido de agua del C.C.R. de aproximadamente el 43% (mezclas I y IV) de la cantidad usada en su correspondiente concreto regular (Reg. 1/2" y Reg. 1") tuvo efectos significantes en el módulo de ruptura. Hasta aquí es evidente que una de las bondades del C.C.R., es el ahorro del cemento.

1.3.2. RESISTENCIA A LA TENSION.

Los datos de prueba recabados nos indican que la resistencia a la tensión de probetas horizontales de colados de Concreto Rodillado, superan en resistencia a la tensión de probetas verticales del mismo colado hasta en un 20%, por tanto, al comparar datos de prueba, es importante considerar la orientación del espécimen de prueba respecto al tipo de ensaye.

Una prueba de tensión directa de un corazón vertical probaría la resistencia a la tensión en el plano horizontal, en tanto que la misma prueba pero de un corazón horizontal probaría la resistencia en el plano vertical. Si se comparan las propiedades de tensión como función de la resistencia a la compresión, es importante recordar que dicha relación varía con la resistencia a la compresión. La relación también recibe influencia del método de prueba.

La figura 1.4., es una representación gráfica de datos de prueba de resistencia a la tensión-compresión de corazones tomados de diferentes construcciones. En la figura 1.4. los corazones representan la resistencia a la tensión en el plano horizontal.

La curva de $1/2\sqrt{f'c}$ parece ser lo más adecuado para los datos del Concreto Rodillado.

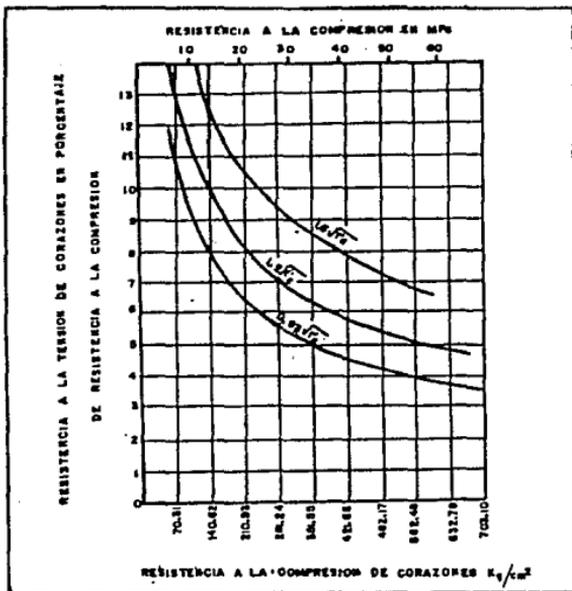


FIGURA 1.4. CORAZONES VERTICALES. RESISTENCIA A LA TENSION CONTRA RESISTENCIA A LA COMPRESION.

FUENTE: EL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS Y EL ROLACRETO EN LAS PRESAS. REVISTA IMCYC. VOL. 24. NO. 183, AGOSTO DE 1980.

Tomando $1.8\sqrt{f'c}$, como la curva que mas se ajusta al concreto convencional, se puede apreciar que la resistencia a la tensión en el plano horizontal del Concreto Rodillado es alrededor del 75% de la del concreto convencional con la misma resistencia a la compresión. En el plano vertical puede esperarse que la resistencia de ambos concretos (convencional y rodillado) sean aproximadas una con respecto de la otra.

Si se nos presenta una reducción en la relación de resistencias a la tensión-compresión, esto puede atribuirse a una mala adherencia del agregado debido al incremento en el área superficial de ésta y a una reducción en el volumen de pasta.

Para el Concreto Compactado con Rodillos se deduce que incluso un volumen menor de cemento combinado con un incremento de cavidades hará decrecer aún más las propiedades del material a la tensión.

1.3.3. ESFUERZO DE ADHERENCIA EN JUNTAS HORIZONTALES PARA EL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS.

Los principales factores que controlan la adherencia de un colado o capa de concreto con la siguiente capa son:

- a) Las condiciones de la superficie por adherirse.
- b) La moldeabilidad de la capa de concreto subsecuente o de recubrimiento.
- c) La magnitud del trabajo aplicado para compactar la capa de concreto subsecuente o de recubrimiento.

Existen muchos conceptos erróneos con respecto a la obtención de adherencia en la construcción de Concreto Compactado con Rodillos, que han conducido a los investigadores a buscar una solución única.

Un resumen de datos de pruebas, sobre la adherencia de corazones verticales, se presentan en la tabla 1.3.

1.3.4. ESTADO DE LA SUPERFICIE EN EL C.C.R.

La experiencia en la construcción de concreto convencional indicaba que para obtener la adherencia adecuada debía removerse la lechosidad en la superficie del colado. Por otro lado se decía que si no había presencia de lechado no había necesidad de darle un tratamiento a la junta.

Esto fue un concepto erróneo en la construcción de Concreto Rodillado, ya que las pruebas en diferentes colados indican que las juntas frías no dependen de la presencia de la lechosidad.

El porcentaje de juntas adheridas de la tabla 1.3. se muestra gráficamente en la figura 1.5., contra el tiempo de exposición.

JUNTAS DE CONSTRUCCION									
	JUNTA			NUMERO DE CORAZONES	ADHERIDOS (%)	ESFUERZO DE ADHERENCIA		NUMERO x	
	EDAD (DIAS)	TAMARO MAXIMO DEL AGREGADO PULG.	mm			Kg/cm ²	MPa		
TVA	3/4	3.0	76	12	75	11.81	1.16	12	100
TVA	7	1.5	38	12	92	-	-	24	100
TVA	1	1.5	38	3	25	-	-		
TVA	1	1.5	38	4	100	10.76	1.06	17	76
TVA	7	1.5	38	8	13	0	0		
TVA	1	1.5	38	12	50	20.39	2.00		
WES	2	3.0	76	11	0	-	-	11	100
		4.5	114					10	100
LC	1	1.5	38	20	85	12.66	1.24	20	65
LC	1	3.0	76	22	14	8.79	0.86	22	91
LC	1	3.0	76	6	100	7.03	0.69	6	50
LC	1	3.0	76	6	50	7.73	0.75	6	33
LC	1	1.5	38	20	80	21.80	2.14		
LC		3.0	76					20	55
LC	1	0.75	19	11	91	17.23	1.69		
LC	1	3.0	76	11	9			22	27
WES	1	1.5	38	4	0				
WES	1	1.5	38	12	0				
WES	1	1.5	38	12	58	4.22	0.41		
WES	1	0.75	19	12	92	8.44	0.82		
WES	1	1.5	38	6	100	15.82	1.55		
CIRIA	6	1.5	38	12	8				
CIRIA	6	1.5	38	12	0				
CIRIA	1	1.5	38	92	79	16.52	1.62		
CIRIA	3	1.5	38	12	100	9.84	0.97		
CIRIA	1/2	1.5	38	59	95				

TVA-AUTORIDAD DEL VALLE DE TENNESSEE

WES-WATERWAYS EXPERIMENT STATION

LC-RELLENOS DE PRUEBA DE LOST CREEK

CIRIA-CONSTRUCTION INDUSTRY RESEARCH AND INFORMATION ASSOCIATION.

TABLA 1.3. RESUMEN DE DATOS DE PRUEBA SOBRE ADHERENCIA DE
CORAZONES VERTICALES.

FUENTE: EL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS Y EL ROLACRETO EN
LAS PRESAS. REVISTA IMCYC. VOL. 24, No. 183, AGOSTO DE
1966.

Si se define como una junta fría al porcentaje de falla del
90% o más, se puede esperar que en cualquier momento ocurran
juntas frías después del fraguado final del concreto.

El tamaño máximo del agregado afecta claramente la adherencia en el Concreto Compactado con Rodillos. Si se proyectan a cero las curvas de la figura 1.5, la adherencia indicaría que el tamaño del agregado influye sobre el tiempo crítico para la formación de juntas frías, pero parece que no hay fundamento lógico para ello.

Se tienen pruebas de que las condiciones ambientales de climas frescos y húmedos pueden prolongar el tiempo de formación de una junta fría, después del fraguado final. Por ejemplo en la presa Tims Ford, E.U.A., el intervalo de tiempo entre colados fue de 17 a 18 horas. Por su ubicación, el colado fue protegido del sol durante su exposición. No se aplicó curado con agua, y la superficie no mostró evidencia de secado antes de cubrirlo con la siguiente capa.

El tratamiento de juntas frías parece tener poca influencia sobre la adherencia de colados de concreto rodillado. Los datos de prueba indican que la capa de concreto que cubre una junta fría debe de tener una consistencia con cierto revenimiento para lograr una buena adherencia.

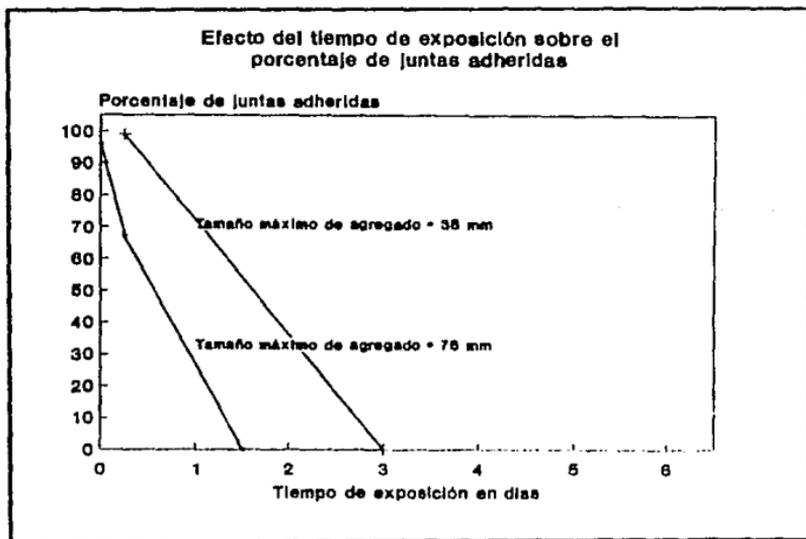


FIGURA 1.5. EFECTO DEL TIEMPO DE EXPOSICION SOBRE EL PORCENTAJE DE JUNTAS ADHERIDAS.
FUENTE: EL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS Y EL ROLACRETO EN LAS PRESAS. REVISTA IMCYC. VOL. 24, No. 183, 1966.

1.3.5. MOLDEABILIDAD DE LA CAPA DE RECUBRIMIENTO.

La textura de la superficie, la forma y volumen del agregado grueso y la fluidez del mortero, son factores que influyen, en la moldeabilidad del concreto y en la capacidad de éste para adherirse a una superficie. Una vez que la capa inferior del Concreto Rodillado se ha endurecido, la adherencia depende del trabajo de la pasta de recubrimiento con la estructura porosa de la pasta sólida del colado inferior.

Cuando la superficie inferior no se ha endurecido por completo, la adherencia se incrementará, de tal manera que la pasta del colado inferior se moldea y combina de nuevo con la pasta de recubrimiento. Es necesario el empleo de una mezcla adherente con revenimiento para lograr un buen entrelazado de juntas frías.

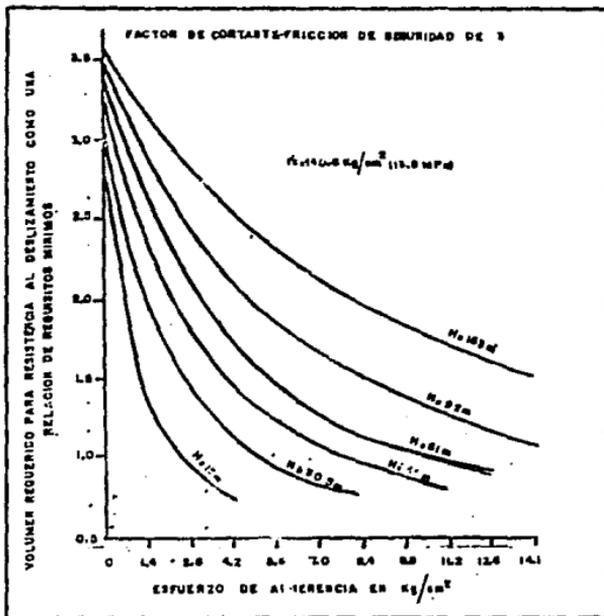


FIGURA 1.6. ESFUERZO DE ADHERENCIA CONTRA VOLUMEN REQUERIDO PARA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO COMO RELACION DE REQUISITOS MÍNIMOS.

FUENTE: EL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS Y EL COLADRETO EN LAS PRESAS. REVISTA IMCYC, VOL. 24, No. 183, AGOSTO 1966.

En el diseño de presas, la importancia del esfuerzo de adherencia, puede verse en la gráfica de los requisitos de adherencia contra la diferencia y requerimientos de volumen, para determinar las dimensiones de la cortina, de acuerdo con su estabilidad contra volteo. Ver figura 1.8.

De la figura 1.8 se puede deducir que a medida que se incrementa el esfuerzo de adherencia, el tamaño de la presa estará regido por requisitos de sección mínima para cualquier tirante de operación.

1.3.6. DURABILIDAD DEL CONCRETO RODILLADO.

1.3.6.1. Resistencia al Congelamiento.

El Concreto Compactado con Rodillos está sujeto a descascaramiento de la superficie bajo exposición a ciclos de congelamiento y descongelamiento. A menos que esté protegido por una capa aislante del concreto resistente a congelamiento. Sin esta capa de protección, la profundidad del descascaramiento será mayor en las partes de la presa donde no haya drenes y donde haya problemas de permeabilidad.

1.3.6.2. Permeabilidad.

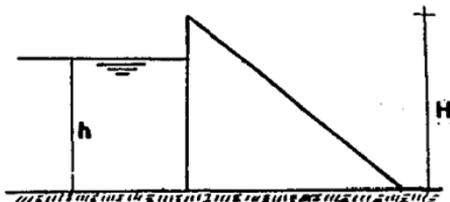
La principal fuente de filtración en el C.C.R. serán las juntas de construcción horizontales. Cuando haya un elevado porcentaje de filtración y el aglutinante adherente es bajo, existe la posibilidad de que al final se pierda todo el cementante de la junta.

La fricción en la junta es afectada por condiciones de subpresión a lo largo de toda ella. Sin embargo, existe un considerable intervalo de tiempo para juntas adheridas y los cambios en carga hidrostática y las modificaciones de presión, dependiendo del porcentaje de agua infiltrada. Si el entrelazo de una junta es muy bueno, el lapso puede ser de semanas o meses, en tanto que la subpresión en una junta no cementada con alta filtración, puede ajustarse en pocas horas.

La figura 1.7. muestra el efecto de la carga hidrostática de diseño sobre el factor de seguridad contra el deslizamiento.

De la siguiente figura se puede deducir que a medida que se aumenta la carga hidrostática sobre la cortina, el factor de seguridad de cortante-fricción contra deslizamiento disminuye, sin importar el valor de adherencia de juntas horizontales. En la misma figura podemos notar que el factor de seguridad de fricción-cortante contra deslizamiento aumenta a medida que se incrementa el valor del esfuerzo de adherencia de

juntas horizontales, sin que la carga hidrostática altere el resultado.



Efecto del tirante de agua y resist. de juntas sobre factor de cortante-fricción

Factor de seguridad contra deslizamiento

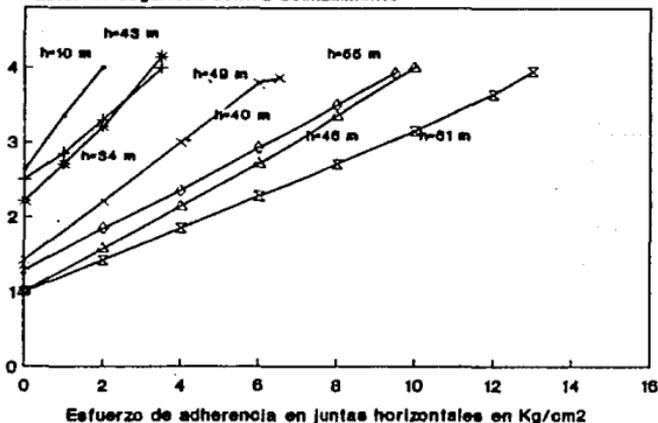


FIGURA 1.7. PRESA DE SECCION MINIMA; EFECTO DEL TIRANTE DE AGUA DE DISEÑO Y DE LA RESISTENCIA DE JUNTAS SOBRE EL FACTOR DE CORTANTE-FRICCION DE SEGURIDAD.

FUENTE: EL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS Y EL ROLACRETO EN LAS PRESAS. REVISTA INCYC, VOL. 24, No. 183, AGOSTO 1965.

1.3.7. FUNCION DE LA CENIZA VOLANTE EN EL C. C. R.

La función principal de la ceniza volante en el C.C.R. no es su contribución a largo plazo de resistencia puzolánica, sino la de incrementar el volumen de la capa aglutinante adherente, para cubrir todas las partículas del agregado y rellenar todas sus cavidades, reduciendo con ello sus características generadoras de calor. Este material no requiere almacenamiento a largo plazo ni pruebas sofisticadas de control de calidad.

Si observamos la figura 1.8., podemos notar que, a edades tempranas de la mezcla no se visualiza ningún cambio con el incremento y porcentaje de la ceniza volante, sin embargo, después de que la mezcla ha alcanzado su resistencia última, se puede notar que el incremento de ceniza resulta perjudicial a la resistencia a la compresión simple de la mezcla.

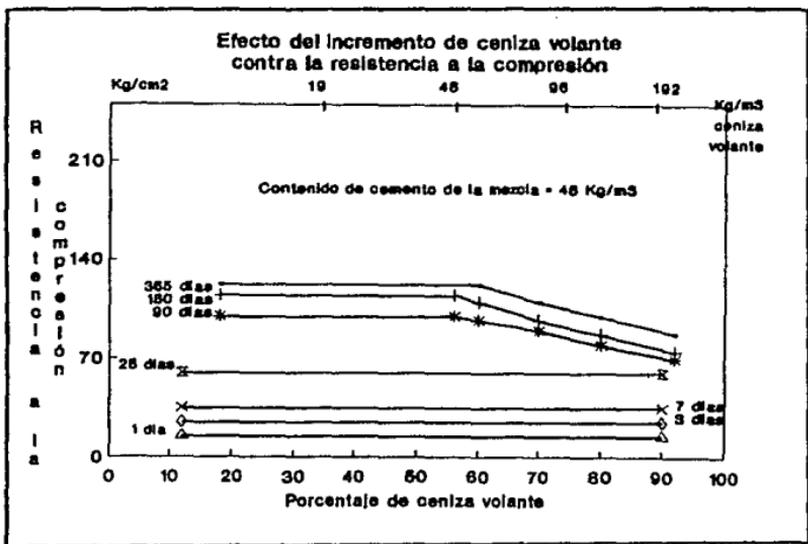


FIGURA 1.8. EFECTO DEL INCREMENTO DE LA CENIZA VOLANTE CONTRA LA RESISTENCIA A LA COMPRESION DE LA MEZCLA DEL INTERIOR DE LA PRESA WILLOW CREEK.
FUENTE: EL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS Y EL BOLACRETO EN LAS PRESAS. REVISTA IMCYC. VOL. 24, No. 182, AGOSTO 1966.

CAPITULO 2

IMPORTANCIA DEL C.C.R. EN LAS OBRAS DE INGENIERIA CIVIL

2.1. EL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS EN LAS OBRAS DE INGENIERIA CIVIL.

El afán ilimitado del hombre por la superación su instinto de supervivencia y previsión han tenido por consecuencia, que en todos los tiempos la técnica se vaya incrementando; en éstos últimos su aceleración es tal, que en unas pocas decenas de años se ha logrado lo que no se había hecho durante cientos. Además todo éste avance ha traído como consecuencia nuevos problemas que requieren soluciones adecuadas, innovaciones de gran trascendencia y rectificación de muchas teorías que se habfan dado como satisfactorias, requiriéndose para todo esto el acoplamiento del ingenio y la sabiduría humana, abocadas a un estudio concienzudo y detallado de ellos.

Dentro de éste avance y quizá en forma preponderante para romper las barreras de la naturaleza e inercia humana, queda incluido lo relacionado con el desarrollo de la Ingeniería Civil. Es fácil darse cuenta de ello, ya que, a cualquier punto que se enfoque el razonamiento, podrá hacerse palpable la enorme cantidad de problemas que han sido resueltos, algunos de ellos casi imposibles y todos con la única mira de procurar el bienestar, confort, desarrollo cultural y económico del género humano.

Con este trabajo se pretende colaborar en el empleo de nuevas técnicas para el desarrollo del País, en base a la motivación fundamental del Ingeniero Civil de buscar soluciones adecuadas y económicas a toda clase de problemas.

Dado el alto costo del dinero y las crecientes tasas de inflación en el País, ha orillado a los investigadores a buscar nuevas alternativas para la construcción de estructuras de concreto que cumplan determinados requisitos de seguridad, calidad, economía y tiempo. Una de las Técnicas que recientemente se está incorporando a la Tecnología Mexicana es la del Concreto Compactado con Rodillos (C.C.R.).

Es por ello que en la etapa de modernización y cambio que está sufriendo el País, es muy importante eliminar tabúes, y abrir nuevos horizontes en el uso de tecnologías modernas.

En el caso de carreteras por ejemplo, es común decir que las carreteras de pavimentos asfálticos son más económicas que las de concreto hidráulico. Esto es parcialmente cierto si se considera el costo inicial y no los gastos de reparación y mantenimiento a lo largo de la vida útil de un camino. Por otra parte, es preciso considerar que en los costos de pavimentos asfálticos no se menciona que el asfalto es un producto subsidiado en nuestro País, y que, si se desea entrar en la modernidad, es preciso eliminar los subsidios innecesarios.

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

Además el C.C.R. tiene a su favor una combinación de ventajas que hacen que su introducción en el medio sea fácil; ya que no excluye del campo de trabajo a las firmas con equipo de pavimentación con concretos asfálticos, ni a los técnicos que conocen y trabajan con la pavimentación tradicional con concreto, sino por el contrario a todos les abre más posibilidades de acción.

En lo que toca a las cortinas de presas, la ventaja del C.C.R. en cortinas de tipo gravedad y en cortinas de arco, es innegable, ya que el C.C.R. presenta enormes ventajas respecto a las presas de tierra, de enrocamiento o materiales graduados y a las de concreto convencional.

Se considera que una cortina de tipo gravedad construida con C.C.R. cuesta aproximadamente la tercera parte de lo que cuesta una cortina similar de cualquier otro tipo de material. Además el tiempo de construcción puede reducirse hasta en un 60%, con la ventaja adicional de que en caso de presentarse alguna corriente inesperada, la cortina en construcción puede ser brincada por el agua del embalse sin mayores consecuencias.

En estos tiempos de alta competitividad en que se requiere por parte de las empresas constructoras elevar al máximo la productividad, es cuando resulta más importante que nunca recurrir a los resultados obtenidos en las investigaciones que de manera permanente se vienen realizando sobre aspectos específicos en la industria de la construcción.

Por lo tanto, ahora es el momento oportuno para que las dependencias gubernamentales, organismos oficiales, asociaciones industriales y constructoras deben de aprovechar las ventajas que ofrece el C.C.R. en la medida en que ésta técnica sea ampliamente conocida en el medio.

2.2. PROCESO CONSTRUCTIVO.

En este capítulo se hará mención del proceso constructivo del Concreto Compactado con Rodillos en pavimentos.

2.2.1. PREPARACION DE LA SUBRASANTE.

Los principios involucrados en la preparación de la subrasante para recibir el pavimento de C.C.P. son los mismos que los utilizados en los pavimentos de concreto convencional. Cualquier área blanda en la subrasante puede ser reemplazada con material bien graduado compactado a la densidad requerida. Ver figura 2.1.

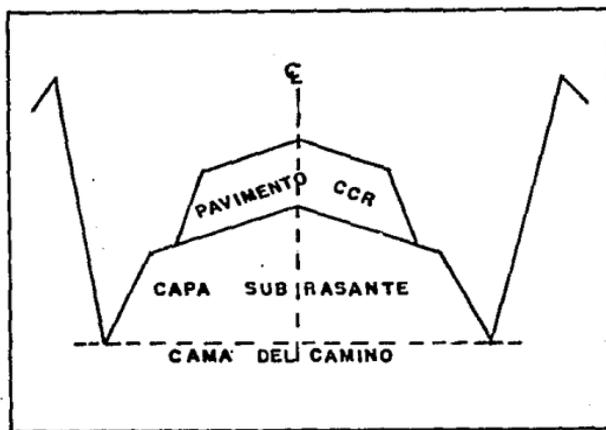


FIGURA 2.1. CORTE TRANSVERSAL DE UN PAVIMENTO DE C.C.P.

2.2.2. MEZCLADO DEL CONCRETO Y PRODUCCION.

La confección de este material, se hace normalmente en instalaciones de mezcla en continuo, como las que se emplean para la grava-cemento; pero como es material muy sensible a las variaciones en el contenido de cemento y de agua, se exige adicionalmente que la dosificación de cemento se realice en peso; por lo anterior, se prefieren aquellas plantas que estén dotadas de básculas para la dosificación de los materiales.

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

Para reducir los costos se emplean cenizas volantes las cuales se producen en la combustión de carbón en centrales termeléctricas de diversos tipos según el tipo de carbón quemado.

El Concreto Compactado con Rodillos es mezclado normalmente en una mezcladora tipo Pugmill con doble flecha, utilizada comunmente para mezclas de bases estabilizadas con cemento o concreto asfáltico. El C.C.R. se ha producido exitosamente en premezcladoras convencionales, así como en mezcladora continua tipo Pugmill, siendo preferida ésta última. En cualquier caso, la producción del concreto debe proceder sin interrupción y bien coordinada con la operación de colocación. Ver figura 2.2.

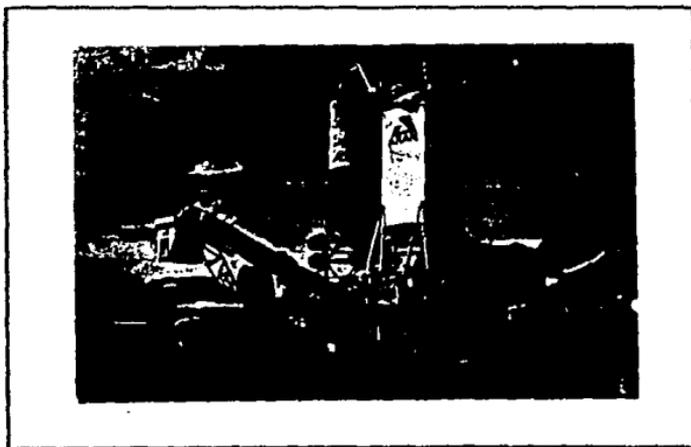
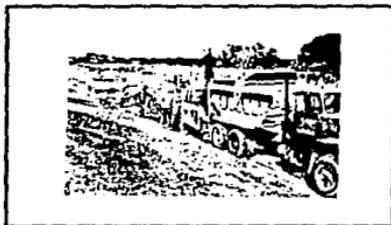


FIGURA 2.2. PLANTA DE MEZCLADO PARA PAVIMENTO DE C.C.R. EN EL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE PORTLAND, EN 1985.
FUENTE: PAVIMENTOS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO.
REVISTA IMCYG, VOL. 24, No. 189, FEBRERO 1987.

La figura anterior representa una planta típica de C.C.R., utiliza el mezclado continuo en un molino de mezclado de 'doble gusano'; una banda transportadora eleva el producto hasta el punto de carga del camión. En este sitio se utilizó una pequeña tolva enrejada en el extremo de la transportadora, para reducir la segregación y permitir cargar nuevos camiones sin detener la planta.

2.2.3. TRANSPORTE.

El transporte del C.C.R. se ha llevado a cabo exitosamente con camiones de volteo, los cuales pueden verter el concreto directamente en la tolva de la pavimentadora. Se debe evitar la pérdida de humedad durante el acarreo, especialmente si la planta queda lejos, por lo que se recomienda que el tiempo de acarreo no debe ser mayor de 15 minutos, ni la distancia mayor de dos millas. (3.218 Km.). Ver figura 2.3.



**FIGURA 2.3. TRANSPORTE DEL C.C.R.
EN EL PAVIMENTADO DE
AGUAS ABAJO DE LA
PRESA ADDICK, TEXAS.
FUENTE: RCC NEWSLETTER, ROLLER
COMPACTED CONCRETE DESIGN
AND CONSTRUCTION, No. 6,
ABRIL 1968.**

Como se mencionó anteriormente, en la figura 2.3 se puede apreciar como con un camión (en este caso de gran capacidad), está vertiendo el C.C.R. en la tolva de la pavimentadora. (Ver figura 2.3).

2.2.4. COLOCACION DEL CONCRETO.

La colocación en obra se puede hacer de dos formas. El sistema más tradicional es mediante la utilización de una motoniveladora como elemento repartidor. Se ha obtenido en España un buen éxito al extender y nivelar el C.C.R. con motoconformadoras, estimándose que de 1969 a 1970 se han construido cerca de 4,500 yardas cúbicas (3,672 m³) usando esta técnica. Ver figura 2.4.

Cabe mencionar que antes de la operación de tendido, la base o subrasante tiene que ser humedecida con un rociador para evitar la pérdida de humedad en la base de la capa de concreto.



FIGURA 2.4. NIVELACION Y EXTENDIDO DEL C.C.R. EN UNAS VIAS DE FERROCARRIL EN BURLINGTON, NORESTE DE HOUSTON.

FUENTE: BURLINGTON NORTHERN RAILROAD INTERMODAL HUB FACILITY. CONCRETE INTERNATIONAL. VOL. 9, No. 2, FEBRERO 1987.

La otra forma para realizar la colocación del C.C.R. se ha hecho con pavimentadoras asfálticas de alta capacidad. Ver figura 2.5. Recientemente el uso de pavimentadoras de alta capacidad, fabricadas en Alemania Occidental, ha probado ser la mejor opción para obtener altas densidades en pavimentos de C.C.R. La operación de tendido requiere de un control preciso del espesor y nivelación del pavimento, esto puede asegurarse con controles automáticos.

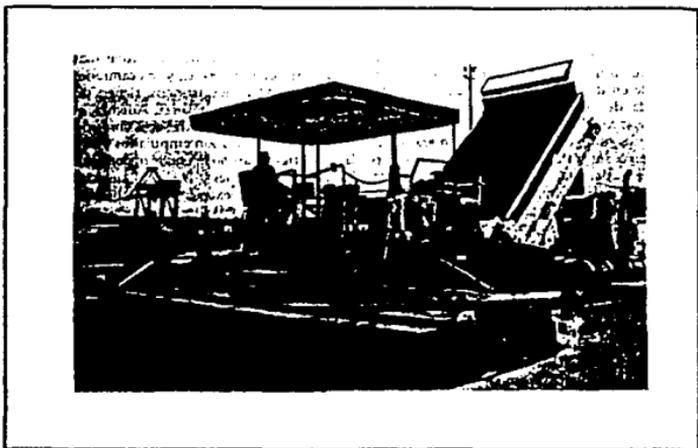


FIGURA 2.5. CAMION DESCARGANDO MEZCLA DE C.C.R. A LA PAVIMENTADORA CON LLANA VIBRATORIA DE TRABAJO PESADO, EQUIPO UTILIZADO EN EL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE PORTLAND.
FUENTE: PAVIMENTOS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS. REVISTA IMCYC, VOL. 24, No. 189, FEBRERO 1987.

El espesor del pavimento se puede construir a base de capas de 6 a 10 pulgadas (15.2 a 25.4 cm), dependiendo del diseño específico. El ancho del pavimento puede ser crítico para la compactación y textura superficial en las crillas del mismo, particularmente si las secciones son mayores de 14 pies (4.3 m) de ancho, el material tiende a segregarse en las orillas debido al efecto de la hélice que distribuye la mezcla en la pavimentadora. Ver figura 2.6.

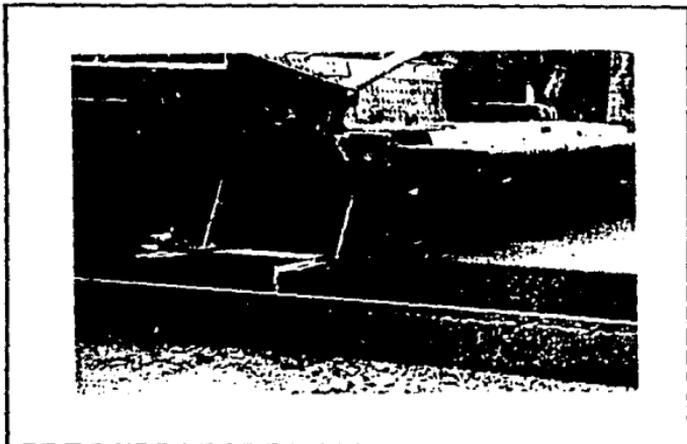


FIGURA 2.6. LLANA VIBRATORIA DE LA PAVIMENTADORA UTILIZADA EN EL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE PORTLAND. EQUIPADA CON UNA ZAFATILLA BORDEADA DE 90 GRADOS PARA MEJORAR EL CONTROL DE LOS BORDES DEL PAVIMENTO DE C.C.R.

FUENTE: PAVIMENTOS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS.
REVISTA IMCYG, VOL. 24, No. 189, FEBRERO 1987.

2.2.5. COMPACTACION VIBRATORIA.

Debido a su consistencia tan seca, el Concreto Compactado con Rodillos no puede ser compactado con rodillos estáticos, sino que la compactación se debe llevar a cabo con rodillos vibratorios.

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

El contenido de humedad óptima para la compactación del C.C.R. bajo cualquier condición del ambiente, depende principalmente de las características del agregado.

Cada mezcla debe tener un contenido de humedad resultante de la máxima densidad para obtener la máxima compactación. Si la humedad está por arriba o por debajo de este nivel, la densidad tiende a ser menor.

Esto se ve de una manera clara si la densidad seca calculada correspondiente a las proporciones de humedad de la mezcla se compara con el contenido de humedad, lo cual se muestra en la figura 2.7.

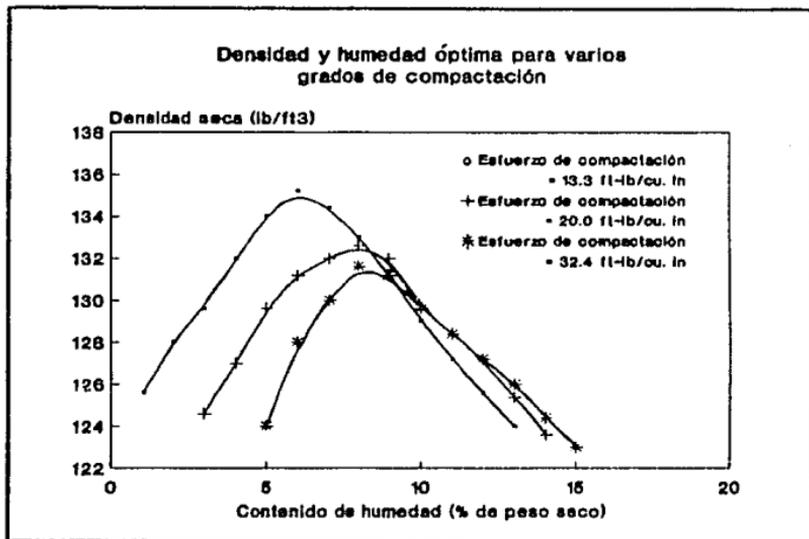


FIGURA 2.7. DENSIDAD Y HUMEDAD OPTIMA PARA VARIOS GRADOS DE COMPACTACION.

FUENTE: CONSOLIDATION OF CONCRETE ACI-SP-96, 1977.

La mejor combinación entre la máxima resistencia y las características de manejo de la mezcla ocurre alrededor de éste contenido de humedad.

Las mezclas ligeramente secas tienden a proporcionar una resistencia un poco mayor, como se muestra en la figura 2.8, pero también tienden a tener una cantidad mayor de agregado. Las mezclas ligeramente húmedas tienden a dar mejores condiciones de manejabilidad, como por ejemplo una segregación mínima y son más fáciles de compactar, pero tienen una menor resistencia.

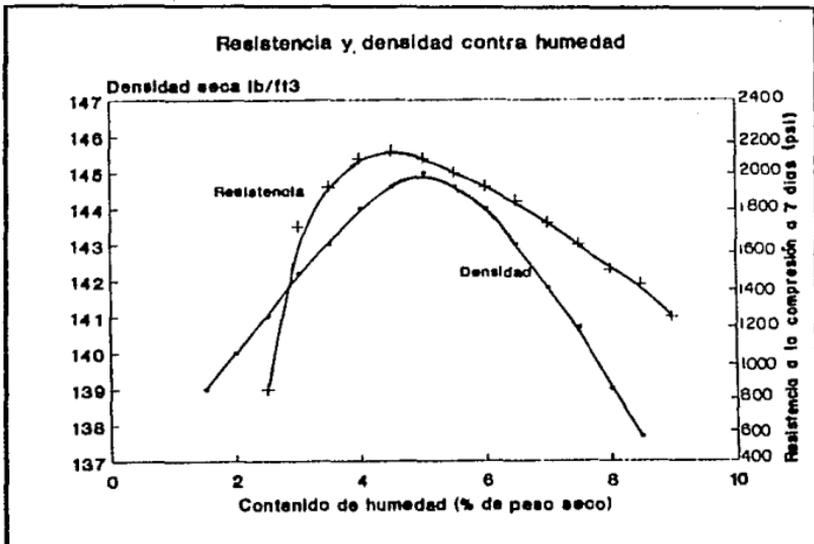


FIGURA 2.8. RESISTENCIA Y DENSIDAD CONTRA HUMEDAD.
FUENTE: CONSOLIDATION OF CONCRETE. ACI-SP-99, 1977.

Los rodillos que se utilizan para la compactación son vibratorios y pueden ser de uno o dos tambores, con pesos que varían desde 3 hasta más de 14 toneladas (métricas). Ver figura 2.9.

Durante la construcción de la presa Willow Creek se llevó a cabo una demostración en un pequeño tramo que tenía un tamaño máximo de agregado de 3 pulgadas (76 mm), el cual fue compactado con un rodillo de 19 toneladas (métricas), el rodillo era de neumáticos con una presión de inflado de 95 psi. Diferentes procedimientos de compactación fueron aplicados sobre varios espesores y las densidades fueron medidas cuidadosamente. Los resultados se muestran en la tabla 2.1.

Para no estropear la regularidad superficial, las primeras pasadas de compactación se deben hacer con los rodillos vibrantes utilizándolos sin vibrar, tal como si fueran rodillos estáticos hasta conseguir un grado de compactación inicial suficiente que permita pasar a compactar con vibración, tal y como se muestra en las figuras 2.10 y 2.11.

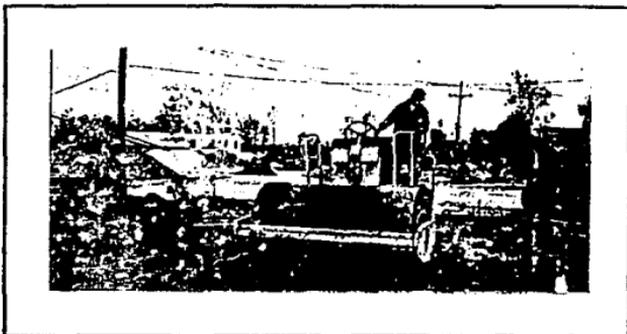


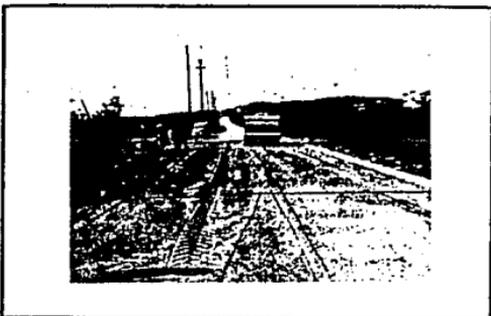
FIGURA 2.9. RODILLO LISO VIBRATORIO DE UN TAMBOR CON UN PESO DE 10 TONELADAS .

FUENTE: CONSTRUCCION DE CAMINOS DE BAJO VOLUMEN CON CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS. REVISTA IMCYC. VOL. 1, No. 5, OCTUBRE 1998.

Método de Compactación	Densidad Promedio		Densidad promedio con 4 pasadas con rodillo vibratorio	
	lbs/ft ³	kg/m ³	lbs/ft ³	kg/m ³
2 Pasadas Rodillo Neumático	146.0	2339	151.7	2430
4 Pasadas Rodillo Neumático	149.0	2397	151.7	2430
6 Pasadas Rodillo Neumático	151.8	2432	151.7	2430
2 Pasadas Rodillo Neumático	149.4	2393	152.8	2448
4 Pasadas Rodillo Neumático	151.9	2433	152.8	2448
6 Pasadas Rodillo Neumático	153.5	2459	152.8	2448
4 Pasadas Rodillo Neumático + 1 Pasada Rodillo Vibratorio	151.4	2425	153.2	2454
6 Pasadas Rodillo Neumático + 1 Pasada Rodillo Vibratorio	144.8	2320	153.4	2457
6 Pasadas Rodillo Neumático	151.8	2432	154.0	2467

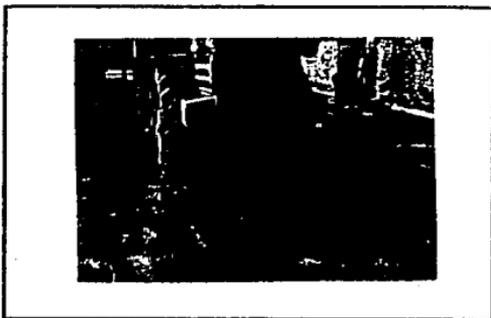
TABLA 2.1. COMPACTACION POR MEDIO DE VARIOS PROCEDIMIENTOS.

FUENTE: COMPACTATION OF ROLLER COMPACTED CONCRETE. ACI-SP-96, 1977



**FIGURA 2.10. EQUIPO DE COMPACTACION
SENCILLO PARA ESPESORES
MENORES DE 10 CM.**

**FUENTE: HORMIGONES SECOS COMPACTADOS
CON RODILLOS APORTES TECNICOS
CHILE, No. 13, 1985.**



**FIGURA 2.11. SUPERFICIE FINAL EN DONDE
SE VEN LAS HUELLAS DEL
COMPACTADOR.**

**FUENTE: HORMIGONES SECOS COMPACTADOS
CON RODILLOS APORTES TECNICOS.
CHILE, No. 13, 1985.**

La compactación vibratoria comienza a partir de la tercera pasada. El número de pasadas dependerá del equipo que se utilice, del tipo de suelo y del espesor total del pavimento. Se le debe de dar un grado de compactación al pavimento de por lo menos 97%. El número mínimo de pasadas para obtener este grado de compactación se muestra en la tabla 2.2. A la superficie final también se le dan una o dos pasadas con los rodillos como si fueran estáticos, es decir, sin vibrado, para reducir el número de grietas en la superficie.

Equipo de Compactación	Número Mínimo de Pasadas con vibrado	Espesor Máximo de la Capa después de ser Compactada (m)
Vibrador (mín. 400 kg)	4	0.15
Rodillo Vibratorio Simple		
6 Mg (mín. 15 kN/m)	6	0.15
10 Mg (mín. 25 kN/m)	8	0.25
Rodillo Vibratorio Tandem		
2.5 Mg (mín. 10 kN/m)	6	0.10
6 Mg (mín. 20 kN/m)	4	0.15
10 Mg (mín. 30 kN/m)	4	0.25

m X 2.20 = ft

Mg X 1.1 = toneladas métricas

kN/m X 0.225 = lbf/ft

TABLA 2.2. NUMERO MINIMO DE PASADAS Y ESPESORES MAXIMOS, PARA VARIOS EQUIPOS DE COMPACTACION.

FUENTE: SWEDISH EXPERIENCES WITH RCC. CONCRETE INTERNATIONAL, VOL. 9 No. 2, FEBRERO DE 1987.

La figura 2.12 explica la secuencia de compactación en el caso de que el pavimento tenga más de un carril, donde se observa que una de las orillas se deja sin compactar para unirse con el siguiente carril, produciéndose una junta longitudinal fresca. Mucho mejores resultados se pueden obtener si el número de pavimentadoras es igual al número de carriles y éstas se hacen correr paralelamente una tras de otra, para crear de forma inmediata una junta fresca.

En el caso de tratarse de un solo carril, primero se compactan las orillas y luego el centro, traslapando las pasadas, tal y como se muestra en la figura 2.12.

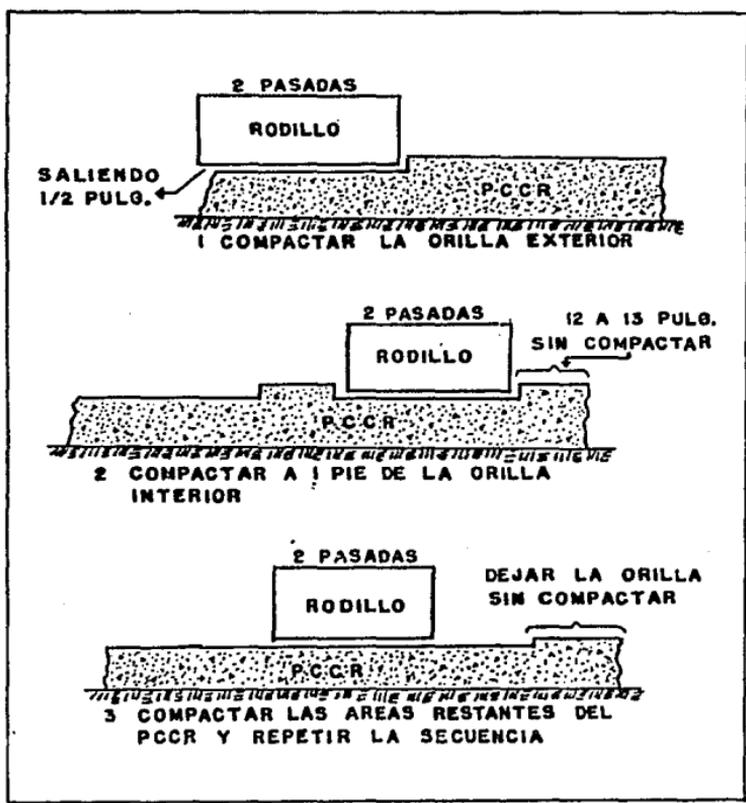


FIGURA 2.12. PROCEDIMIENTO DE COMPACTACION DEL PRIMER CARRIL.
 FUENTE: CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS. CURSO IMCYC.
 CHIHUAHUA, 1989.

2.2.6. JUNTAS.

Independientemente de la dirección de las juntas con referencia a la dirección de pavimentación, las juntas pueden clasificarse como juntas frías o frescas, dependiendo del estado de hidratación del concreto. En la figura 2.13 se muestra la construcción de una junta fría.

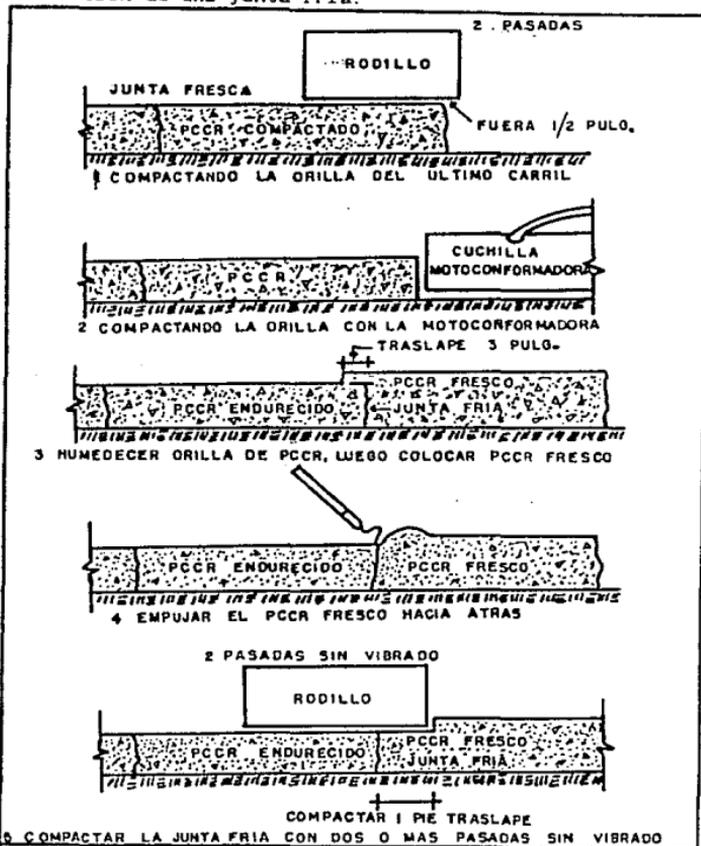


FIGURA 2.13. CONSTRUCCION DE UNA JUNTA FRIA.
FUENTE: CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS. CURSO IMCYC.
CHIHUAHUA. 1988.

Siempre que se forme una junta fría, es probable que ésta desarrolle una baja adherencia. La adherencia se puede mejorar si se siguen los pasos que se muestran en la figura 2.13.

No existen reportes de cambios reales en la consistencia y/o proporciones de la mezcla para mejorar la adherencia, especialmente en juntas transversales. Sin embargo, en algunos casos el concreto viejo de una junta transversal o longitudinal es limpiado con cepillo, para luego ser humedecido y pintado con un mortero rico en cemento o una pasta con una relación agua/cemento baja.

Los pavimentos de Concreto Compactado con Rodillos (PCCR) sufren grietas de contracción espaciadas de 30 a 70 pies (9.1 a 21.3 m), de donde en ocasiones se desprende el concreto; esto se alivia formando una junta de contracción a distancias prefijadas aserrando el concreto en forma profunda (3/4 del espesor).

2.2.7. CURADO.

Casi todos los curados se han intentado con el C. C. R. Sin embargo, no existen reportes de una evaluación cuantitativa de los efectos de diferentes métodos de curado. En la mayoría de los casos se aplica por lo menos por siete días, agua por aspersión o mantas húmedas. Con un método por aspersión automática se obtienen mejores resultados. En trabajos pequeños el curado se puede hacer recubriendo el pavimento con arena húmeda, lo cual proporciona mejores resultados que otros métodos. Ver figura 2.14.



FIGURA 2.14. CURADO DEL C. C. R. CON ARENA HUMEDA.

FUENTE: CONSTRUCCION DE CAMINOS DE BAJO VOLUMEN CON CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS. REVISTA IMCYC, VOL. 1, NO. 2, OCTUBRE 1968.

2.2.8. TEXTURA FINAL DEL C. C. R.

La calidad de la textura final de un C.C.R. depende del tamaño máximo del agregado grueso, así como de otras características de la mezcla. El uso de compactador de llantas neumáticas después del de Rodillos Vibratorios puede ayudar a obtener una textura más cerrada, pero un exceso de compactación, puede provocar grietas de arrastre.

Las tolerancias de grietas en la superficie varían de $3/8$ a $1/2$ " (0.95 a 1.27 cm) por cada 10 pies (3.05 m). La figura 2.15 corresponde a un C.C.R. con agregado de $1/2$ ", cuya consistencia resultó mucho más seca de lo diseñado. El entendimiento de las características del C.C.R. por parte de los contratistas es primordial para obtener mucho mejores resultados.

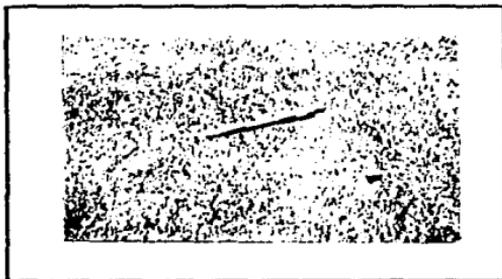


FIGURA 2.15. TEXTURAS SUPERFICIALES DEL C. C. R.

FUENTE: CONSTRUCCION DE CAMINOS DE BAJO VOLUMEN CON CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS.
REVISTA IMCYC. VOL. 1.
No. 9. OCTUBRE 1968.

2.3. EQUIPO UTILIZADO.

El equipo de construcción que se ha de utilizar para la fabricación del C.C.R., es el punto crítico sobre el cual radica la economía de este procedimiento constructivo. Es importante recalcar que se puede emplear el mismo equipo que se utiliza en el movimiento de tierras y en la fabricación de pavimentos de concreto asfáltico, ya que con esto se puede hacer una comparación más tangible de costos.

Se debe tener cuidado en contemplar todas las posibilidades para poder escoger la máquina más eficiente, esto es, la obtención de la menor inversión posible al más bajo costo unitario, en el mínimo tiempo realizable.

2.3.1. CLASIFICACION GENERAL DEL EQUIPO.

La clasificación que se va a utilizar es muy sencilla con el fin de facilitar el entendimiento del proceso constructivo y es la siguiente:

- 1.- Equipo de Dosificación.
- 2.- Equipo de Transporte.
- 3.- Equipo de Colocación.
- 4.- Equipo de Compactación.

2.3.1.1. Equipo de Dosificación.

Dentro de este grupo se puede tener una amplia gama de equipos que prácticamente se encargarán de obtener un producto final de mezclado dentro de lo establecido por el proyecto. En este punto, el proceso constructivo empieza desde el muestreo y análisis de los materiales existentes en la localidad, explotación de bancos, acarreo de los mismos hasta el lugar en donde se cribarán o triturarán hasta donde lo indique el control de calidad, se dosifican junto con el agregado fino, el material cementante y el agua, quedando listos para ser transportados. Dentro de esta clasificación el equipo clave es la planta mezcladora, ya que ésta nos permite llenar los requisitos de producción sin dejar que tengamos tiempos muertos, ya que éstos afectarían tanto la calidad del pavimento así como la economía del proyecto.

2.3.1.2. Equipo de Transporte.

Se le define como tal dado que su función es la de acarrear la mezcla de C.C.R. hasta el lugar de colocación. En el caso de algunas presas se han utilizado bandas transportadoras, en pavimentos se pueden utilizar ollas revolventoras, motoescrapas, camiones de volteo, etc., dependiendo del equipo existente y del análisis económico correspondiente.

2.3.1.3. Equipo de Colocación.

De acuerdo con la combinación de equipo que se haya elegido como óptima para el transporte del C.C.R., dependerá el tipo de equipo a utilizar en la colocación, pueden emplearse: empujadores (bulldozers), motoconformadoras y pavimentadoras, siendo las últimas las que nos facilitarán el control del espesor de la capa de pavimento.

2.3.1.4. Equipo de Compactación.

Existen muchos tipos de compactadores, algunos tienen rodillos estáticos, otros lo son vibratorios, unos son de neumáticos, otros son metálicos, pero a fin de cuentas su función es la misma, compactar el material colocado hasta llegar a la densidad requerida por el diseño. Pero aquí es donde se debe de realizar una buena elección del equipo, ya que dependiendo del volumen a compactar, se debe hacer incapié en que clase de rodillo se va a utilizar considerando todas las variables de peso, frecuencia de variación, dimensiones, etc., las cuales se reflejarán en el número de pasadas que es necesario aplicar a la carga del pavimento y éstas a su vez en el tiempo de compactación.

2.3.2. BREVE DESCRIPCION DEL EQUIPO EXISTENTE APLICABLE A LA CONSTRUCCION DE OBRAS DE C.C.R.

Este es quizá el capítulo de la tesis que nos permite asegurar que el procedimiento de construcción de pavimentos de C.C.R. revolucionará las obras de Ingeniería Civil en nuestro País, ya que sin temor a una equivocación toda clase de equipos, antiguos y modernos aplicables en la construcción de carreteras, presas, aeropuertos, etc., son aplicables en este procedimiento si se toman en cuenta sus características y se rigen por un estricto control de calidad en campo.

En México, dado que nos encontramos al sur de uno de los países fabricantes de maquinaria más importante del mundo, podemos decir que contamos con toda clase de equipo apto para la fabricación del Concreto Compactado con Rodillos, como lo es el siguiente:

- 1.- Motoconformadoras.
- 2.- Compactadores.
- 3.- Camiones de Volteo.
- 4.- Pavimentadoras.
- 5.- Plantas Dosificadoras.
- 6.- Cargadores Frontales.

Para obtener mejores resultados en cuanto a costo y tiempo, será necesario hacer combinaciones de equipo, pero tratando de mejorar los antecedentes que ya se tengan para seguir innovando.

2.3.2.1. Motoconformadoras.

En el caso de pavimentación, el uso que se le puede dar a las motoconformadoras en el C.C.R. es prácticamente el mismo que en los pavimentos asfálticos, pero hay que tener muy en cuenta que se está trabajando con concreto que posteriormente será compactado.

Existen una infinidad de motoconformadoras cuyas características varían de acuerdo a su potencia en el motor, longitud de la cuchilla, número de velocidades de avance y retroceso, número de ejes con tracción (simples o en tandem), etc. Ver figura 2.16.

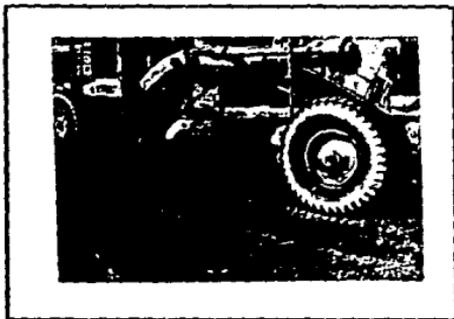


FIGURA 2.16. REFINAMIENTO DE LA SUPERFICIE DEL C. C. R. CON MOTOCONFORMADORA.

FUENTE: EL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS BOLETIN DEL INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DEL CEMENTO. No. 42, JULIO-SEPTIEMBRE DE 1966.

2.3.2.2. Compactadores.

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

- Compactadores Estáticos.
- Compactadores Vibratorios (Dinámicos).

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

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

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

2.3.2.2.1. Compactadores Neumáticos.

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

- De llantas pequeñas.
- De llantas grandes.

a) De llantas pequeñas.- Estos compactadores 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 de equipos de mayor peso y llantas grandes, y tienen mayor maniobrabilidad.

b) De llantas grandes.- Son generalmente arrastrados por tractor y pesan de 15 a 50 toneladas (métricas), tienen 4 ó 6 llantas en un mismo eje, son difíciles de maniobrar y transportar.

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

- Peso Total.- Dependiendo del número total de llantas y del compactador, se puede conocer el peso o fuerza aplicada por llantas. A mayor peso total, mayor carga por llanta, en caso de tratarse de una suspensión isostática.

- Presión de inflado.- Este tipo de presión, esta íntimamente ligada 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).

2.3.2.2.2. Compactadores Metálicos.

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

- Compactadores Estáticos.
- Compactadores Vibratorios.

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

a) Compactadores Metálicos 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 las 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 de 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 5.0 Km/hr. Velocidades mayores no aumentan la producción y con frecuencia no se obtiene la compactación deseada. Ver figura 2.17.

b) Compactadores Metálicos Estáticos.- Este rodillo metálico utiliza solamente presión con un mínimo de amasamiento de materiales plásticos. Cuando éstos 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 éste grupo se puede hacer la división siguiente:

- Planchas Tandem.- Son aquellas que tienen dos o tres rodillos metálicos paralelos, generalmente huecos para ser lastrados con agua y/o arena.

- Planchas de Tres Ruedas.- Son de diseño más antiguo, tienen dos ruedas traseras paralelas y una delantera.

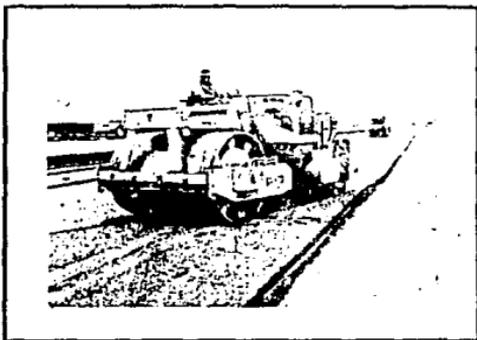


FIGURA 2.17. COMPACTADOR METALICO VIBRATORIO.

FUENTE: ROLLER COMPACTED CONCRETE: PROJECTS AND EQUIPMENT. CONCRETE INTERNATIONAL. VOL. 9, No. 2, FEBRERO 1987.

2.3.2.3. Camión de Volteo.

Se considera importante que para obtener la eficiencia dentro de un trabajo de Ingeniería Civil en donde se manejan grandes volúmenes de material, es vital controlar nuestros tiempos de ciclo empleados en el movimiento del mismo para llegar al punto óptimo de operación.

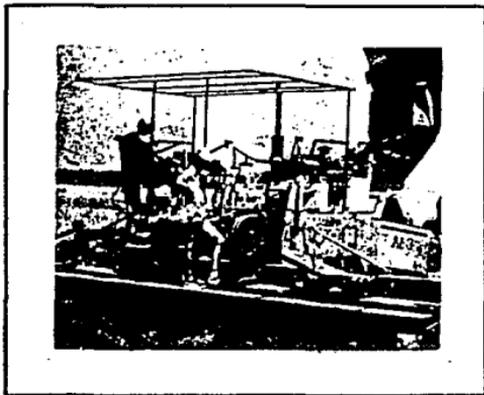
Este recordatorio es importante ya sea para camiones de volteo o para ollas revolvedoras.



FIGURA 2.18. CAMION DESCARGANDO SOBRE UNA PAVIMENTADORA
FUENTE: RCC PAVEMENTS, AN AIRPORT APRON AND A COUNTY
ROAD. CONCRETE INTERNATIONAL, VOL. 9, No. 2,
FEBRERO 1987.

2.3.2.4. Pavimentadora.

Este equipo nos permite colocar capas de material con gran facilidad controlando el espesor de la capa de diseño, consta de una tolva donde se descarga el material, el cual se distribuye de manera uniforme por medio de una hélice a todo lo ancho de la máquina al momento de su colocación, el espesor de capa es controlado automáticamente. Ver figura 2.19.



**FIGURA 2.19. PAVIMENTADORA UTILIZADA
EN EL AEROPUERTO INTER-
NACIONAL DE PORTLAND.**

**FUENTE: PAVIMENTOS CON HORMIGÓN
COMPACTADO CON RODILLO.
BOLETÍN DEL CEMENTO PORTLAND
ARGENTINO, AÑO 19, No. 121,
ENERO-FEBRERO 1968.**

2.3.2.5. Planta Dosificadora.

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

Existen en la actualidad plantas dosificadoras portátiles con todas las ventajas requeridas para la construcción de pavimentos ya que si éstos se colocan en carreteras, la ubicación de la planta debe ser la adecuada para agilizar el tiempo de acarreo, dadas las características del material. Ver figura 2.20.

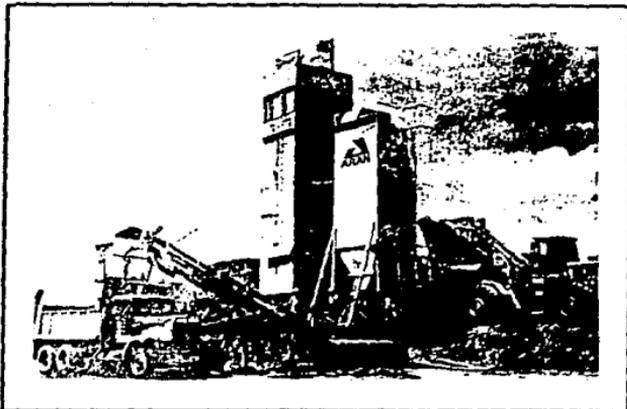


FIGURA 2.20. PLANTA DOSIFICADORA DE C. C. R.
FUENTE: ROLLER COMPACTED CONCRETE: PROJECTS AND
EQUIPMENT CONCRETE INTERNATIONAL.
VOL. 9, No. 2, FEBRERO 1967.

2.3.2.6. Cargadores Frontales.

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

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

a) Por la forma de efectuar la descarga se clasifican en:

- Descarga Frontal.
- Descarga Lateral.
- Descarga Trasera.

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

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

- Descarga Trasera.- Se diseñaron para evitar maniobras del cargador pero se consideran peligrosos, principalmente debido al riesgo al pasar el bote cargado sobre el operador.

b) Clasificación por la forma de rodamiento:

- Montados sobre Orugas.
- Montados sobre Neumáticos.



FIGURA 2. 21. CARGADOR FRONTAL SOBRE ORUGAS.
FUENTE: USE OF ROLLER COMPACTED CONCRETE IN BRAZIL.
CONCRETE INTERNATIONAL, VOL. 6, No. 3, MAYO 1984

En el caso del C.C.P. se utilizan preferentemente los montados sobre neumáticos, por que los de orugas tienden a segregar el material.

2.4. CONTROL DE CALIDAD.

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

Algunos aspectos importantes de un programa de control de calidad se presentan en la tabla 2.3.

ASPECTOS IMPORTANTES DE UN PROGRAMA DE CONTROL DE CALIDAD

- DEFINICION PREVIA DEL NIVEL DE CALIDAD REQUERIDO EN LA CONSTRUCCION
QUE SE DESEA ?
COMO PUEDO ORDENAR Y PROGRAMAR LAS ACTIVIDADES ?
COMO PUEDO DETERMINAR QUE ESTA BIEN ?
- DEFINICION DEL CONJUNTO DE ESPECIFICACIONES DE CONSTRUCCION QUE SE VAN A UTILIZAR.
- DEFINICION DEL CONJUNTO DE PRUEBAS DE LABORATORIO, QUE SON LA BASE METODOLOGICA Y TECNICA DEL PROGRAMA DE CONTROL DE CALIDAD.
- CRITERIO CON EL QUE HABRA DE MANEJARSE LOS VOLUMENES DE INFORMACION QUE RESULTEN DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO.

TABLA 2.3. ASPECTOS IMPORTANTES QUE SE DEBEN DE TOMAR EN CUENTA PARA LLEVAR A CABO EL CONTROL DE CALIDAD PARA CUALQUIER OBRA - QUE SE VAYA A REALIZAR.

FUENTE: EL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS (C. C. R.) Y SU CONTROL DE CALIDAD. MEMORIA. REUNION NACIONAL DE LABORATORIOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCION. SAN LUIS POTOSI, 1987.

En la definición del conjunto de especificaciones se encuentran las generales y las complementarias o particulares del proyecto. Las especificaciones generales son normas elaboradas por Instituciones o Dependencias Oficiales, están orientadas a la construcción de obras civiles, toman en cuenta el clima y el procedimiento de construcción.

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

Las especificaciones generales pueden ser contractuales, constructivas y técnicas; y las especificaciones complementarias

constituyen únicamente normas constructivas y técnicas. Las especificaciones contractuales son las que relacionan al contratista con el contratante. Finalmente podemos decir que las especificaciones constructivas y técnicas si se pueden estandarizar. Ver tabla 2.4.

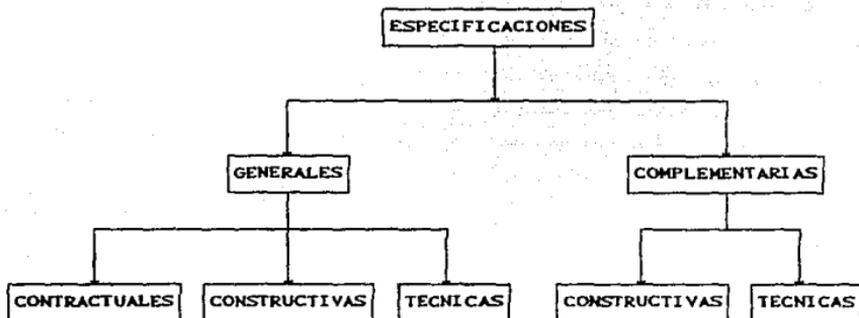


TABLA 2.4. ESPECIFICACIONES QUE DEBE CUMPLIR UN PROGRAMA DE CONTROL DE CALIDAD.

FUENTE: EL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS (C. C. R.) Y SU CONTROL DE CALIDAD. MEMORIA. REUNION NACIONAL DE LABORATORIOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCION. SAN LUIS POTOSI, 1987.

Algunas de las características que deben cumplir las pruebas de laboratorio se presentan a continuación en la tabla 2.5.

CARACTERISTICAS DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO
- ESTAN DIRIGIDAS A LA COMPROBACION.
- SER SENCILLAS Y ESTANDARIZADAS.
- SER RAPIDAS EN SU REALIZACION.
- FACILES DE INTERPRETAR.
- REQUERIR EQUIPO ECONOMICO.

TABLA 2.5. CARACTERISTICAS MAS IMPORTANTES QUE DEBEN CUMPLIR LAS PRUEBAS DE LABORATORIO.

FUENTE: EL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS (C. C. R.) Y SU CONTROL DE CALIDAD. MEMORIA. REUNION NACIONAL DE LABORATORIOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCION. SAN LUIS POTOSI, 1987.

2.4.1. ENSAYES DE LABORATORIO.

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

La granulometría típica del material que constituye el C.C.R. se puede apreciar en la figura 2.22, y es comparable con la granulometría típica del material que es utilizado en las mezclas de concreto convencional. Para agregados grandes las curvas se mueven hacia la izquierda y para tamaños pequeños se mueven hacia la derecha.

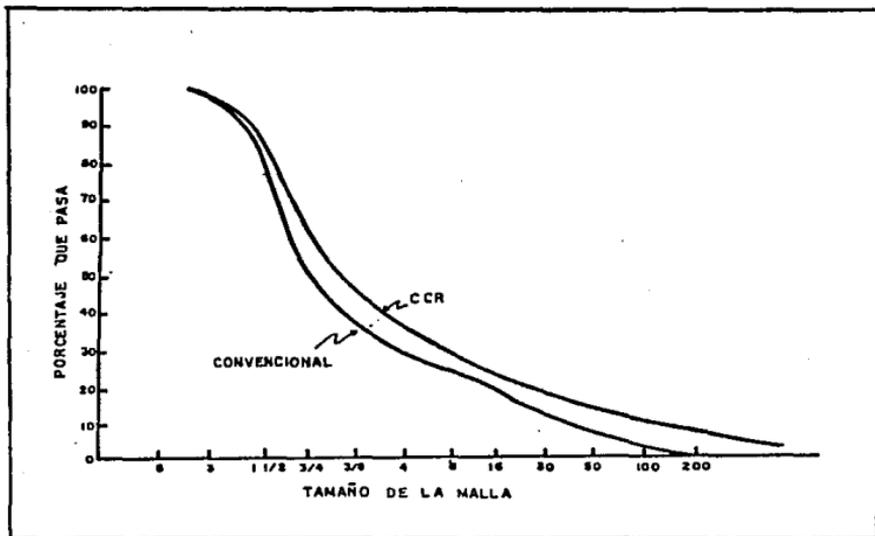


FIGURA 2.22. GRANULOMETRIA TIPICA DE UN C.C.R. Y UN CONCRETO CONVENCIONAL.

FUENTE: CONSOLIDATION OF CONCRETE ACI-SP-06, 1977.

Ambas curvas permiten una variación, pero las mezclas de C.C.R. generalmente duplican el rango de las mezclas de concreto convencional. Es recomendable que las pendientes de las curvas sean suaves. Se puede apreciar también, que la cantidad de finos no plásticos en el C.C.R. pueden variar de un 5 a un 10%.

Las mezclas de C.C.P. pueden ser compactadas con un contenido de vacíos de solamente 0.5 a 1.5% siempre y cuando se utilicen granulometrías que aseguren suficientes partículas de cada tamaño para ocupar los espacios que dejan las partículas de mayor tamaño. Los finos deberán tener también una adecuada granulometría por debajo de la zona de la malla 200 (malla 325 y 400).

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

La curva de C.C.P. presentada en la figura 2.22, es similar a la de 11 presas, entre las que se encuentran: Copperfield, Willow Creek, Kerville y Galesville. La granulometría del concreto convencional es comparable con presas tales como: Little Goose, Lower Monumental y Lower Granite.

Después de realizar el proporcionamiento de acuerdo al diseño especificado, se procedió a mezclar el material en una revolvedora convencional de 1/2 ó 1 saco de capacidad. Como se manejan mezclas muy secas, se tendrá especial cuidado que en la parte inferior no se acumulen los finos de la mezcla.



FIGURA 2.23. EQUIPO UTILIZADO PARA ELABORAR LOS CILINDROS DE C.C.P.

FUENTE: EL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS Y SU CONTROL DE CALIDAD. MEMORIA REUNION NACIONAL DE LABORATORIOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCION. SAN LUIS POTOSI, 1967.

Del volumen aproximado de 200-220 litros se realizaron las siguientes pruebas a los especímenes de C.C.R.: resistencia a la compresión simple, resistencia a la tensión indirecta y cálculo del módulo de elasticidad. De la mezcla de C.C.R. fresca se obtuvo el peso volumétrico compactado y el contenido de aire. Por otra parte, se elaboraron barras de concreto para verificar expansiones o contracciones del material.

En la figura 2.23 se presenta el equipo utilizado para la elaboración de cilindros de C.C.R. Para compactar el concreto de los cilindros se utilizó un pisón de impacto neumático, que proporcionó de 1530 a 1750 golpes/min. El apisonador fue alimentado por un compresor estándar de 100 pcm (pies cúbicos por minuto) como mínimo. Es importante contar con un lubricador para el equipo neumático.

En la figura 2.24 se puede apreciar la fabricación de cilindros de C.C.R., se compactaron en tres capas en un cilindro de P.V.C. de 15 x 30 cm (similar a los plastic liners) ubicado dentro del molde metálico. Aproximadamente, cada capa de los especímenes de C.C.R. se compactó en un lapso de 15 a 20 segundos.



FIGURA 2.24. PROCEDIMIENTO PARA ELABORAR CILINDROS DE C.C.R.

FUENTE: EL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS Y SU CONTROL DE CALIDAD. MEMORIA REUNION NACIONAL DE LABORATORIOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCION. SAN LUIS POTOSI, 1987.

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

Cuando se llegó el momento de ensayar los cilindros a cierta edad, se extrajeron del cuarto de curado y se procedió a retirar el forro de P.V.C. mediante una cuchilla. Se puede dejar un corte longitudinal en el tubo de P.V.C. para facilitar la operación de descimbrado. Posteriormente los cilindros fueron cabeceados y finalmente ensayados a compresión simple en la máquina universal (ver figura 2.25) ó ensayado a tensión indirecta (ver figura 2.26).

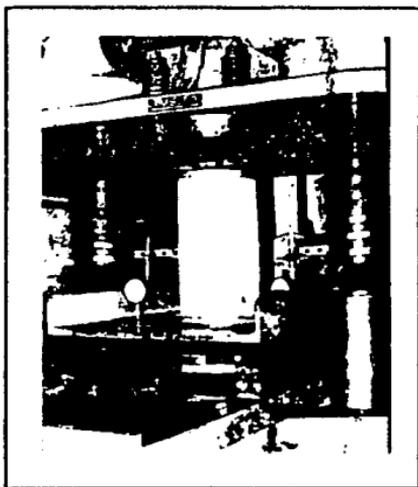


FIGURA 2.25. ENSAYE A COMPRESION SIMPLE DE CILINDROS DE C. C. R.
FUENTE: EL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS Y SU CONTROL DE CALIDAD. MEMORIA REUNION NACIONAL DE LABORATORIOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCION. SAN LUIS POTOSI, 1987.



FIGURA 2.20. ENSAYE A TENSION INDIRECTA DE CILINDROS DE C. C. R.

FUENTE: EL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS Y SU CONTROL DE CALIDAD. MEMORIA REUNION NACIONAL DE LABORATORIOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCION. SAN LUIS POTOSI, 1987.

El descimbrado de las barras de C.C.R. debe realizarse con bastante cuidado y utilizando el equipo destinado para tal operación, ya que de lo contrario los índices pueden aflojarse y en consecuencia no se tendrán resultados satisfactorios (no está permitido reparar las barras). En caso de que no se utilizaran las barras de C.C.R. para controlar las posibles expansiones o contracciones, se recomienda usar el método de cambio volumétrico autógeno, el cual consiste en elaborar un cilindro de C.C.R. de 9 x 18" (22.8 x 45.7 cm) y obtener las lecturas del cambio del volumen mediante un Carlson Strain Meter, embebido en el centro y generalmente a lo largo del eje vertical del cilindro del C.C.R.

En la figura 2.27, se pueden observar diferentes curvas esfuerzo a compresión contra la edad, todas con distintas relaciones agua/cemento y contenido de finos.

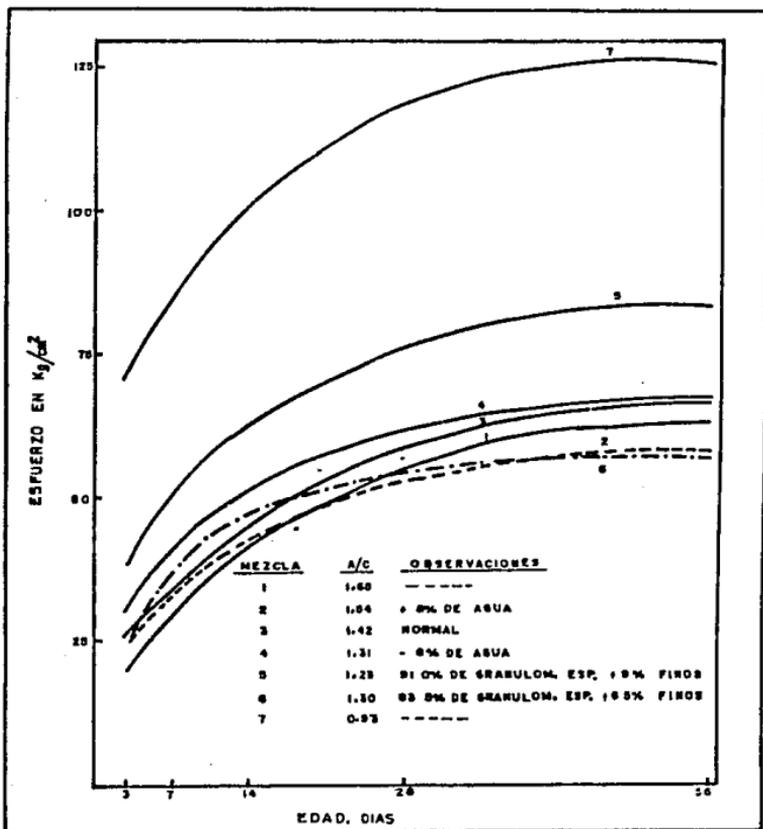


FIGURA 2.27. DIFERENTES ESFUERZOS PARA DIFERENTES MEZCLAS CONTRA DISTINTAS EDADES.

FUENTE: EL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS Y SU CONTROL DE CALIDAD. MEMORIA REUNION NACIONAL DE LABORATORIOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCION. SAN LUIS POTOSI. 1967.

En la figura 2.28, se muestra una curva típica esfuerzo a compresión contra la deformación unitaria longitudinal. El módulo de elasticidad es de aproximadamente $10,600 \text{ Kg/cm}^2$ a 28 días para un caso particular.

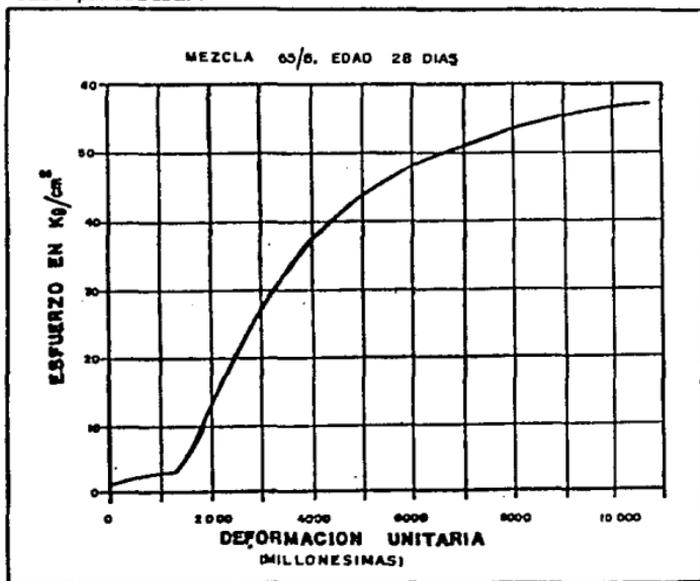


FIGURA 2.28. CURVA TÍPICA ESFUERZO-DEFORMACIÓN CONTRA LA DEFORMACIÓN UNITARIA LONGITUDINAL.
FUENTE: EL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS Y SU CONTROL DE CALIDAD. MEMORIA REUNIÓN NACIONAL DE LABORATORIOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN. SAN LUIS POTOSÍ, 1987.

El volumen de información que se obtiene del conjunto de pruebas de C.C.R. es bastante grande, por lo cual se recomienda utilizar algún sistema de cómputo que auxilie a procesar la información de los ensayos.

2.4.2. CONTROL DE C.C.R. EN LA OBRA.

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

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

El método Vebe modificado es un procedimiento de prueba bastante razonable para verificar la consistencia del C.C.R. en el campo. El valor de la consistencia es el número de segundos que se requiere para compactar un volumen de concreto en un recipiente de 9.5" (24.1 cm) de diámetro. Por ejemplo, para mezclas no plásticas cuyo revenimiento puede ser de 7.5 cm a 12.5 cm se requiere de 0 a 3 seg. para compactar la mezcla.

Por otra parte, la densidad del C.C.R. se puede medir en el campo con un "nuclear gauge" de doble sensor. El contenido de humedad se determina simultáneamente con la densidad del C.C.R. a profundidades que varían de 0 a 60 cm. Es importante calibrar cada gauge para cada mezcla de C.C.R. que se esté analizando. El cálculo de la densidad deberá obtenerse inmediatamente después de la compactación de cada capa de C.C.R.

CAPITULO 3

EL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS EN LAS PRESAS

Cuando se determina la construcción de las grandes presas, las primeras y más importantes decisiones que se deben de tomar giran en torno al método más adecuado para empezar la obra y el tipo de materiales a utilizar. Gracias a la experiencia recopilada de la construcción convencional de cortinas, se sabe que la utilización de concreto o materiales graduados implica, en ambos casos, ventajas e inconvenientes en porcentajes similares. En cambio, la utilización del Concreto Compactado con Rodillos reúne las características deseables de los materiales, aumenta la eficiencia y reduce los costos de construcción sin decremento del funcionamiento y la seguridad de las presas.

Al ser analizadas las condiciones de boquilla para una presa y disponibilidad de materiales con el fin de elegir un tipo de cortina, se consideran todos aquellos aspectos topográficos, hidrológicos y geotécnicos que determinarán las características y el diseño de toda la obra. En México la elección a favorecido, predominantemente, a las cortinas de materiales graduados, sobre todo por su adaptabilidad a un amplio rango de condiciones geotécnicas de la boquilla.

En ciertas circunstancias, el sitio permite tanto construir una cortina de tipo gravedad, como una de materiales graduados. En este caso, el costo de construcción es el factor decisivo para la elección final. Sin embargo, algunos factores como el tamaño y la localización del vertedor podrían indicar que la solución más adecuada sería la de construir una cortina de concreto, si el incremento en el costo final fuera aceptable.

Si se analiza la evolución reciente de la tecnología para la construcción de cortinas de concreto, se observa que aún cuando los métodos de diseño han mejorado con el paso del tiempo, los procedimientos de construcción permanecen igual que en los años treinta. La inestabilidad dimensional del concreto masivo provocada inicialmente por el exceso exotérmico de la hidratación del cemento, impone severas limitaciones en el tamaño de los monolitos y en la velocidad de colado. 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 cortinas de tierra y enrocamiento.

Por otro lado los avances en el diseño, logrados gracias al desarrollo de los 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 de materiales graduados. En la actualidad el uso del Concreto Compactado con Rodillos reúne tales ventajas.

A continuación se enuncian las ventajas y desventajas en la construcción de una cortina de concreto y una de materiales graduados. Para ello se supone una boquilla de 60 m de altura y una longitud de corona de 185 m. Ver figura 3.1.

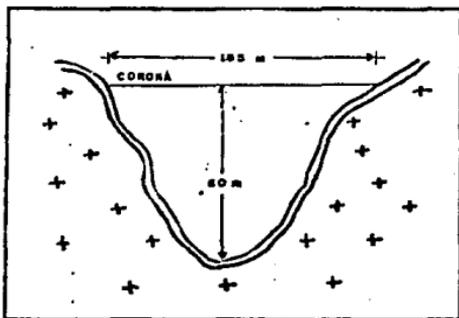


FIGURA 3.1. CORTE LONGITUDINAL DE UNA BOQUILLA.
FUENTE: CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS. CURSO IMCYC. CHIHUAHUA, 1988.

CORTINA DE CONCRETO.

VENTAJAS: Requieren menor volumen por colocar. El material es homogéneo. Los materiales para la fabricación del concreto son fáciles de almacenar. El vertedor se haya en el cuerpo de la cortina. Las propiedades del concreto son controlables. El concreto resiste al desbordamiento.

DESVENTAJAS: La temperatura y el secado originan cambios volumétricos. El proceso de construcción es semicontinuo. La estructura, por ser rígida, admite deformaciones mínimas en la cimentación.

CORTINA DE MATERIALES GRADUADOS.

VENTAJAS: Mayor eficiencia por el empleo de maquinaria pesada. Operación continua. Estructura flexible.

DESVENTAJAS: Mayor volumen de material por colocar. 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. Ver figura 3.2.

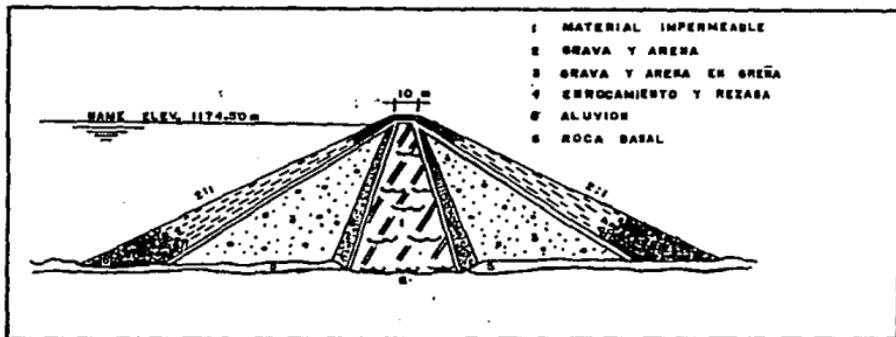


FIGURA 3.2. SECCION DE MATERIALES GRADUADOS.
FUENTE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS. CURSO IMCYC.
CHIHUAHUA, 1988.

Por otro lado del 29 de febrero al 2 de marzo de 1988, se celebró en San Diego, California la II Conferencia sobre Concreto Compactado con Rodillos (C.C.R.). Esta fue una secuela a la reunión celebrada en Denver, Colorado el 1 y 2 de mayo de 1985, como parte de la Convención de Primavera de la ASCE. En esta ocasión el evento fue patrocinado conjuntamente por las Divisiones de Construcción de Ingeniería Geotécnica y de Materiales de la ASCE y por la Asociación del Cemento Portland (PCA).

Durante esta segunda conferencia se presentaron 32 trabajos de especialistas de diversos países, que analizaron con detalle las aplicaciones del C.C.R. en la construcción de presas de almacenamiento en los Estados Unidos, Canadá, Japón, Australia, Alemania, Inglaterra, Francia, Italia, Pakistán, Sudáfrica, Argentina y Brasil. En los trabajos presentados se hizo énfasis en los aspectos de diseño, construcción y comportamiento de presas; diseño, compactación y

durabilidad de pavimentos, pruebas de laboratorio y de campo para asegurar la calidad del C.C.R., y análisis comparativos con costos y tiempos de realización y utilización de las obras mediante esta tecnología.

A continuación se hace una breve referencia de los principales trabajos que se presentaron en la conferencia, y se destacan las ventajas que en nuestro país puede ofrecer en las obras de almacenamiento:

Lowe presentó un panorama general de las presas que se han construido con la técnica del Concreto Compactado con Rodillos, haciendo énfasis en que el costo es aproximadamente un tercio del costo del concreto convencional, con la ventaja de que el agua de una corriente inesperada puede brincar la cresta de la presa durante la construcción con un mínimo daño. Señala la necesidad de una cimentación rocosa o cuando menos un suelo firme y el requisito adicional de asegurar la impermeabilidad entre las diferentes capas de C.C.R.

En el artículo se presenta una descripción completa de la construcción de la Presa Tarbela desarrollada en varias etapas en Pakistán, de 1974 a 1988 y un resumen de las principales presas de C.C.R. de más de 15 m de altura terminadas en diversos países de 1980 a 1987, cuyas características principales se muestran en la tabla 3.1.

Hace énfasis en la necesidad de evitar el deslizamiento en las juntas de las diferentes capas de C.C.R. por medio de impermeabilización de la cara de aguas arriba y reducir la subpresión entre capas mediante drenes colocados en el interior de la presa que descarguen a una galería filtrante.

Schrader presentó un estudio exhaustivo del comportamiento de las presas de C.C.R. concluidas hasta la fecha, en particular en lo que se refiere a las filtraciones a través de las diversas capas.

Hace énfasis en que el costo de varios de los proyectos fue inferior en un 50% al costo de la misma presa si hubiera sido construida de enrocamiento. También señala el enorme ahorro de tiempo en la ejecución de las obras y el nulo daño que causó en algunas el haber sido brincadas por alguna corriente importante durante el proceso de construcción. En algunos casos muestra contenidos de cemento tan bajos como 82 Kilos por metro cúbico y señala que las filtraciones se producen a lo largo del tiempo debido a la clasificación de azolve en las juntas. Ver figura 3.3.

Tarbox y Hansen realizaron un interesante trabajo sobre la planeación, el diseño y la estimación de costos para presas de C.C.R. Presentaron un estudio detallado de las propiedades que debe tener el suelo de cimentación bajo una presa y presentaron algunas recomendaciones de diseño y tratamiento del suelo cuando se cimentan sobre roca.

FECHA DE TERMINACION	NOMBRE DEL PROYECTO	UBICACION	ALTURA MAXIMA m	CEMENTO Y PUZOLANA Kg·m ³	TALUD AGUAS ABAJO	VOLUMEN DE CCP m ³
1980	Shimajigawa	Yamaguchi JAPON	89	91+39	0.8:1.0	170,000
1982	Willow Creek	Oregon EUA	52	70+23	0.8:1.0	331,000
1984	Winchester	Kentucky EUA	21	104+0	1.0:1.0	24,500
1984	Middle Fork	Colorado EUA	38	66+0	0.8:1.0	42,100
1984	Kidston Coperfield River	Queensland AUSTRALIA	40	95+15	0.9:1.0	140,000
1985	Galesville	Oregon EUA	51	54+52	0.8:1.0	160,300
1986	Craigboume	New Jersey EUA	48	64+0	0.75:1.0	219,200
1986	De Mist Kraal Weir	Cape SUDAFRICA	30	58.5+58.5	0.8:1.0	60,000
1986	Arable	Lebowa SUDAFRICA	39	36+74	?	107,000
1986	Oaten	Frijan China	56	?	?	50,000
1986	Grindstone Canyon	New Mexico EUA	42	74+30	0.75:1.0	87,700
1986	Zaalloek	Natal SUDAFRICA	50	31.5+73.5	0.82:1.0	120,000
1986	Saco de Nova Olinda	Paraiba BRASIL	57	72+0	0.8:1.0	132,000

TABLA 3.1. CORTINAS DE GRAVEDAD DE MAS DE 15M DE ALTURA TERMINADAS HASTA 1987.

FUENTE: LA TECNOLOGIA DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS. REVISTA IMCYC VOL. 1, No. 3, OCTUBRE 1988.

FECHA DE TERMINACION	NOMBRE DEL PROYECTO	UBICACION	ALTURA MAXIMA m	CEMENTO Y PUZOLANA Kg/m ³	TALUD AGUAS ABAJO	VOLUMEN DE CCR m ³
1987	Tamagawa	Akita JAPON	103	91+39	0.81:1.0	750,000
1987	Upper Stillwater	Utah EUA	87	77+171	0.8:1.0	1,120,000
1987	Les Olivettes	Bas Rhone FRANCIA	38	88+47	0.75:1.0	85,000
1987	Lower Chase Creek	Arizona EUA	18	84+40	0.7:1.0	13,800
1988	Erizana (dique)	ESPAÑA	15	90+90	?	12,000

TABLA 3.1. CORTINAS DE GRAVEDAD DE MAS DE 15M DE ALTURA TERMINADAS HASTA 1987. (CONTINUACION).

FUENTE: LA TECNOLOGIA DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS. REVISTA IMCYC VOL. 1, No. 3, OCTUBRE 1988.

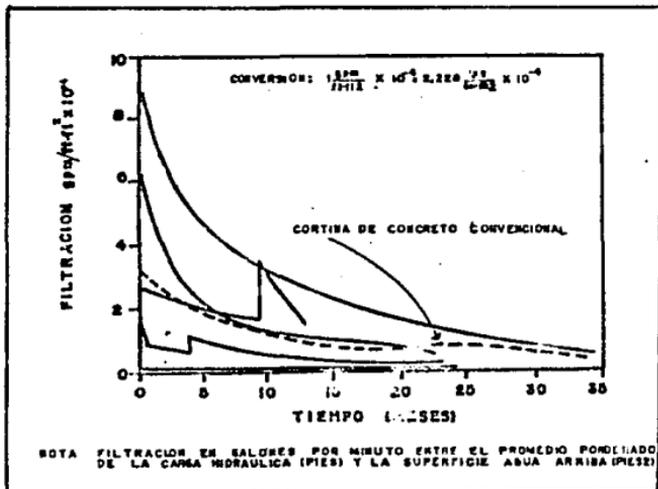


FIGURA 3.3. FILTRACION TOTAL EN VARIAS PRESAS DE C.C.R. DESPUES DEL PRIMER LLENADO.

FUENTE: LA TECNOLOGIA DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS. REVISTA IMCYC. VOL. 1 No. 3, OCTUBRE, 1988.

En lo que se refiere a la cortina tipo gravedad, compararon diferentes secciones transversales para presas de tierra, de enrocamiento y de C.C.R. Ver figura 3.4.

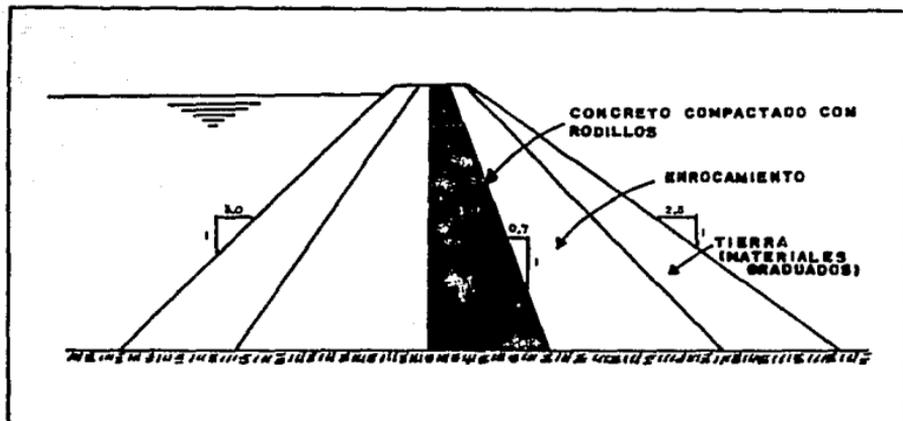


FIGURA 3.4. SECCIONES TRANSVERSALES DE DIVERSOS TIPOS DE PRESAS.
FUENTE: LA TECNOLOGIA DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS.
REVISTA IMCYC. VOL. 1, NO. 3, OCTUBRE 1968.

En la figura 3.5. se muestra la sección transversal típica de una cortina de tipo gravedad de C.C.R.

Hacen referencia a las secciones típicas de boquillas para presas de C.C.R. Ver figura 3.6. También elaboraron una expresión aproximada para el volumen de concreto, dada por la siguiente ecuación:

$$V = \frac{(SH)^2(L_T + 2L_B) + 3T_c^2 L_T}{6S}$$

donde:

- V = Volumen total estimado en metros cúbicos.
- H = Altura máxima de la sección transversal en metros, incluyendo una excavación supuesta de 1.5m dentro de la roca de cimentación.
- L_T = Longitud de la corona de la presa en metros, incluyendo 5m de excavación en cada margen, medidos perpendicularmente a la superficie del terreno.
- L_B = Igual a L_T , pero medido en la base de la presa (ancho del fondo del cauce).
- S = Talud de la cara aguas abajo de la cortina.
- T_c = Ancho de la corona en metros.

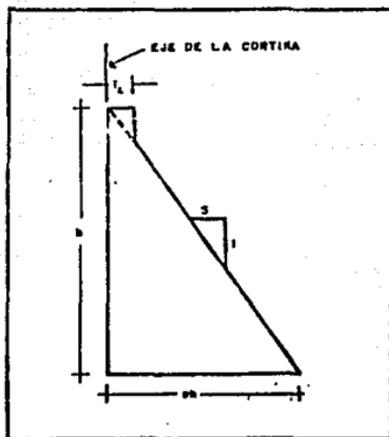


FIGURA 2.5. SECCION TRANSVERSAL TÍPICA DE UNA CORTINA DE GRAVEDAD.
FUENTE: LA TECNOLOGIA DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS.
REVISTA INCYC. VOL. 1, No. 3, OCTUBRE 1988.

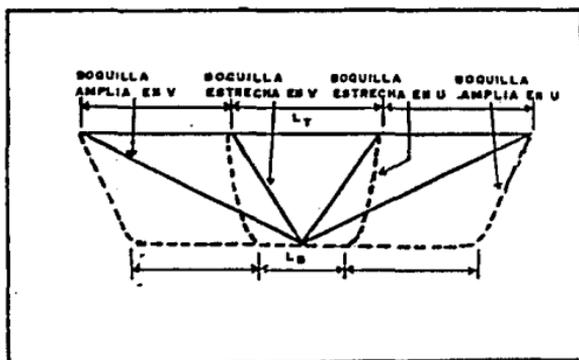


FIGURA 2.6. RANGO DE SECCIONES TÍPICAS DE SOQUILLAS
FUENTE: LA TECNOLOGIA DEL CONCRETO COMPACTADO CON
RODILLOS. REVISTA INCYC. VOL. 1, No. 3,
OCTUBRE 1988.

También presentan diferentes procedimientos para reducir la filtración y una fórmula sencilla para estimar el talud aguas abajo, en función del factor de seguridad por deslizamiento entre las diferentes capas. Ver figura 3.7.

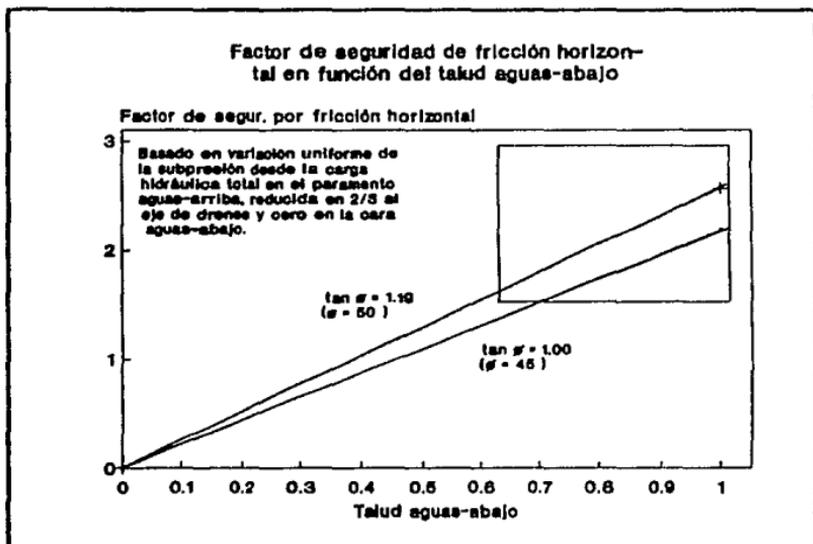


FIGURA 3.7. FACTOR DE SEGURIDAD DE FRICCIÓN HORIZONTAL EN FUNCIÓN DEL TALUD AGUAS ABAJO SUPONIENDO COHESIÓN NULA ENTRE CAPAS HORIZONTALES DE C.C.R. Y DRENES 100% EFICIENTES.
FUENTE: LA TECNOLOGÍA DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS.
REVISTA IMCYC. VOL. 1, No. 3, OCTUBRE 1988.

Utilizando información del costo real de 13 proyectos que se muestran en la tabla 3.2, proponen una gráfica (figura 3.8) para estimar el precio de una cortina de C.C.R. suponiendo una mezcla típica basada en 89 kilos de cemento y 30 kilos de puzolana por metro cúbico de concreto; o bien, 104 kilos de cemento por metro cúbico si no se usa puzolana.

FECHA	PROYECTO	VOLUMEN COTIZADO m ³	COSTO CEMEN- TO	X m ³ PUZO LANA	AGREGA- DOS Y PROCESO (DLS) (USA)	PRECIO TOTAL CCR m ³	COSTO IMPER- MEABI- LIZ. m ³	AHORRO USANDO CCR
1981	North Fork Toutle River Spillway.	13,789	24.80	----	18.00	48.30 ^W	-----	----
1982	Willow Creek OREGON	307,190	8.13	1.58	11.56	24.80	-----	64 %
1984	Austin Defen- tion dams TEXAS	15,835	5.14	1.57	18.00	34.20	-----	----
1985 1987	Upper Still water UTAH	1'039,500	7.01	8.60	10.78	31.08	5.00	57 %
1984	Winchester KENTUCKY	24,500	-----	-----	-----	42.42	13.11	----
1984	Dolet Hills Spillway LOUISIANA	20,000	7.31	1.19	27.00	43.74	-----	----
1985	Galesville OREGON	161,250	5.16	2.49	15.56	27.96	7.68	46 %
1986	Monksville NEW JERSEY	221,400	4.58	----	13.00	21.56	7.03	44 %
1984	Middle Fork COLORADO	40,600	-----	-----	-----	32.63	-----	----
1986	Grindstone Canyon NEW MEXICO	87,700	5.72	1.31	20.20	33.36	7.13	57 %
1987 1988	Elk Creek OREGON	785,300	5.39	1.48	14.00	24.23	6.41	----
1987	Lower Chase Creek ARIZONA	20,500	-----	-----	-----	44.12	-----	40 %
1988	Stagecoach COLORADO	33,300	5.61	2.01	23.00	38.30	-----	----

^W Las tres columnas anteriores corresponden a la cotización más baja del concurso. Esta corresponde al costo real de ejecución de obra.

TABLA 3.2. COTIZACION MAS BAJA DEL C. C. R., COSTO ADICIONAL POR IMPER-
MEABILIZACION DEL PARAMENTO MOJADO E INFLUENCIA DEL C. C. R.
EN EL PRECIO TOTAL DEL PROYECTO.

FUENTE: LA TECNOLOGIA DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS. REVISTA
IMCYC. VOL. 1, No. 3, OCTUBRE 1988.

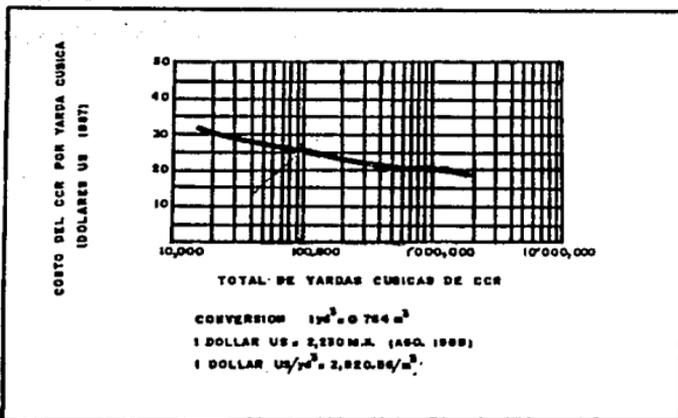


FIGURA 2.2. COSTO DEL C. C. R. CONSIDERANDO 175 LIBRAS DE CEMENTO O 150 LIBRAS DE CEMENTO Y 50 LIBRAS DE FUZOLANA, POR YARDA CUBICA DE CONCRETO.

FUENTE: LA TECNOLOGIA DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS. REVISTA INGYC. VOL. 1, No. 5, OCTUBRE 1988.

Hacen resaltar, entre las principales ventajas, la velocidad de la construcción que permite ahorrar de 1 a 2 años en la terminación de un proyecto típico debido a la utilización de un menor volumen de material, al manejo del vertedor como parte de la estructura del C.C.R. y a esquemas de desviación del río mucho más cortos. Señalan que la velocidad de colocación de C.C.R. en los Estados Unidos es del orden de 7,850 metros cúbicos diarios en dos turnos y el avance vertical en la construcción de las cortinas es del orden de 1.2 metros por día.

También señalan que en virtud de que la cortina puede ser rebasada sin riesgo por alguna creciente inesperada, y de echo trabaja como vertedor de emergencias, la creciente de diseño que puede utilizarse para el vertedor mismo es la de 100 años, en lugar de la de 500 años. Otras ventajas pueden ser la incorporación de escalones en el vertedor para amortiguar la energía del agua, lo que da lugar a una cubeta de menores dimensiones. Además para la reducción del costo influyen una menor excavación en el suelo de cimentación, y un menor volumen de inyecciones, conductos más cortos a través de la presa y el evitarse pozos de oscilación en el caso de hidroeléctricas, por la menor longitud de tubería a presión.

En la tabla 3.3 se presentan los proyectos de presas que se han realizado en Estados Unidos

NOMBRE DEL PROYECTO Y UBICACION	ALT. MAX. MTS	CANT. M ³ DE C. C. R.	CARACTERISTICAS DE ACABADO EN LA CORTINA	PERIODO DE CONST.
WILLOW CREEK HEPPNER, OREGON	52	331,000	PANELES DE CONCRETO PRECOLADO EN LA CARA DE --- AGUAS ARRIBA.	1982
NORTH LOOP DETENTION AUSTIN, TEXAS	10	15,800	CON TERRAPLEN EN LADO DE AGUAS ABAJO.	1984
WINCHESTER WINCHESTER, KENTUCKY	21	24,500	CON UNA MEMBRANA DE RE--- VESTIMIENTO Y PANELES DE CONCRETO PRECOLADO EN EL LADO DE AGUAS ARRIBA.	1984
MIDDLE FORK PARACHUTE, COLORADO	38	42,000	CONCRETO CONVENCIONAL EN AMBAS CARAS.	1984
GREAT HILLS AUSTIN, TEXAS	11	10,000	CON TERRAPLEN EN AMBAS - CARAS.	1984-85
CALESVILLE AZALEA, OREGON	51	170,500	CONCRETO CONVENCIONAL EN EL LADO DE AGUAS ARRIBA.	1985
UPPER STILLWATER DUCHESNE UTAH	88	1'070,000	MOLDES DE CONCRETO DES--- LIZANTE EN AMBAS CARAS.	1985-87
MONKSVILLE RINGWOOD NUEVA JERSEY	46	221,000	CONCRETO CONVENCIONAL EN AMBAS CARAS.	1986
GRINDSTONE CANYON RUIDOSO, NUEVO MEXICO	42	87,500	CONCRETO CONVENCIONAL EN AMBAS CARAS.	1986

TABLA 3.3. PRESAS QUE SE HAN REALIZADO EN ESTADOS UNIDOS CON LA TECNICA DEL C. C. R.

FUENTE: REUNION TECNICA DEL 40^o ANIVERSARIO DEL GRUPO ICA.

JULIO 1987.

3.1. PRESA DE WILLOW CREEK.

3.1.1. INTRODUCCION.

Un equipo de ingenieros del Distrito de Walla Walla, en Washington, del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos fue el que investigó las opciones de diseño para la presa de Willow Creek, la cual fue construida en Heppner, Oregón.

Después de realizar los estudios necesarios este equipo de ingenieros llegó a la conclusión de que grandes cantidades de concreto de buena calidad podrían ser colocadas a elevadas proporciones y con ahorros extraordinarios. Por esta razón el equipo eligió un diseño de construcción hecho totalmente de Concreto Compactado con Rodillos (C.C.R.), que reduce en más de dos terceras partes el costo del colado de un metro cúbico de concreto.

La presa de Willow Creek fue la primera presa de gravedad en el mundo, construida totalmente con Concreto Compactado con Rodillos (C.C.R.). La oficina de la Unidad de Ingenieros de Walla Walla adjudicó a la Aucon Corporations de Pasco, Washington, el contrato principal por 14 millones de dólares.

El tiempo de diseño, desde la primera sugerencia de estudiar la presa como una estructura construida con C.C.R. hasta la adjudicación del contrato principal, fue de menos de dos años. Un equipo mínimo compuesto por el diseñador principal de materiales, un geólogo, un diseñador estructural y un ingeniero en hidráulica, trabajaron en el diseño, desde las investigaciones iniciales de materiales hasta los planos y especificaciones finales. Debido a la naturaleza de esta obra, única en su género, la División y Oficina del Jefe de la Unidad efectuó revisiones completas de la misma, dentro de todas las ramas de la Ingeniería.

Una de las principales ventajas del diseño del C.C.R., fue la eliminación de un canal vertedor lateral separado, que hubiera sido necesario para una presa de enrocamiento o de terraplen y que hubiera costado 10 millones de dólares adicionales, con el deterioro consecuente del paisaje. En su lugar en la parte central de la presa se moldeó una sección de derrame sin compuertas. La cresta del vertedor y el reborde terminal del vertedor, fueron colados con concreto convencional. La superficie del vertedor y el vaso de almacenamiento fueron de C.C.R. Ver figura 3.9.

Mediante el empleo del C.C.R. la presa de Willow Creek fue construida con 75% menos del material requerido por el diseño original de estructura de enrocamiento.

La estructura contiene 313,485 m³ de concreto, su longitud es de 518 m y una altura de 86 m, desde la cresta hasta el punto inferior del vaso de almacenamiento. La altura desde la cresta hasta el lecho es de 49 m. Los propósitos principales de esta obra fueron: controlar inundaciones, tener provisiones para irrigaciones en el futuro y conservar un embalse permanente para fines de recreo.

Los ahorros que se tuvieron en el tiempo y dinero en el proyecto de Willow Creek al emplear C.C.R. se deben a dos factores principales: 1) menor contenido necesario de cemento, y 2) sustitución del procedimiento de colado convencional con mano de obra y carretillas, por eficientes técnicas y equipos para movimiento de tierras.

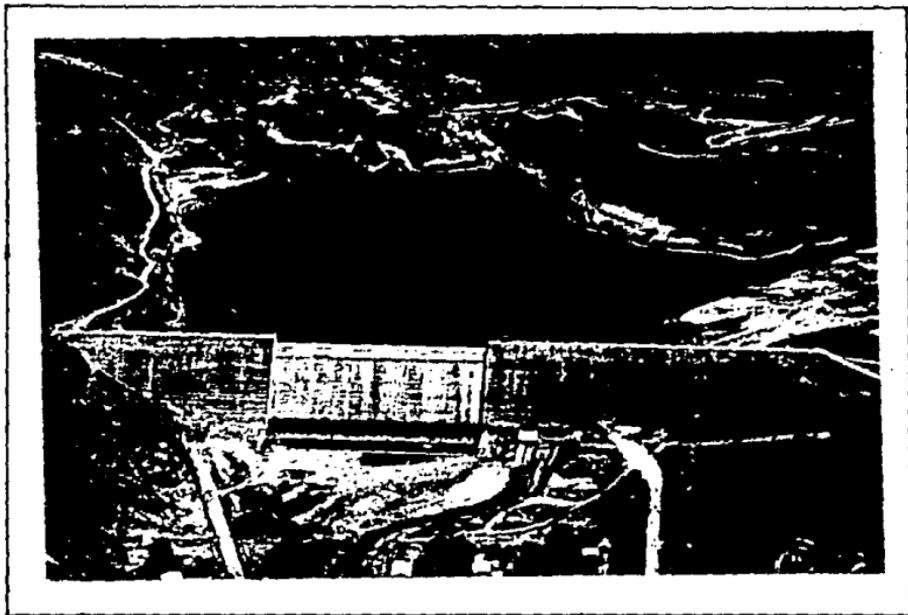


FIGURA 3.9. PRESA WILLOW CREEK TERMINADA. HEPPNER, OREGON.
FUENTE: USE OF ROLLER COMPACTED CONCRETE IN BRAZIL. CONCRETE
INTERNATIONAL VOL. 6, N.º 5, MAYO 1984.

3.1.2. BORDO DE PRUEBAS.

El bordo de pruebas fue construido como una parte complementaria en el esfuerzo del diseño. Para su construcción se utilizaron los mismos agregados que fueron utilizados en la construcción de la presa.

El bordo de pruebas fue construido en una temporada en la que los climas variaron desde caluroso a frío y lluvioso, pero en realidad no se encontró ninguna dificultad considerable bajo ninguna de éstas condiciones.

Las especificaciones de diseño requerían de 4 pasadas con un compactador de tamaño no menor de 21.000 lb (9520 Kg), y una fuerza dinámica de 350 a 550 lb/in. (613 a 963 N/cm). Los compactadores deberían ser de por lo menos 8 ft (2.4 m) de ancho y tener por lo menos una frecuencia de vibración de 1800 ciclos por minuto.

Con la construcción del bordo de pruebas se pudo comprobar que las capas de 12 pulgadas (31 cm) indicadas en el proyecto, podrían ser compactadas con el equipo requerido. Así mismo se pudo comprobar que se tendría estabilidad tanto aguas arriba, como aguas abajo durante la construcción de la cortina. Ver figuras 3.10, 3.11 y 3.12.



FIGURA 3.10. TRANSPORTE DEL C.C.R. EN EL BORDO DE PRUEBAS EN WILLOW CREEK.

FUENTE: THE FIRST CONCRETE GRAVITY DAM DESIGN AND BUILT FOR ROLLER COMPACTED CONSTRUCTION METHODS. CONCRETE INTERNATIONAL. VOL. 4. No. 10, OCTUBRE 1962.

3.1.3. PRODUCTIVIDAD Y TIEMPO DE CONSTRUCCION.

En Willow Creek existen depósitos de sedimentos y gravas sedimentarias y arenosas, con cantos rodados y fragmentos de roca, que varían entre 0.6 y 7.6 m de espesor sobre una base basáltica. Los depósitos de grava están demasiado contaminados con finos plásticos y se encuentran en cantidades insuficientes para poder emplearse como el principal agregado del C.C.R. Por lo tanto el agregado se obtuvo de una cantera y posteriormente fue triturado.

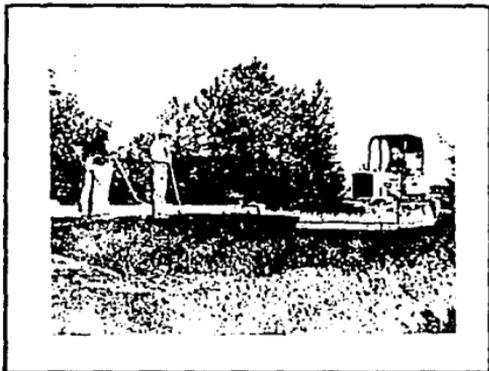


FIGURA 3.11. EXTENDIDO DEL C. C. R. EN EL BORDO DE PRUEBAS EN WILLOW CREEK.

FUENTE: THE FIRST CONCRETE GRAVITY DAM DESIGN AND BUILT FOR ROLLER COMPACTED CONSTRUCTION METHODS. CONCRETE INTERNATIONAL. VOL. 4, No. 10, OCTUBRE 1982.



FIGURA 3.12. COMPACTACION DEL C. C. R. EN EL BORDO DE PRUEBAS EN WILLOW CREEK.

FUENTE: THE FIRST CONCRETE GRAVITY DAM DESIGN AND BUILT FOR ROLLER COMPACTED CONSTRUCTION METHODS. CONCRETE INTERNATIONAL. VOL. 4, No. 10, OCTUBRE 1982.

Se le exigió al contratista que fabricará y almacenará la mayor parte del agregado durante el invierno, antes de que se iniciara el colado del C.C.R., se le pago por el material que se encontraba almacenado. Este procedimiento no solo ayudó en cuanto al flujo de efectivo sino que repercutió en el logro de un agregado pre-enfriado naturalmente, beneficiando así las consideraciones térmicas de diseño de la masa. Estos grandes almacenamientos también aseguraron colados continuos sin juntas frías prolongadas, por falta de disponibilidad de materiales apropiados.

La colocación del C.C.R. fue realizada en un rango de dos veces más rápido de lo que fue producido. La producción del agregado y la colocación del concreto, virtualmente se terminaron al mismo tiempo. Las figuras 3.13, 3.14 y 3.15 presentan una secuencia de fotos tomadas con 9 semanas de diferencia aproximadamente. La rapidez en la colocación del C.C.R. es obvia.



FIGURA 3.13. COMIENZO DE LA COLOCACION DEL C.C.R.
FUENTE: USE OF ROLLER COMPACTED CONCRETE IN BRAZIL.
CONCRETE INTERNATIONAL. VOL. 4, No. 3,
MAYO 1984.

El contratista estimó 121 días de trabajo para la colocación del C.C.R. en su propuesta de programa de obra, y lo terminó en 124 días. El volumen de concreto estimado por los diseñadores fue prácticamente igual al que se requirió para terminar el trabajo.



FIGURA 2.14. AVANCE EN LA COLOCACION DEL C.C.R. 9 SEMANAS DESPUES.

FUENTE: USE OF ROLLER COMPACTED CONCRETE IN BRAZIL. CONCRETE INTERNATIONAL. VOL. 6, No. 5, MAYO 1984.

3.1.4. AGREGADOS.

El tamaño del agregado fue diferente al del concreto convencional, porque se permitió un rango mayor del porcentaje que pasa por cada malla; hubo más material que pasa la malla de 13 mm (1/2 pulgada) y las más chicas a ésta, y además se permitió un 10% más del peso total del agregado para incluir materiales no plásticos que pasan la malla 200. El aumento de materiales finos no plásticos reducen la tendencia a la segregación, ayudan a la compactación y aumentan la resistencia.

Algunos resultados mostraron que no hubo ninguna grieta en la cortina de la presa, esto se logro mediante el buen control que se tuvo durante la producción y el tendido del C.C.R.

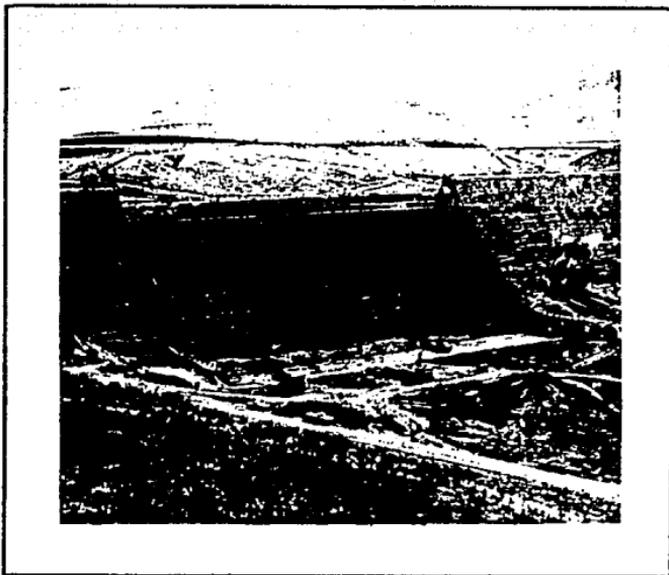


FIGURA 3.15. AVANCE EN LA COLOCACION DEL C.C.R. 9 SEMANAS DESPUES.

FUENTE: USE OF ROLLER COMPACTED CONCRETE IN BRAZIL. CONCRETE INTERNATIONAL. VOL. 6, No. 3, MAYO 1984.

3.1.5. MEZCLADO.

El concreto fue producido en una planta con dos mezcladoras de 9 yd³ (8.9 m³) cada una, y cada una descarga en forma independiente. Debido a la masa que se maneja mientras el C.C.R. se está mezclando, las mezcladoras unicamente trabajaban 8 yd³ (8.1 m³).

Se notó que una diferencia de solo 5 a 10 segundos de más en el mezclado, influya en el decremento de productividad y obviamente se incrementaban los costos, debido a la continuidad que por naturaleza necesita el C.C.R. Así mismo se tuvieron problemas cuando se disminuía el mezclado en 5 o 10 segundos.

3.1.6. TRANSPORTE, TENDIDO Y COMPACTACION.

El transporte se realizó en camiones de 18 yd³ (12 m³), el material fue extendido con motoconformadoras en capas de 10 a 13 pulgadas (254 a 330 mm), para después ser compactado con 4 pasadas con un compactador vibratorio de doble tambor. Las especificaciones para los compactadores fueron fuerza dinámica de por lo menos 350 libras por pulgada (0.25 Kg/mm).

Con el objeto de informar y recomendar procedimientos para hacer cilindros de prueba en futuros proyectos, se hicieron alrededor de 3,000 especímenes de C.C.R. usando diferentes técnicas y diferentes tamaños de especímenes.

Las puzolanas como la ceniza volante se utilizan en concretos de tipo masivo para reducir el calor de hidratación y para minimizar el costo del cemento. La ceniza volante se utilizó en casi todas las mezclas de C.C.R. para la presa Willow Creek.

En general el contenido de agua fue de 185 lb/yd³ (110 Kg/m³) para las mezclas con agregado máximo de 3 pulgadas (76 mm), y de 195 lb/yd³ (118 Kg/m³) para las mezclas con agregados máximos de 1 1/2 pulgadas.

3.2. PRESA LA MANZANILLA.

3.2.1. INTRODUCCION.

Los trabajos de Concreto Compactado con Rodillos (C.C.R.) se iniciaron en nuestro País en la Presa La Manzanilla. Esta primera aplicación se realizó en una obra de pequeñas dimensiones de tal manera que no significara grandes riesgos.

Con el objeto de evitar las inundaciones tradicionales en el municipio de León, Guanajuato, La Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos proyectó un sistema de protección basado en dos tipos de obras: de serranía y de planicie. Las de serranía comprendieron la construcción de una serie de presas de control alojadas a lo largo de la Sierra de la Comanja, principal origen de los ríos y arroyos que cruzan la ciudad. Las de planicie consisten en la ampliación y rectificación de los cauces para lograr un flujo de agua tranquilo.

Las obras de serranía concluyeron al terminarse la Presa La Manzanilla, que se construyó con el procedimiento del Concreto Compactado con Rodillos (C.C.R.).

Con estas construcciones, el municipio de León queda totalmente protegido contra inundaciones y además se prevé que se incrementará la recarga de acuíferos, situación observada en las zonas aledañas de otras presas.

3.2.2. ENSAYES DE LABORATORIO.

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

Entre las características estudiadas en laboratorio 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 y estabilidad dimensional.

Para el caso particular de la Presa La Manzanilla en Guanajuato, se hicieron pruebas con agregados triturados del banco de roca La Manzanilla y arena del cauce del río Ibarrilla. Fueron determinadas las granulometrías de ambos materiales, dosificándolas hasta obtener una curva granulométrica que quedara comprendida dentro de los límites fijados por la envolvente de diseño. Ver figura 3.16.

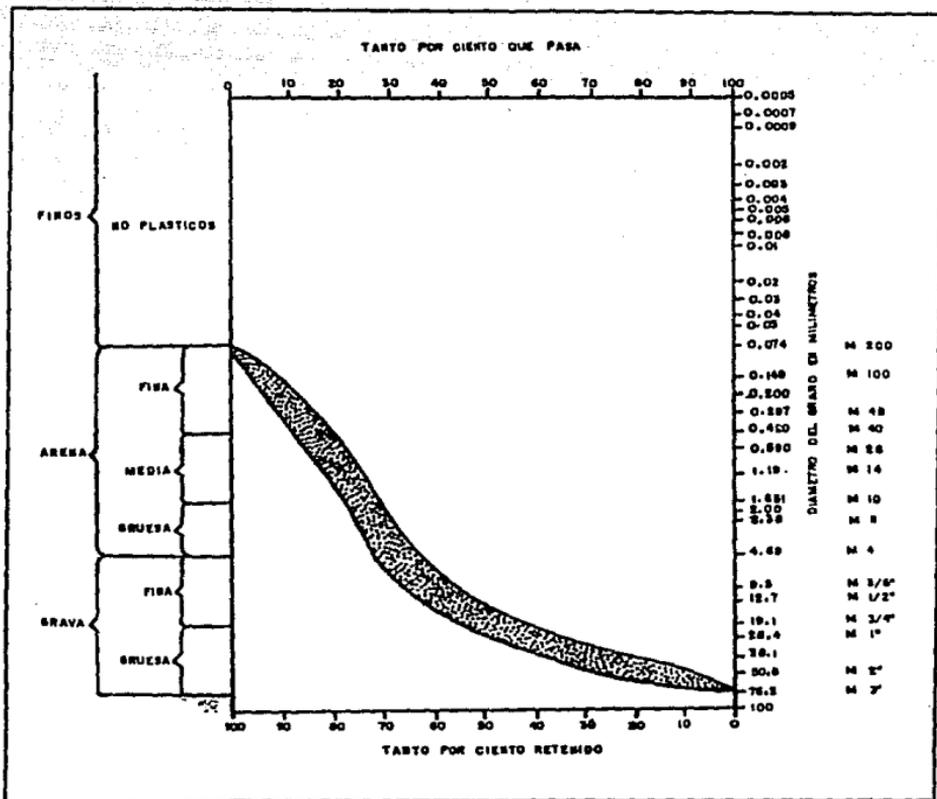


FIGURA 3.16. GRANULOMETRIA DE LOS AGREGADOS PARA LA PRESA LA MANZANILLA FUENTE: CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS. CURSO INCYC, CHIHUAHUA, 1988.

Los resultados de las pruebas de clasificación y de calidad realizadas con los agregados, son los siguientes:

GRAVA

Peso específico relativo	2.40
Absorción	3.5%
Peso volumétrico suelto	1,180 Kg/m ³
Peso volumétrico compactado	1,301 Kg/m ³

ABRACION EN MAQUINA LOS ANGELES

Pérdida de material a 100 revoluciones	5.0%
Pérdida de material a 500 revoluciones	25.1%

INTEMPERISMO ACELERADO

Pérdida de material	5.8%
Reactividad alcali-agregado	potencialmente deletereo
Clasificación petrográfica	toba vitro-cristalina

ARENA

Peso específico relativo	2.56
Absorción	3.5%
Peso volumétrico suelto	1,440 Kg/m ³
Peso volumétrico compactado	1,957 Kg/m ³
Pérdida por lavado	2.67%
Materia orgánica (prueba de color)	en el límite
Módulo de finura	3.13

Se elaboraron mezclas conforme a la granulometría indicada en la figura 3.16. Las proporciones de los materiales fueron las siguientes: 8% de cemento y 6% de agua, y 8% de cemento y 6% de agua, referidos estos porcentajes al peso de los agregados. La tabla 3.4 indica los resultados obtenidos en la resistencia.

CARACTERISTICAS DE LA MEZCLA DE GRAVA TRITURADA						
Contenido de cemento ¹	Contenido de agua ¹	Dimensiones específicas (cm)	Tamaño máximo agregado (pulg)	Edad (días)	Peso Volumétrico (kg/m ³)	Resistencia (Kg/cm ²)
8	6	15x30	1 1/2	7	2311	65-72
8	6	30x30x30	3	28	2207	89
8	6	30x30x30	3	90	2218	106
8	6	15x30	1 1/2	7	2282	59-66
8	6	30x30x30	3	28	2296	102
8	6	30x30x30	3	90	2280	118

¹ Porcentaje en peso respecto al de agregados.

NOTAS: - Los especímenes cilíndricos se compactaron en tres capas de 25 golpes cada una con martillo Proctor.
 - Los especímenes cúbicos se compactaron en tres capas aplicando una presión de 30 kg/cm² con máquina Universal.

TABLA 3.4. CARACTERISTICAS DE LA MEZCLA DE LA GRAVA TRITURADA.
 FUENTE: CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS. CURSO IMCYC, CHIHUAHUA, 1968.

Con base en los resultados de la tabla 3.4, se eligieron para el diseño de la sección de la cortina los siguientes parámetros:

RESISTENCIA A LA COMPRESION

28 días	100 Kg/cm ²
90 días	120 Kg/cm ²
Peso volumétrico	2,280 Kg/m ³
Módulo de elasticidad	114,600 Kg/cm ²
Relación de Poisson	0.14

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

Mediante la construcción de un bordo de prueba se pretende determinar: densidad y resistencia, procedimiento para asegurar la adherencia entre las capas, tratamiento de paramentos y definición de la geometría de la sección, y adherencia del C.C.P. con la cimentación y los empotramientos.

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 de su aplicación provocará que la mezcla se adhiera al equipo de compactación o que éste se atasque, por otro lado si la cantidad de agua es insuficiente, se presentarán fallas locales por cortante en la mezcla bajo el rodillo, o el cemento no podrá hidratarse totalmente.

Procedimiento para Asegurar la Adherencia entre 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 Concreto Rodillado cuando se interrumpa la colocación del material por uno o más días.

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 en el diseño.

Adherencia del C.C.R. a la Cimentación y los Empotramientos: Debido a la importancia de un desplante adecuado, se obtendrán núcleos para evaluar la adherencia entre la primera capa de C.C.R. 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 puede llegar el rodillo vibratorio, para asegurar la homogeneidad del material.

3.2.3. BORDO DE PRUEBA.

En las cercanías del poblado colonia Nuevo México, entre las ciudades de León y Silao (Guanajuato), se construyó un bordo de prueba para la Presa La Manzanilla, con las siguientes dimensiones:

Longitud	12.0 m
Ancho	4.1 m
Altura	1.5 m
Talud	0.75:1

Los agregados empleados en la construcción fueron grava triturada del banco La Manzanilla y arena del río Ibarrilla. El equipo utilizado para la construcción consto de dosificadora de bandas revolventoras de 1 1/2 sacos de cemento (172 lb), camiones de volteo para transportar el concreto, motoconformadora con cuchilla para extender el concreto, rodillo liso vibratorio de 10 toneladas de peso y bailarinas con motor de gasolina.

El bordo de Concreto Compactado con Rodillos se dividió longitudinalmente en tres zonas, las cuales se compactaron con dos, cuatro y seis pasadas con rodillo liso vibratorio de 10 toneladas. El concreto se elaboró con la mezcla dosificada de los agregados, de acuerdo con la granulometría que se indico en la figura 3.10.

Se dosificó un concreto con porcentajes de cemento variables entre 4 y 8%, y contenidos de agua entre 4 y 6%. El material fue colocado sobre una base de concreto normal en capas de 30 cm de espesor; se extendió con una motoconformadora con cuchilla e inmediatamente se le compactó con el rodillo liso vibratorio de 10 toneladas, con cuatro ocho y doce pasadas.

Una vez terminado el terraplen se protegió su corona con arena, manteniéndola húmeda con objeto de evitar la pérdida de agua en el C.C.R. A continuación, se removió la protección para extraer muestras de concreto y al terminar, se repitió la operación para obtener muestras de mediana edad del C.C.R. Las tablas 3.5 y 3.8 proporcionan los resultados de los ensayos de resistencia, permeabilidad y resistencias corregidas, para 8% de cemento y 5% de agua.

El análisis de los resultados no refleja en apariencia condiciones satisfactorias, dadas las bajas resistencias que indican las tablas 3.5 y 3.6.

Sin embargo, conviene señalar que esta ha sido la primera experiencia que se tuvo en el País, y permitió conocer con mayor precisión los problemas que surgen en la construcción de una obra de C.C.R. Además, fueron identificadas las dificultades que surgen en el acondicionamiento del sitio, la preparación de los bancos de materiales, la transportación al sitio y el control de calidad en la construcción.

Contenido de cemento ¹	Contenido de agua ¹	Dimensiones especificadas (cm)	Tamaño máximo agregado (pulg)	Edad (días)	Peso Volumétrico (kg/m ³)	Resistencia (Kg/cm ²)
4	4	15x30	1 1/2	7	2040	12
				28	2053	22-23
4	4	15x30	3	7	2254	18-18
				28	2085	19-20
4	4	30x60	3	28	2123	14
4	6	15x30	1 1/2	7	2129	17-19
				14	2098	24-25
				28	2140	28, 30, 34, 38
6	4	15x30	1 1/2	7	2102	32-32
				28	2211	53
6	4	15x30	3	7	2161	35-35
				28	2184	51-58
6	4	30x60	3	28	2231	41
8	4	15x30	1 1/2	7	2093	37-37
				28	2084	38-40
8	4	15x30	3	7	2147	48-48
				28	2129	45-54
8	4	30x60	3	28	2260	49
4	6	30x60	3	28	2224	23

1 Porcentaje en peso respecto al de agregados.

TABLA 3.5. PRUEBAS DE RESISTENCIA DEL BORDO DE PRUEBA DE LA PRESA LA MANZANILLA.

FUENTE: CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS, CURSO INCYC, CHIHUAHUA, 1988.

PERMEABILIDAD		
Número de Pasadas	Permeabilidad (cm/s)	
A = 4 pasadas	2.4×10^{-3}	
B = 8 pasadas	3.86×10^{-3}	
C = 12 pasadas	4.29×10^{-3}	
	2.87×10^{-3}	
	3.53×10^{-3}	
Resultados de Resistencias corregidas (6% de cemento y 5% de agua)		
Número de Pasadas	Resistencia (Kg/cm ²)	Peso Volumétrico (Kg/m ³)
A = 4 pasadas	64 - 78	1895
B = 8 pasadas	59 - 79	1992
C = 12 pasadas	78 - 79	2279
Nota: Resistencias tomadas a una edad de 35 a 40 días.		

**TABLA 3.6. PERMEABILIDADES Y RESISTENCIAS CORREGIDAS DEL BORDO DE PRUEBA DE LA PRESA LA MANZANILLA.
FUENTE: CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS, CURSO IMCYC CHIHUAHUA 1968.**

3.3. PRESA TRIGOMIL.

3.3.1. INTRODUCCION.

El proyecto de la Presa Trigomil representa el inicio en México de la aplicación en la construcción de un procedimiento como lo es el del "Concreto Compactado con Rodillos" (C.C.R.), el cual ofrece amplias perspectivas de continuarse empleando con mayor frecuencia, debido a las ventajas técnicas y económicas que ofrece, por la impermeabilidad lograda en las construcciones, así como por la reducción del período de ejecución.

Atendiendo a las necesidades cada vez mayores del sector agrícola, la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, ha proyectado una presa de almacenamiento de agua, en el Estado de Jalisco, a la cual se le ha denominado como "Presa Trigomil".

El sitio del proyecto, esta localizado a unos 100 Km al sureste de la Ciudad de Guadalajara, aguas abajo del caserío denominado "Trigomil", sobre el río Ayuquila, del Sistema "Ayutla-Ayuquila-San Pedro" y que es afluente del río Armeria que cruza hasta el Estado de Colima.

Esta obra representa características muy importantes ya que esta considerada la más alta del mundo en su género (100 m), construida con una nueva técnica llamada Concreto Compactado con Rodillos (C.C.R.), representando un nuevo concepto en la construcción de presas en nuestro País, ya que es un concreto con unas características de cero revenimiento, es transportado, colado y compactado, utilizando el equipo de construcción que se usa normalmente en terracerías.

3.3.2. DESCRIPCION, CARACTERISTICAS Y FINALIDADES DE LA OBRA.

La Presa Trigomil, consta de una cortina de Concreto Compactado con Rodillos con una altura desde el lecho del río de aproximadamente 100 m, una longitud de 270 m, ancho de la corona 5 m, taludes aguas arriba vertical hasta la elevación 1.185 y de esta elevación hasta su desplante de 0.24:1; el talud de aguas abajo vertical hasta la elevación 1.202.15 y de esta elevación hasta su desplante de 0.8:1. Para el diseño de la cortina y del vertedor se consideró una avenida de 10,000 años de período de retorno con un gasto de 3,540 m³/seg, resultando una carga sobre la cresta vertedora de 7.88 m, quedando alojado el vertedor dentro de la sección de la cortina. La región donde se construye la Presa Trigomil esta considerada como zona sísmica, por tal motivo se consideró un factor por sismo de 0.17 para que de esta manera quedará la obra dentro del factor de seguridad. La longitud de la cresta vertedora es de 75 m para descargar 3,655 m³/seg.

RESUMEN DATOS DE PROYECTO

Altura de la cortina	100 m
Longitud de la corona	270 m
Ancho de la base	88 m
Ancho de la corona	5 m
Longitud de la cresta vertedora	75 m
Gasto de diseño del vertedor	4,800 m ³ /seg.

Esta presa construida con el sistema de Concreto Compactado con Rodillos, de forma semi-trapecial recta, se compone de las siguientes estructuras: obra de toma provisional, obra de desvío, obra de toma definitiva, cortina y vertedor de excedencias.

3.3.2.1. Excavación de Glorieta.

Consiste en una excavación en la margen izquierda, de 25 m de ancho, 30 m de largo y una altura de 40 m aproximadamente, con un volumen de 30,000 m³, para el monumento, mirador-estacionamiento y acceso de la cortina.

3.3.2.2. Galerías de Exploración, Inspección y Tratamientos

En la ladera y empotramientos de la cortina se excavaron 8 galerías, 3 en cada margen de las elevaciones 1,140; 1,180 y 1,212.30 las 4 mas bajas de 50 m de longitud cada una y las de 1,212.30 m de la elevación de corona en margen derecha una de 30 m, y en margen izquierda una de 15 m, la sección transversal de estas galerías es de tipo "medio punto" de 3.20 m de altura y 3.10 m de ancho, con pendientes de 0.001 del fondo de la galería hacia la cortina, el objeto de estas galerías es de que permitirán que se efectuen una serie de ensayos geomecánicos con los cuales se determinarán las propiedades de esfuerzo-deformación de la roca, para estas pruebas se requiere contar con excavaciones de detalle denominadas "nichos" y preparación de superficies "lisas", además se efectuaron perforaciones de sondeos mecánicos que permitirán por medio de un dispositivo de ensaye determinar propiedades esfuerzo-deformación de la roca.

Las galerías de margen izquierdo con derecho quedarán comunicadas con una galería que atravesará la cortina y tendrá su acceso por aguas abajo, además estas galerías servirán para extraer los pequeños gastos de filtraciones que se tengan. Ver figura 3.17.

3.3.2.3. Obra de Toma Provisional.

Contiene una obra de toma provisional, ubicada sobre la roca de la margen derecha del río, fuera de los límites del agua, y consiste en un cajón de concreto

convencional que atraviesa todo el cuerpo de la cortina, de unos 80 m de longitud, de 3.5 m de ancho por 3.5 m de altura. Este cajón se utilizó como desvío del río provisionalmente, mientras se hacía el definitivo. Después se instaló una tubería de 1.54 m de diámetro con sus respectivas válvulas y rejilla en la parte inferior del cajón y se relleno de concreto para empacar la tubería de acero y funcionar como una obra de toma provisional, durante la construcción.



FIGURA 3.17. PERFORACION DE GALERIAS DE EXPLORACION, EN LA MARGEN DERECHA.

FUENTE: PRESA TRIGOMIL. REVISTA GRUPO ICA, No. 50, NOV-DIC 1986.

3.3.2.4. Ataguías.

Se construyeron dos ataguías para el primer desvío del río por la obra de toma provisional, una aguas arriba y otra aguas abajo, para poder limpiar el cauce del río y construir la estructura de desvío. Después se retiraron, para encauzar el río por dicha estructura de desvío.

Al final de la obra se construyeron dos ataguías, una aguas arriba y otra aguas abajo, para desviar el río nuevamente por la toma provisional y poder colar el tapón de concreto del propio desvío y así sellar la cortina.

Las dimensiones de estas ataguías fueron para la de aguas arriba de 40 m de longitud, un ancho medio de 15 m y una altura de 7 m y para la de aguas abajo, 25 m de longitud, ancho medio de 12 m y una altura de 3 m.

Los materiales que se utilizaron para éstas ataguías fueron arcilla y protección de rocas de desperdicios y limpieza de los taludes con un volumen aproximado de 15,000 m³.

3.3.2.5. Desvío.

Es una estructura de concreto convencional en el desplante de la cortina, que forma un cajón de 13 m de ancho por 8 m de altura, atravesando todo el cuerpo de la cortina, por donde circulará el río durante todo el tiempo de construcción de la presa, contiene la losa de desplante, los muros laterales, dos muros-columna que dividen el claro en tres partes iguales y una losa armada en el techo. Los volúmenes principales de esta obra son:

Excavación en roca	3,200 m ³
Concreto en losa inferior	4,910 m ³
Concreto en muros	3,415 m ³
Concreto en columna	685 m ³
Concreto en losa superior	540 m ³
Acero de refuerzo	155 ton.

3.3.2.6. Cortina.

Sobre la estructura del desvío y de la obra de toma provisional, que son de concreto convencional, se colocó la cortina, la cual fue hecha de Concreto Rodillado; la resistencia del C.C.R. a utilizar fue de una $f'c=150 \text{ Kg/cm}^2$.

La cara húmeda (aguas arriba) de la cortina se recubrió por unos precolados de 0.90 x 0.90 m y 23 cm de espesor, entre estos precolados y el concreto, se colocó una capa de concreto convencional de 0.30 m de espesor. Esta cara de aguas arriba será prácticamente vertical.

aunque en la base llevó una leve inclinación. Ver figura 3.18.

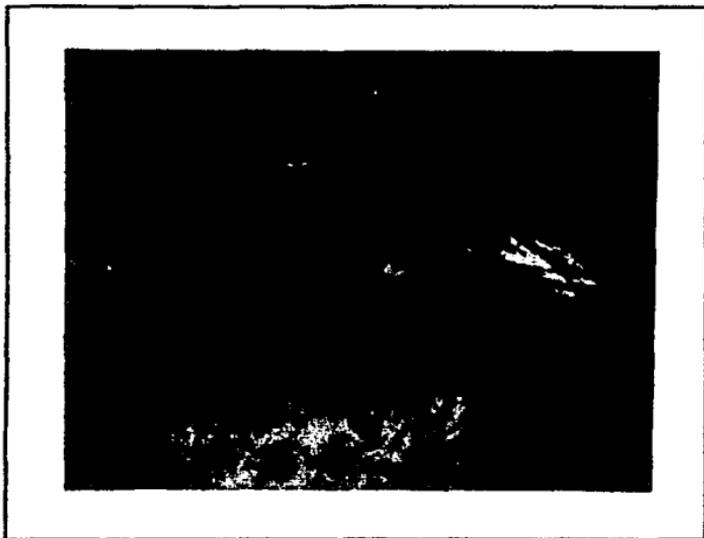


FIGURA 3.18. VISTA DE LA PRESA TRIGOMIL AGUAS ARRIBA.
FUENTE: PRESA TRIGOMIL. GUADALAJARA, JAL.

La cara de aguas abajo quedó con un talud de 0.8:1 con las capas de C.C.R. aparente, excepto en la zona del vertedor. La corona se remató con concreto convencional en los últimos 7 m de altura. Ver figura 3.19.

Los volúmenes principales de esta obra son:

Concreto rodillado	350,000 m ³
Concreto convencional	50,000 m ³
Concreto en precolados	2,700 m ³
Acero de refuerzo en precolados	300 ton

3.3.2.7. Vertedor.

Integrado por el cuerpo de la cortina, va el vertedor, que es una estructura de concreto armado convencional, consistente en un cimacio de derrame en la parte superior, la losa armada de escurrimiento rápido con sus respectivos muros laterales y un deflector salto de ski que descarga las excedencias de agua de la presa directamente sobre la roca del lecho del río.

Sus dimensiones son: ancho promedio 67.50 m, espesor de la losa 0.80 m. Los volúmenes principales de esta obra son: 8,630 m³ de concreto y 78 toneladas de acero de refuerzo. Ver figura 3.20.

3.3.2.8. Obra de Toma Definitiva.

Es un conducto alojado en el cuerpo de la cortina, de cota más alta y dimensiones mucho mayores que la de la obra de toma provisional, tiene una longitud aproximada de 110 m y un diámetro de 2.13 m. Ver figura 3.21.



FIGURA 3.21. CONSTRUCCION DE LA OBRA DE TOMA DEFINITIVA.
FUENTE: PRESA TRIOONIL. GUADALAJARA, JAL.

En la cara húmeda de aguas arriba, lleva una estructura de rejillas, y aguas abajo conecta con una tubería de 2.13 m de diámetro y a continuación lleva la estructura de salida, construida con un concreto convencional con su caseta de control, válvulas de operación y obturación, para controlar el gasto. Como volúmenes principales se tienen: 1,210 m³ de concreto y 53 toneladas de acero de refuerzo. Ver figura 3.22.

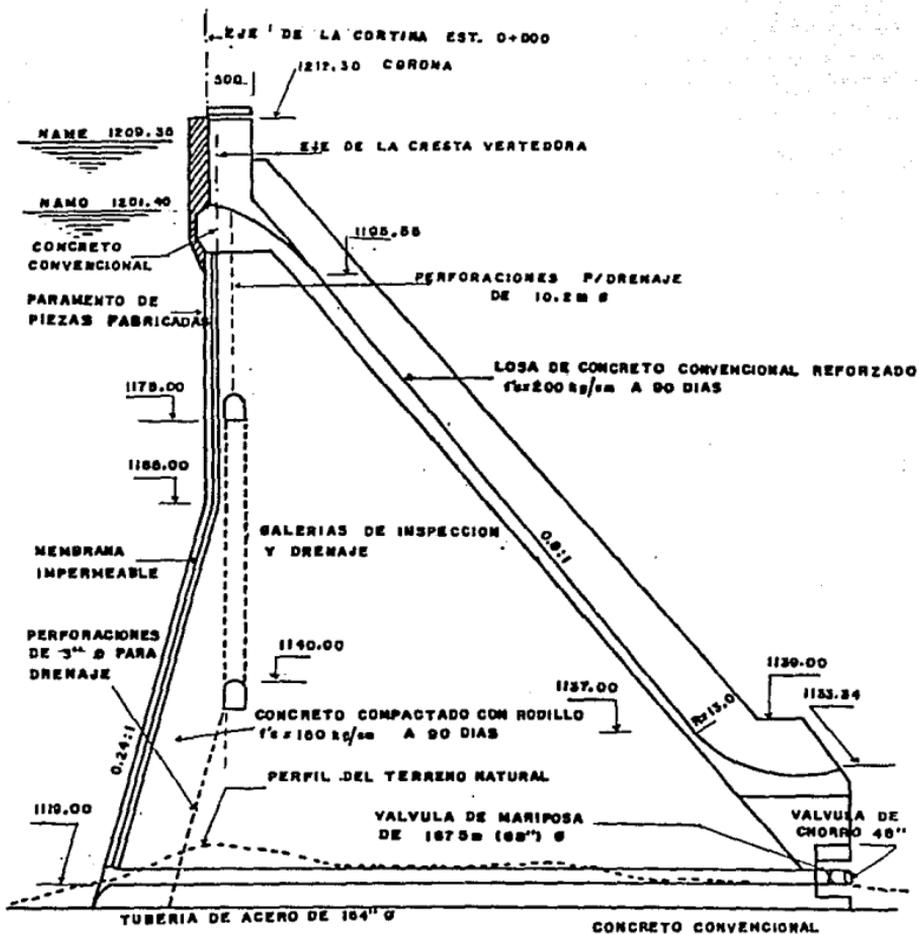


FIGURA 3.20. SECCION DEL VERTEDOR Y OBRA DE TOMA PROVISIONAL DE LA PRESA TRIGOMIL. FUENTE: S. A. R. H. PRESA TRIGOMIL, JALISCO.

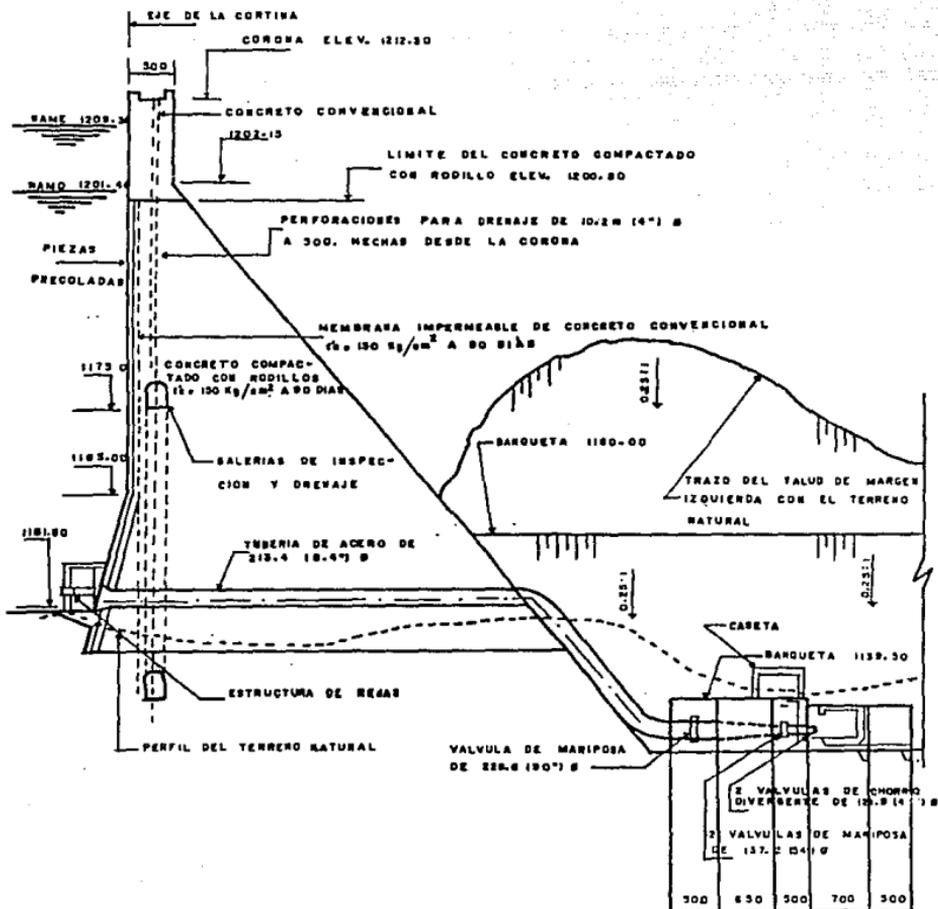


FIGURA 3.22. CORTE POR EL EJE DE LA OBRA DE TOMA DE LA PRESA TRIGOMIL.
FUENTE: S. A. R. H. PRESA TRIGOMIL, JALISCO.

3.3.2.9. Tapón de Cierre.

Finalmente, ya para terminar (80% cortina) la construcción de la presa, se colocó un tapón gigantesco de concreto en la estructura de desvío, con lo cual quedó terminada la obra y se pudo empezar a embalsar. Este tapón tiene un volumen aproximado de 10,500 m³.

A continuación se enlistan los principales datos del proyecto Trigomil, Tablas 3.7 y 3.8.

DATOS DE PROYECTO	
Capacidad total	324'000,000 m ³
Capacidad de conservación	250'000,000 m ³
Capacidad de superalmacenamiento	74'000,000 m ³
Capacidad para azolves	25'000,000 m ³
Elevación de la corona	1,212.30 m
Elevación del N.A.M.E.	1,209.38 m
Elevación de la cresta vertedora	1,201.40 m
Elevación del nivel mínimo de operación	1,164.20 m
Elevación del umbral de la toma	1,151.50 m
Longitud de la cresta vertedora	73.00 m
Gasto máximo de entrada	4,000.00 m ³ /seg.
Gasto de diseño del vertedor	3,855.00 m ³ /seg.
Gasto de diseño de la obra de toma	30.00 m ³ /seg.
Gasto de diseño de la obra de toma provisional	15.00 m ³ /seg.

TABLA. 3.7. DATOS DE PROYECTO DE LA PRESA TRIGOMIL.
FUENTE: S.A.R.H. PRESA TRIGOMIL, JALISCO.

ELEVACION	SUPERFICIE (Has)	CAPACIDAD (millones m ³)
1 1 2 0	0.33	0.01
1 1 2 5	4.05	0.12
1 1 3 0	21.08	0.75
1 1 3 5	44.20	2.38
1 1 4 0	71.58	5.27
1 1 4 5	108.90	9.78
1 1 5 0	149.03	18.23
1 1 5 5	195.05	24.85
1 1 6 0	248.05	35.94
1 1 6 5	302.73	49.71
1 1 7 0	359.48	66.27
1 1 7 5	418.78	85.72
1 1 8 0	480.53	108.20
1 1 8 5	556.93	134.14
1 1 9 0	640.58	164.07
1 1 9 5	732.95	198.41
1 2 0 0	838.50	237.70
1 2 0 5	928.95	231.88
1 2 1 0	1,019.43	330.59

TABLA. 3.8. DATOS DE PROYECTO DE LA PRESA TRIGOMIL.
FUENTE: S.A.R.H. PRESA TRIGOMIL, JALISCO.

3.3.3. PLANEACION GENERAL DE LA OBRA.

3.3.3.1. Instalación y Manejo de Materiales.

El relieve topográfico de la zona en donde está enclavada la obra, correspondiente a el área de la cortina es una boquilla estrecha del río, con taludes en forma de "V" perfecta.

El banco de extracción de roca para obtener los agregados para los concretos de la cortina, se encuentra ubicado a un lado de la misma pero exactamente arriba y en la dirección del eje de la cortina, siguiendo la ladera izquierda a una distancia aproximada de 400 m.

El nivel existente entre el lecho del río y la corona, hemos indicado que son 100 m. y el desnivel entre esta corona y el banco de roca son 180 m aproximadamente.

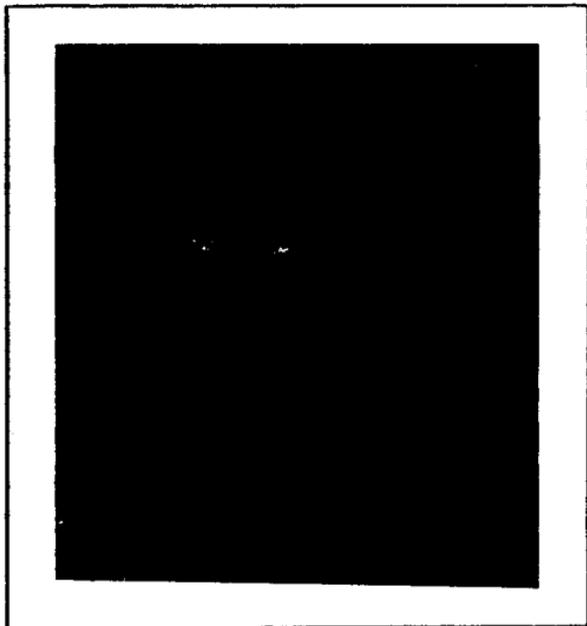


FIGURA 3.23. ASPECTO DE LA PLANTA TRITURADORA.
FUENTE: PRESA TRIGOMIL. GUADALAJARA, JALISCO.

Todas las características anteriores hicieron pensar en una planeación de la obra que hiciese económicas las instalaciones, y con acarreo de materiales mínimos para la fabricación del C.C.R. y utilizar lo menos posible acarreo en camiones, por lo que se consideró mover los agregados y el concreto a base de bandas y tuberías de transportación. Ver figura 3.23.

Para ello se planearon todas las instalaciones desde el banco de roca hasta la cortina de 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 la tolva receptora de roca, para alimentar la trituradora primaria. En otro nivel más abajo se instaló la trituradora secundaria.

Paralelamente a las instalaciones de las trituradoras se construyeron en tres niveles, tres almacenes de agregados de los diferentes tamaños necesarios para el C.C.R. Bajo estos almacenes de agregados se excavó y se revistió con concreto armado, un túnel de recuperación de agregados con una banda de 42" en su interior. Ver figura 3.24.

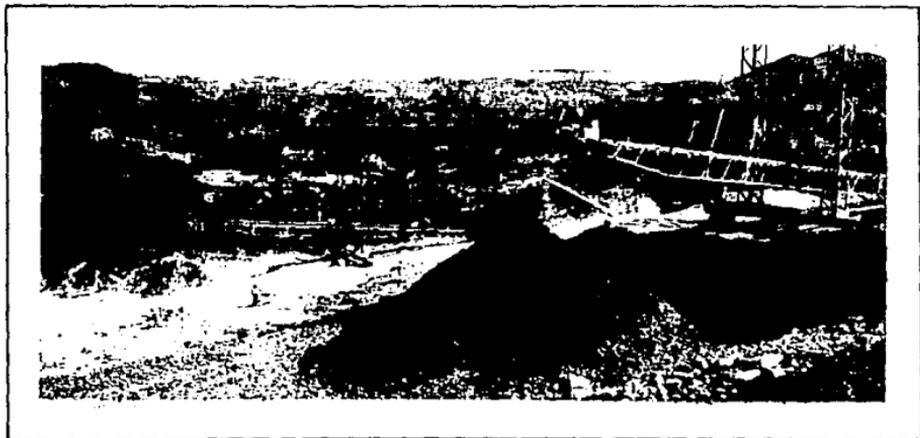


FIGURA 3.24. DIFERENTES TAMAÑOS DE AGREGADO PARA LA ELABORACION DE C. C. R.
FUENTE PRESA TRIGOMIL. REVISTA GRUPO ICA. VOL. 20, NOV-DIC. 1960.

A esta banda de 42" bajan los agregados por gravedad, y la banda los transporta hasta las tolvas superiores de una planta de concreto Ross-220 para fabricación de concreto convencional con una capacidad teórica de producción de 220 m³/hr. Ver figura 3.25.

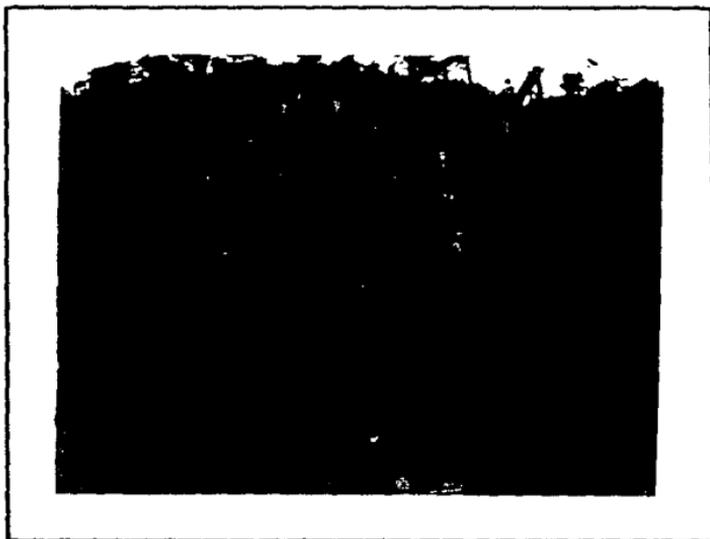


FIGURA 3.25. PLANTA DOSIFICADORA.
FUENTE: PRESA TRIGOMIL. GUADALAJARA, JAL.

La característica principal de esta planta, es que tiene dos revolventoras que hacen que la producción de concreto sea prácticamente continua, a diferencia de una sola que hace la producción intermitente.

De este nivel de la corona de la cortina que es de donde se efectuó la maquila del C.C.R., se bajo el concreto por medio de tuberías que en su extremo interior, tuvieron un amortiguador de energía, el cual vació el concreto en camiones volteo de 10 m³ (ver figura 3.26), los cuales transportaron y distribuyeron el concreto a lo largo y ancho de la cortina (recorrido máximo de 200 m). Ver figura 3.27.



FIGURA 8.26. VACIADO DEL CONCRETO EN LOS CAMIONES.
FUENTE: PRESA TRIGOMIL. GUADALAJARA, JAL.

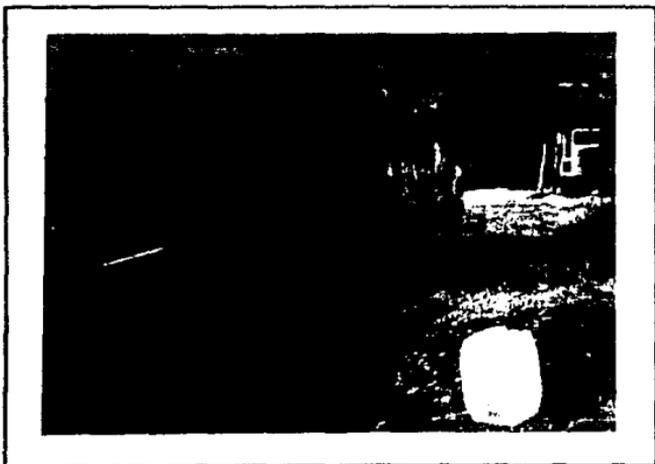


FIGURA 8.27. ACARREO DEL C. C. R.
FUENTE: PRESA TRIGOMIL. GUADALAJARA, JAL.

El concreto convencional fue fabricado en una planta ORU 1040 de 30 m³/hr., la cual se colocó aguas arriba de la cortina (aproximadamente 400 m). De aquí la mezcla fue transportada en camiones olla revolvedora (ver figura 3.28), los cuales descargaron a una cubeta para concreto de 2 m de capacidad. Estas cubetas fueron izadas por una grúa torre hasta la altura de la cortina en el momento de la construcción. De estas cubetas se pasó el concreto a camiones agitadores (dumpcrete), los cuales distribuyeron el concreto a las diferentes zonas de la obra, como son: concreto en vertedor, membrana impermeable, en laderas, etc.

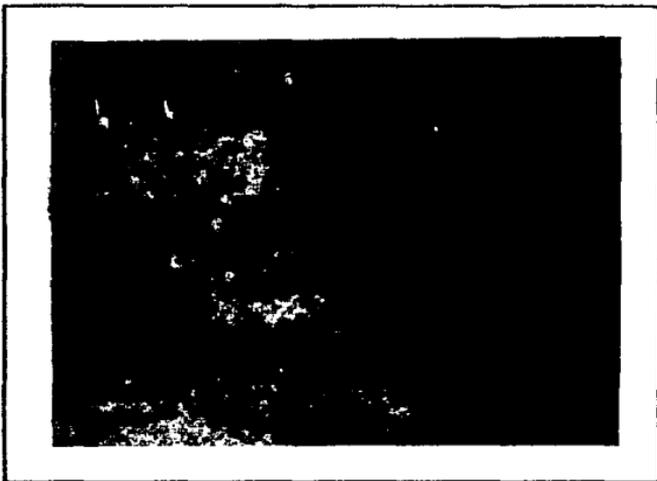


FIGURA 3.28. A LA IZQUIERDA SE PUEDEN APRECIAR LOS CAMIONES OLLA REVOLVEDORA EN LOS QUE SE TRANSPORTA EL CONCRETO CONVENCIONAL.
FUENTE: FRESA TRIGOMIL. GUADALAJARA, JAL.

El C.C.R. se extendió con tractores D-5 sobre neumáticos (ver figura 3.29) y se compactó con un compactador vibratorio CA-25 (ver figura 3.30), con un rodillo liso vibratorio de 10 ton. Una vez elaborado el C.C.R. se procedió inmediatamente a transportarlo con camiones de acarreo para concreto seco al sitio de colocación para que fuera tendido con un cargador sobre neumáticos en capas de 25 a 30 cm de espesor uniformemente en toda el área de la cortina siguiendo una misma dirección y compactándose con un rodillo liso vibratorio de 10 ton., con el fin de obtener una alta compacidad y eliminar zonas de filtraciones.

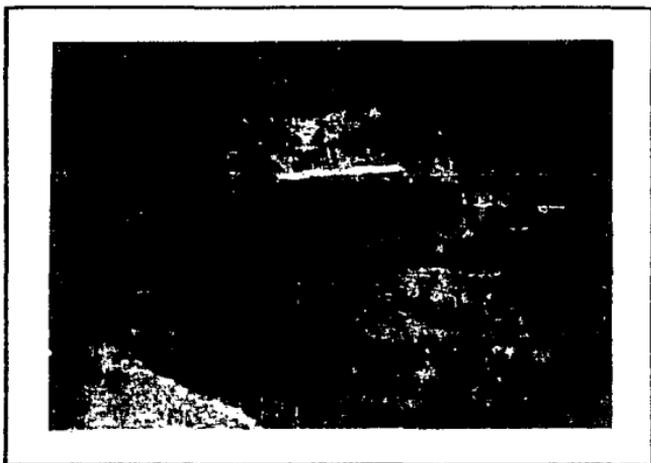


FIGURA 3. 29. EXTENDIDO DEL C. C. R.
FUENTE: PRESA TRIGOMIL. GUADALAJARA, JAL.

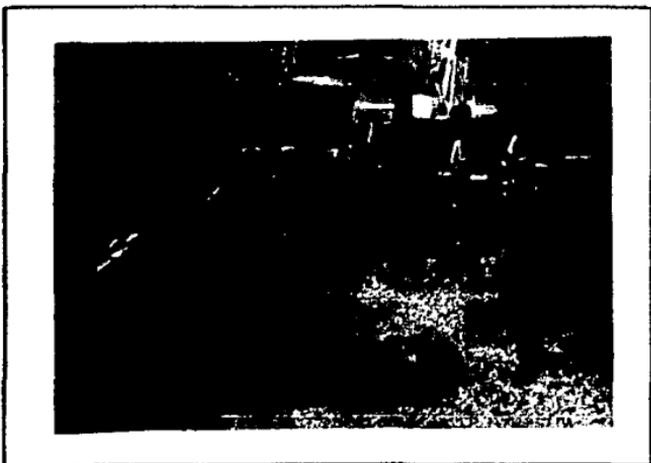


FIGURA 3. 30. COMPACTACION DEL C. C. R.
FUENTE: PRESA TRIGOMIL. GUADALAJARA, JAL.

El riego de humedecimiento y curado continuo se hizo con un sistema bomba-tanque elevado, conducción con tubería y manguera con rociador fino en el extremo (ver figura 3.31). La reparación de las juntas frías se hizo con soplete de aire-agua, de acuerdo con lo anteriormente señalado (ver figura 3.32).

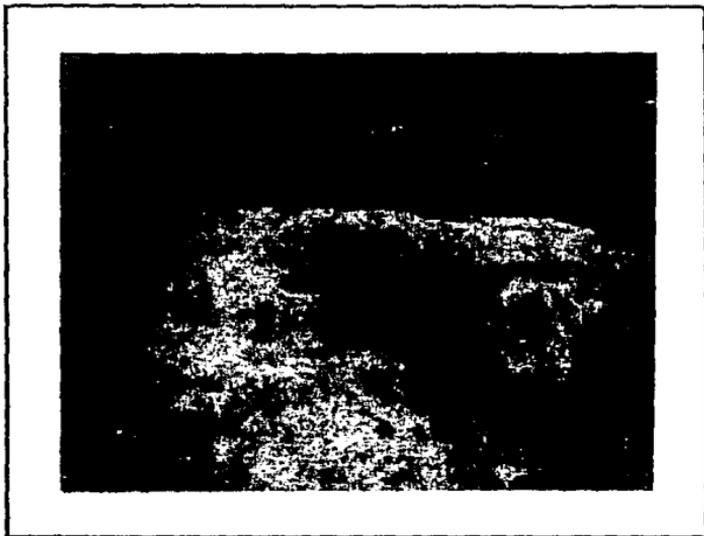
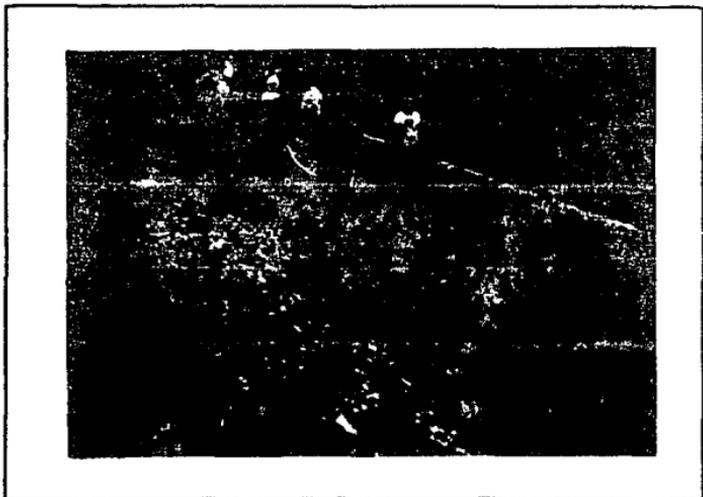


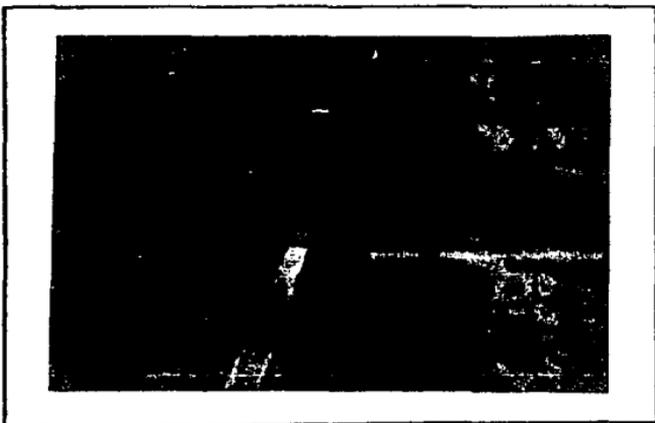
FIGURA 3.31. RIEGO DEL C. C. R.
FUENTE: PRESA TRIOMIL GUADALAJARA, JAL.

En la cara húmeda de aguas arriba de la cortina, lleva unas piezas precoladas con concreto normal $f'c = 200 \text{ Kg/cm}^2$, de $0.90 \times 0.90 \text{ m}$. de sección entre éstas y tres capas sucesivas de C.C.R. confinan la membrana impermeable de concreto convencional y también entre la roca de las laderas y el C.C.R. de la cortina (ver figura 3.33). Estos precolados se manejaron de la siguiente manera:

Se transportaron hasta la parte baja de la cortina, de ahí los tomó la grúa torre para izarlos hasta la parte superior de la cortina en construcción. La grúa alcanzó a colocar hasta una altura de 48 m. Después de esta longitud los precolados fueron descargados en una plataforma, la cual por medio de una pluma de construcción colocó dichas piezas precoladas en toda la cortina. Ver figura 3.34.



**FIGURA 2.22. LIMPIADO DEL C. C. R. PARA HACER UNA JUNTA FRIA.
FUENTE: PRESA TRIGOMIL. GUADALAJARA, JAL.**



**FIGURA 2.23. COLOCACION DE LOS PRECOLADOS.
FUENTE: PRESA TRIGOMIL. GUADALAJARA, JAL.**

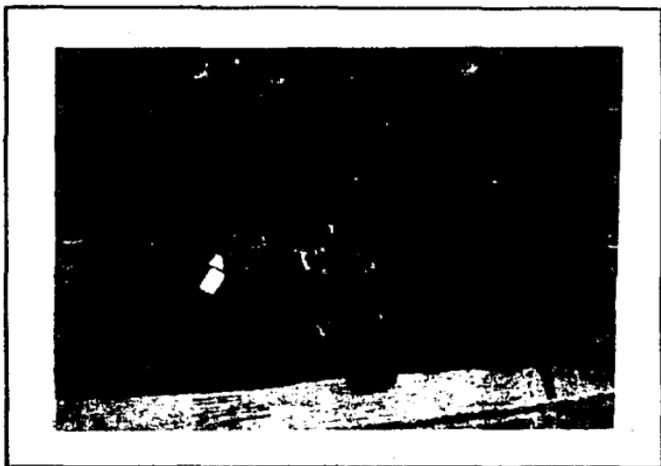


FIGURA 3.34. IZAJE DE LOS PRECOLADOS.
FUENTE: PRESA TRIGOMIL, GUADALAJARA, JAL.

3.3.3.2. Secuencias de Construcción.

Primeramente se excavó la glorieta de instalaciones y se realizó la limpieza de laderas entre trazas de la cortina, después se excavaron las seis galerías de exploración y tratamiento.

A continuación fue construida la obra de toma provisional que en realidad es un canal de concreto en la margen derecha para desvío del río con el objeto de poder construir la obra de desvío real.

Hecho esto, fue posible construir las atagufas que aislaron el recinto de la cortina en el lecho del río al hacer la limpieza del mismo y colocar la plantilla de concreto de regulación y desplante.

Sobre esta plantilla se hizo la perforación con barrenos para tratamiento de la cimentación por medio de inyección. Después fue construida con concreto convencional la obra de desvío para que el río pudiera pasar a través de la misma en tiempo de avenidas sin causar daños ni demoras en la construcción de la cortina.

Una vez vuelto a desviar el río por la obra de desvío, en la obra de toma provisional se instalaron tuberías de la toma y válvulas, y se rellenaron con concreto convencional.

Mientras tanto, se hizo la colocación de C.C.R. sobre la obra de desvío colocando capas de 30 cm de espesor limitadas a los lados por una zanja de 50 cm antes de llegar a la roca de las laderas, y por la parte de aguas arriba en forma idéntica para llenar entre éstas y los precolados con la membrana impermeable de concreto convencional (ver figura 3.35); por la cara de aguas abajo de la cortina, el borde del C.C.R. queda libre en cada capa cuidando únicamente de guardar la inclinación proyectada de ésta cara, quedando con una apariencia rugosa escalonada (ver figura 3.36).

En el cuerpo de la cortina del lado de margen izquierda, se fue colocando dentro del C.C.R. un relleno de grava-arena (ver figura 3.37), el cual fue extraído posteriormente, quedando formado el túnel, después fue introducida la tubería de 2.13 m de diámetro y se construyó con concreto convencional la estructura de rejillas en la cara de aguas arriba, en la cara de aguas abajo va la estructura de salida de la obra de toma que es un canal de concreto revistiendo la excavación de la roca, apoyos para la tubería y válvulas, y una caseta de operación y control de la misma.

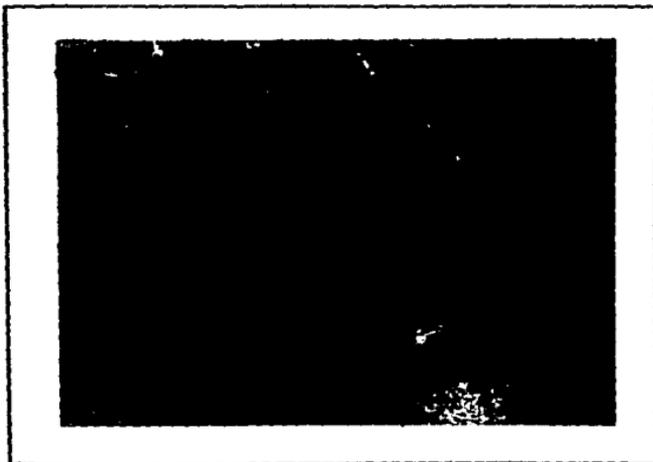


FIGURA 3.35. MEMBRANA IMPERMEABLE DE CONCRETO CONVENCIONAL.
FUENTE: PRESA TRIGOMIL, GUADALAJARA, JAL.



FIGURA 3.36. APARIENCIA DE LA PRESA AGUAS ABAJO.
FUENTE: PRESA TRIGOMIL. GUADALAJARA, JAL.

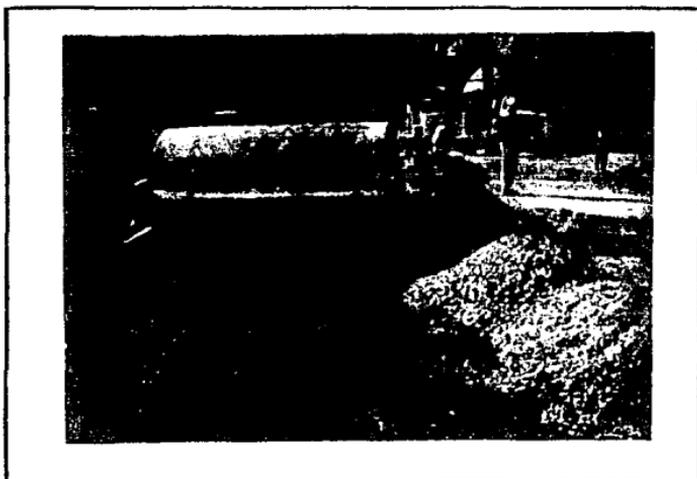


FIGURA 3.37. RELLENO DE GRAVA-ARENA PARA FORMAR LA
GALERIA DE INSPECCION.
FUENTE: PRESA TRIGOMIL. GUADALAJARA, JAL.

A medida que se fueron colocando las capas de C.C.R. de la cortina, se fue dejando preparado el sitio donde sería alojado el vertedor, y conforme subió la altura de construcción de la cortina, se fue construyendo éste. Ver figura 3.38.

La parte superior de la cortina se construyó con concreto convencional sobre C.C.R., siendo una estructura de 7 m de altura por 5 m de ancho, y a todo lo largo de la cortina, con excepción de la zona del vertedor, y que constituye la corona de la misma.

El conducto de la obra de desvío, fue rellenado con un tapón de concreto convencional una vez que fue posible volver a pasar el agua del río en tiempo de estiaje por la tubería de la obra de toma provisional.

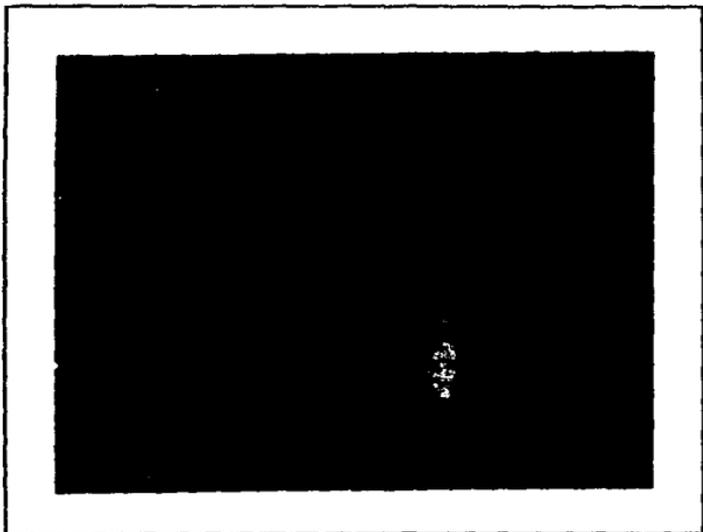


FIGURA 3.38. CONSTRUCCION DEL VERTEDOR.
FUENTE: PRESA TRIGOMIL. GUADALAJARA, JAL.

3.3.4. BORDO DE PRUEBAS.

Apegándose a las especificaciones técnicas de la obra, se necesitó la construcción de un bordo de pruebas en la misma forma y condiciones en que se construyó la cortina. El bordo de pruebas construido en la Presa Trigomil tiene las siguientes características:

- Longitud 48 m.
- Ancho de Corona: Dos veces el ancho del rodillo que se utiliza en la construcción de la Presa con traslape de aproximadamente 40 cm.
- Altura: La correspondiente a la compactación de 10 capas, de 30 cm de espesor de material suelto
- Sección Transversal: El paramento de aguas arriba fue vertical y el paramento de aguas abajo tuvo un talud de 0.75:1. Ver figura 3.39.
- Localización: El bordo de pruebas se construyó aguas abajo de la cortina, evitando que formara parte de la cortina o que interfiriera en las actividades para la construcción.
- Materiales: Los materiales fueron los mismos que se utilizaron en la construcción de la cortina, respetándose la granulometría y mezclas propuestas para la misma.
- Tiempo de Construcción del bordo: Este se realizó una vez terminada la limpia de la boquilla, se obtuvieron los agregados necesarios estipulados para la construcción de la cortina y una vez preparada la superficie que sirvió de apoyo al C.C.R.

El paramento vertical se construyó con las formas prefabricadas que se emplearon en la construcción de la cortina, las formas se manufacturaron previamente y se les dió el tiempo necesario para que alcanzaran la resistencia del proyecto.

En el C.C.R. el bordo fue dividido en tres zonas: A, B y C, según la figura 3.39, las cuales se compactaron con 2, 4 y 8 pasadas respectivamente, con rodillo liso vibratorio de 10 toneladas de peso. Las capas fueron colocadas de la siguiente manera: se tendieron primero cuatro capas de C.C.R. con ceniza volante, lo que produjo una altura de 1.20 m al finalizar el tendido de estas cuatro capas, se continuo con la colocación de una capa de concreto de liga cuyo espesor fue de aproximadamente 0.08 m, la sexta capa fue de C.C.R. con ceniza volante y tuvo un espesor de 0.22 m. Las capas 7 y 8 estuvieron constituidas por C.C.R. con limo y el espesor de éstas fue de 0.60 m, la capa nueve de concreto de liga tuvo un espesor de 0.08 m, la capa 10 fue de C.C.R. con limo cuyo espesor fue de 0.22 m; finalmente se colocaron las capas 11 y 12 de C.C.R. con limo, con un espesor de 0.60 m.

Con los resultados obtenidos de este bordo se pudo evaluar lo siguiente:

- El proporcionamiento definitivo de la mezcla a utilizarse en la cortina.

- El número de pasadas del equipo para alcanzar el peso volumétrico del proyecto.
- El anclaje de las piezas precoladas en el paramento vertical.
- Verificación del equipo de compactación.

Los resultados obtenidos del bordo de prueba fueron satisfactorios, lográndose alcanzar un peso volumétrico compacto de 2.300 Kg/m^3 con 6 pasadas del rodillo liso vibratorio.

3.3.4.1. Procedimiento Constructivo.

Este se llevo a cabo en las siguientes etapas:

- Cuatro capas de C.C.R. con ceniza volante.
- Capa de concreto de liga, completándolo con C.C.R. con ceniza volante.
- Dos capas de C.C.R. con limo.
- Capa de concreto con liga completándolo con C.C.R. con limo.
- Dos capas de C.C.R. con limo.

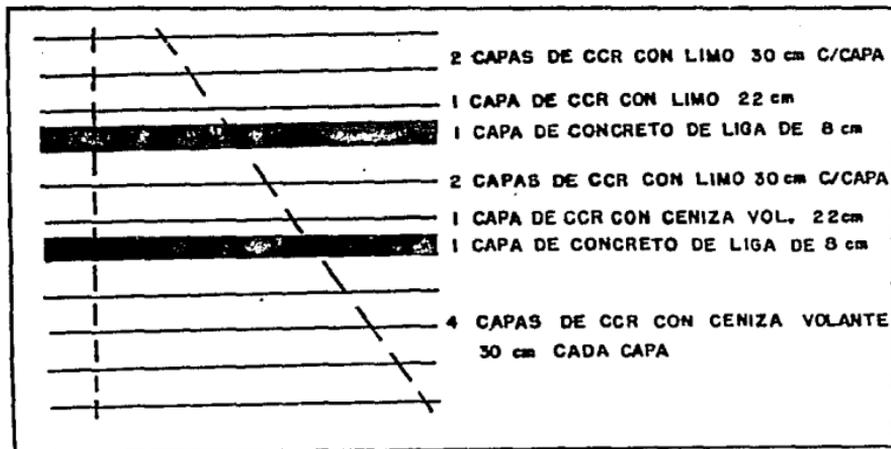


FIGURA 3.40. CROQUIS DE PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE LA PRESA TRIGOMIL.
FUENTE: CALCULO DE LAS CANTIDADES NECESARIAS DE CENIZA VOLANTE Y CEMENTO QUE SE REQUIEREN PARA LA CONSTRUCCION DEL BORDO DE PRUEBA DEL PROYECTO TRIGOMIL, JAL. S.A.R.H. JUNIO DE 1990.

DIMENSIONES:

ELEMENTOS PREFABRICADOS: Largo 0,9m, Ancho 0,9m

BASE: Largo 48,0, Ancho 10,35m

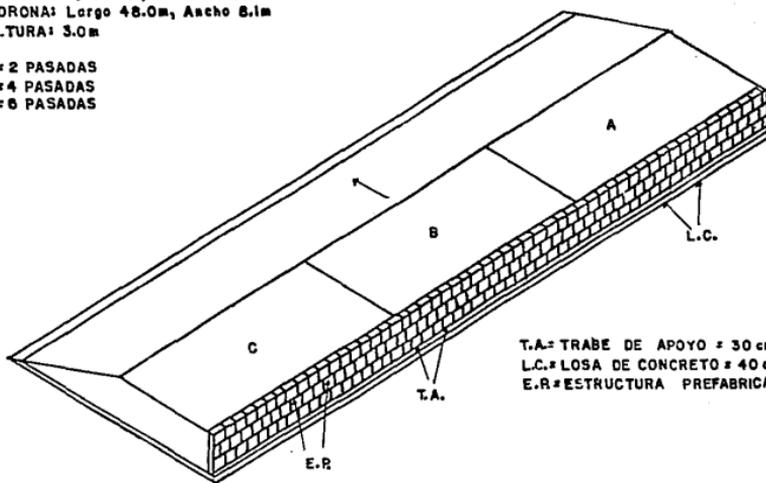
CORONA: Largo 48,0m, Ancho 8,1m

ALTURA: 3,0m

A = 2 PASADAS

B = 4 PASADAS

C = 6 PASADAS



T.A.= TRABE DE APOYO = 30 cm
L.C.= LOSA DE CONCRETO = 40 cm
E.R.= ESTRUCTURA PREFABRICADA

FIGURA 3-38a BORDO DE PRUEBAS DE LA PRESA TRIGONIL.
FUENTE: CALCULO DE LAS CANTIDADES DE CENIZA VOLANTE DE LA PRESA TRIGONIL.
S.A.R.H. JUNIO 1990.

3.3.5. CONSTRUCCION DE LA CORTINA DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS.

La estructura principal de la presa es la cortina, la cual fue construida con la innovación del sistema del C.C.R., consistente en el aprovechamiento de los recursos naturales localizados en las cercanías del sitio de construcción para la obtención de materiales inertes por especificación, y se cumplió con la granulometría que comprende los tamaños de 3" a finos abajo de la malla No. 4.

Estos materiales se combinan con cemento y agua hasta lograr su homogeneidad de la misma manera que se hace para el concreto convencional, con la diferencia de que en el C.C.R. el revenimiento debe ser cero, por lo que se requieren consumos mucho menores de cemento y agua.

Una vez elaborado este concreto se procede inmediatamente a transportarlo en camiones de acarreo para concreto seco al sitio de colocación, para que sea tendido con un tractor sobre neumáticos entre capas de 25 a 30 cm de espesor, uniformemente en toda el área de la cortina siguiendo una misma dirección y compactándose con rodillo liso vibratorio de 10 toneladas de peso, con el fin de obtener una alta compacidad y eliminar zonas de filtración en el concreto.

Antes de colocar la siguiente capa, en ocasiones se coloca una capa de concreto convencional de un espesor aproximado de 2 cm que sirve de liga entre capas. Este proceso es repetitivo hasta llegar al nivel de proyecto.

3.3.6. CONCLUSIONES.

Las conclusiones comparativas que justifican la utilización del procedimiento de C.C.R. y su aplicación a otras estructuras, se comentan a continuación.

a) La utilización de los recursos naturales en el lugar de la ejecución del proyecto en un tiempo correspondiente al 25% del que normalmente se requiere en presas de diseño tradicionales, por los volúmenes a manejar mucho menores, los cuales originan una reducción en costo, además la recuperación a corto plazo de la inversión por los beneficios inmediatos a recibir.

b) Abatir costo de construcción utilizando menor volumen de materiales, menor tiempo de construcción y no usar cimbra.

c) Se obtiene una compacidad mayor en el concreto, reduciéndose la permeabilidad del mismo, y por tanto las filtraciones. Al colocarse el concreto en capas sucesivas de espesor pequeño de 25 a 30 cm hace que el calor de hidratación del cemento generado se reduzca considerablemente, evitando mayores variaciones volumétricas del concreto y por tanto menores agrietamientos, dando por resultado una mejor impermeabilidad del mismo.

El proyecto de la Presa Trigomil, representa el inicio de la aplicación en la construcción de un procedimiento novedoso en México, como el Concreto Compactado con Rodillos, el cual ofrece amplias perspectivas de continuarse empleando con mayor constancia, por las ventajas que ofrece económicamente y su rapidez de ejecución, no solo en presas, sino también en pavimentos.

CAPITULO 4

APLICACION DEL C.C.R. EN CARRETERAS

El Concreto Compactado con Rodillos (C.C.R.) ha recibido mucha atención durante los últimos años, debido a la creciente aceptación de su empleo como concreto masivo en la construcción de presas. Sin embargo, un avance creciente es el empleo cada vez mayor de C.C.R. en pavimentación, ya que soporta cargas pesadas y su costo es relativamente bajo. El Cuerpo de Ingenieros de E.U.A. ha aprobado dicho material para fajas de estacionamiento para aeronaves, pistas de rodaje, así como para otros pavimentos en instalaciones militares, con lo cual se ha fomentado el interés entre todos aquellos relacionados en la construcción de pavimentos.

En México se invirtieron en el período 1983-1987, más de 670 millones de pesos para la construcción y conservación del 70% de la red carretera nacional y el 25% de los caminos rurales por lo que es necesario implementar técnicas de diseño y construcción que permitan lograr mejores pavimentos.

A continuación se mencionarán las ventajas que ofrece el C.C.R. en pavimentos de acuerdo a la II Conferencia sobre Concreto Compactado con Rodillos, celebrada en San Diego, California, del 29 de febrero al 2 de marzo de 1988.

Rollins presentó un interesante trabajo sobre el diseño de pavimentos de C.C.R., tanto en sus aplicaciones de tipo industrial, ya sea en patios de maniobras o plataformas de estacionamiento de aeropuertos, como en caminos. Señala la formación natural de fisuras en el C.C.R. con espaciamientos de 12 a 18 metros, lo que evita el cortar la superficie del concreto para las juntas de contracción.

Hace énfasis en la necesidad de una compactación adecuada mediante equipo pesado y capas suficientemente delgadas de C.C.R. (de 15 a 25 cm.). Indica que las características del C.C.R. son esencialmente las mismas que las del concreto normal, pudiendo usar materiales marginales con granulometrías, plasticidad, u otras características que normalmente no se aceptarían en concreto normal.

Señala también que por la baja relación agua/cemento y la alta densidad, el C.C.R. tiene una permeabilidad muy reducida que lo hace ideal para condiciones de congelación o descongelación en carreteras ubicadas en climas extremos.

Ragan presentó un estudio detallado sobre proporcionamientos de mezclas de C.C.R. para pavimentos que ha utilizado el Ejército de los Estados Unidos en 5 diferentes proyectos de pavimentos de trabajo pesado expuesto a tráfico de vehículos de baja velocidad montados sobre llantas o sobre orugas. Hace énfasis en que todas las operaciones de campo del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de E.U.A. están recurriendo actualmente al C.C.R. en sus pavimentos y que el ahorro en el costo se debe principalmente a los procedimientos de producción, colocación y compactación.

Withrow presentó un interesante artículo referente a los parámetros de compactación del C.C.R., cuya base de diseño es la prueba Proctor modificada y cuyo control de calidad en el campo es la determinación de la relación humedad-densidad.

La tabla 4.1 muestra parámetros típicos para el C.C.R. que se usa en presas y el C.C.R. que se usa en pavimentos, y en las figuras 4.1 y 4.2, las granulometrías correspondientes a ambos casos.

Schweizer y Raba presentaron un interesante trabajo sobre pavimentos de C.C.R. utilizando agregados con características marginales. Lo más interesante es la comparación que muestran en la tabla 4.2, la cual se refiere a los costos equivalentes de asfalto, concreto convencional, suelo-cemento y C.C.R., resultando este último el más económico y señalando las ventajas de que el pavimento se puede usar inmediatamente después de terminada la compactación. Ver tabla 4.2

GRANULOMETRIA TIPICA DEL C. C. R.		
	EN PRESAS	EN PAVIMENTOS
TAMANO MAXIMO DEL AGREGADO	2"	3/4"
% QUE PASA LA MALLA 4	35	56
RELACION AGUA/PUZOLANA	0.35	0.39

TABLA 4.1. COMPARACION ENTRE C. C. R. PARA PRESAS Y PARA PAVIMENTOS.
FUENTE: LA TECNOLOGIA DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS. REVISTA INCYC. VOL. 1, No. 5, OCTUBRE DE 1988.

COSTO BASICO UNITARIO (DLS. US/M ²)			
ALTERNATIVA	COSTO INICIAL	COSTO ANUAL DE MANTENIMIENTO ESTIMADO	COSTO ESTIMADO A LO LARGO DE LA VIDA UTIL ⁽¹⁾
CONCRETO ASFALTICO, MEZCLA CALIENTE, 30 cm. ESPESOR.	\$17.92	\$1.97	\$40.53
CONCRETO HIDRAULICO CONVENCIONAL, 25 cm. DE ESPESOR.	\$29.86	\$0.15	\$31.57
CONCRETO COMPACTADO CON -- RODILLOS, 30 cm. ESPESOR.	\$19.11	\$0.19	\$21.31
SUELO-CEMENTO, 30 cm. DE ESPESOR	\$ 9.56	\$2.09 ⁽²⁾	\$33.53

(1) Suponiendo vida útil de 20 años, intereses del 6% anual e inflación del 5% anual.
(2) Sustitución de toda la capa a los 5 años más bacheo.

TABLA 4.2. COSTOS DURANTE LA VIDA UTIL DE DIFERENTES ALTERNATIVAS DE PAVIMENTACION.
FUENTE: LA TECNOLOGIA DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS. VOL 1, No. 5, OCTUBRE DE 1988.

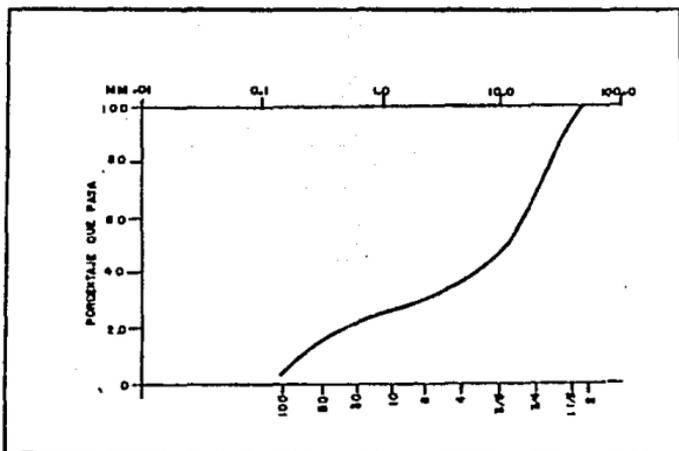


FIGURA 4.1. GRANULOMETRIA TIPICA PARA PRESAS C. C. R.
 FUENTE: LA TECNOLOGIA DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS
 REVISTA IMCYC. VOL. 1, No. 5, OCTUBRE 1968.

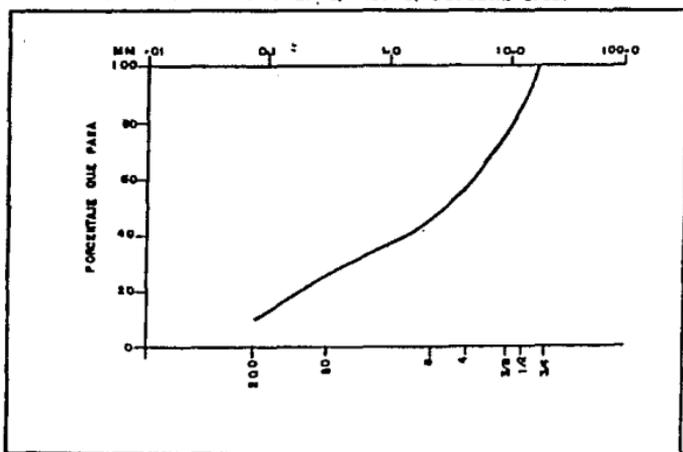


FIGURA 4.2. GRANULOMETRIA TIPICA PARA PAVIMENTOS DE C. C. R.
 FUENTE: LA TECNOLOGIA DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS
 REVISTA IMCYC. VOL. 1, No. 5, OCTUBRE 1968.

4.1. CARRETERA MEXICO CUERNAVACA.

4.1.1. DATOS GENERALES DEL PROYECTO.

El IMCYC (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto) es una de las Instituciones que actualmente se está dedicando al estudio del C.C.R. en México. Este Instituto presentó una propuesta a la Dirección de Proyectos de Carreteras de la Dirección General de Carreteras Federales de la S.C.T., para participar en el diseño y supervisión de la construcción del pavimento de los túneles de La Venta del camino México-Toluca, utilizando la técnica del C.C.R., desafortunadamente el tiempo para desarrollar el programa de pruebas de laboratorio fue muy corto y no se concluyó el proyecto de pavimento de C.C.R.; finalmente, el IMCYC expuso a la Dirección Técnica de Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos una alternativa para construir un tramo de pavimento de C.C.R. de 30 m. en el kilómetro 23.30 de la autopista México-Cuernavaca, esta propuesta fue aceptada y el primer tramo fue construido el 13 de julio de 1989.

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

4.1.2. MATERIALES EMPLEADOS.

Las gravas y las arenas que se utilizaron para elaborar el Concreto Compactado con Rodillos son de origen andesítico y provienen de la zona oriente de la Ciudad de México. El cemento que se utilizó en la producción de las mezclas de concreto fue cemento portland tipo I.

En la construcción del pavimento se utilizó una granulometría integral grava-arena en proporción 55-49, obteniéndose la distribución que se muestra en la figura 4.3.

La banda formada por el límite superior e inferior son dados con la práctica canadiense para Concreto Compactado con Rodillos aplicado a pavimentos. Los patrones franceses y españoles quedan comprendidos en dicha banda que sigue la misma tendencia en que se presenten cambios bruscos en su pendiente.

En la figura 4.4 se compara la granulometría del C.C.R. (sin incluir cemento), siguiendo la práctica canadiense con las zonas de especificaciones granulométricas de las normas de calidad de los materiales de la S.C.T. (4.01.03.009-C.00), se puede observar que el límite inferior del patrón canadiense queda comprendido en la zona I y el límite superior en la Zona II de las normas mencionadas.

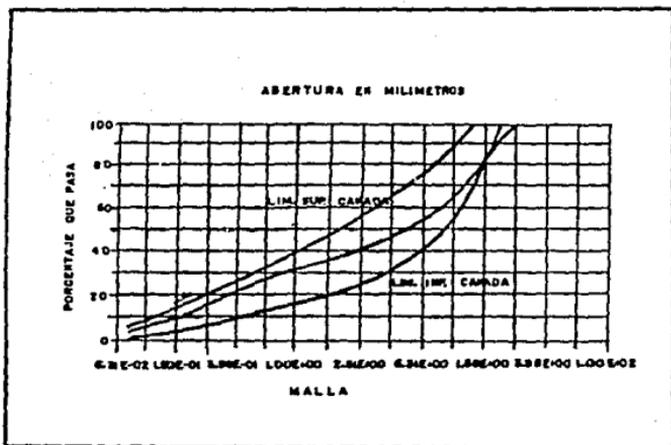


FIGURA 4.3. DISTRIBUCION GRANULOMETRICA. CARRETERA MEXICO-CUERNAVACA.
FUENTE: PAVIMENTOS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS. REVISTA IMCYC. VOL. 1, NO. 5, OCTUBRE 1988.

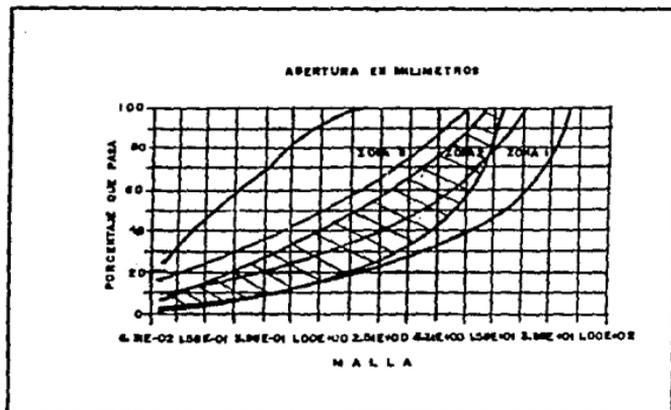


FIGURA 4.4. GRANULOMETRIA SEGUN PRACTICA CANADIENSE.
FUENTE: PAVIMENTOS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS. REVISTA IMCYC. VOL. 1, NO. 5, OCTUBRE 1988.

4.1.3. DISEÑO DEL ESPESOR DEL PAVIMENTO.

El pavimento de C.C.R. por lo regular se considera como un pavimento rígido, ya que gran parte de la capacidad estructural es proporcionada por la losa. Para el caso que se está estudiando el espesor del pavimento fue diseñado de acuerdo a los procedimientos tradicionales ya conocidos, en primer lugar se utilizó el Método de Fatiga y Erosión de la PCA, posteriormente se utilizó dicho espesor utilizando las Cartas de Pickett y Ray relacionados con el esfuerzo en el borde de la losa y las ecuaciones de Westergard, las cuales están relacionadas con los esfuerzos debidos a la carga en el borde.

La información relacionada con la frecuencia vehicular registrada en la estación maestra situada en Topilejo, así como el número de ejes sencillos y tandem, fue proporcionada por Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos. El tránsito diario anual de ambos carriles y la tasa de crecimiento observados de 1982 a 1985 fueron consultados en el Manual de Datos Viales 1980 de la Dirección General de Servicios Técnicos de la Subsecretaría de Infraestructura de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

El pavimento de C.C.R. está apoyado en una sub-base granular de 12 cm de espesor tratada con cemento; se consideró un VRS del 20% para la sub-basante obteniéndose así un módulo de reacción de 8.9 Kg/cm^2 . El módulo de ruptura fue de 40 Kg/cm^2 a 28 días, y se estima que la vida del pavimento será de 30 años. El espesor de pavimento de C.C.R. fue de 15 cm.

4.1.4. PROCESO CONSTRUCTIVO.

4.1.4.1. Producción.

Los agregados que se utilizaron en la producción del C.C.R. se almacenaron en dos compartimientos; uno para material cuyo tamaño fue de $3/4$ de pulgada (malla No. 4), y otro para tamaños que pasaron la malla No. 4. El cemento utilizado fue Portland Tipo I, el cual se almacenó en un silo. El agua que se utilizó fue limpia y libre de impurezas.

La planta de mezclado que se empleó en la producción del C.C.R. es del tipo ELBA, bacha trepadora; este equipo proporciona un mezclado energético. Ver figura 4.5. La dosificación de los materiales fue por peso y se tuvo una producción de 12 a $15 \text{ m}^3/\text{hr}$. El transporte de la mezcla se realizó en camiones de volteo de 8 m^3 de capacidad, la distancia entre la planta de mezclado y la obra fue de 11 Km.



**FIGURA 4.3. EQUIPO DE MEZCLADO PARA C.C.R.
FUENTE: PAVIMENTO DE CONCRETO COMPACTADO
CON RODILLO. REVISTA IMCYC. VOL. 1,
No. 5, OCTUBRE 1988.**

4.1.4.2. Colocación.

El tendido del C.C.R. se puede hacer mediante una pavimentadora (finisher) o una motoconformadora, pero de preferencia se recomienda utilizar el primer equipo. En este caso, dado que se trataba de un tramo de 30 m de longitud, no se justificó el uso de la pavimentadora ni la motoconformadora y la mezcla de C.C.R. se tendió a mano. Antes del tendido del C.C.R. se le dió un riego de agua a la sub-base.

El espesor del pavimento de C.C.R. fue de 15 cm compacto, para lo cual se consideró un porcentaje de abundamiento del 30%.

4.1.4.3. Compactación.

La compactación se inició con 2 pasadas de un compactador estático de 10 toneladas (métricas), posteriormente se dieron de 4 a 8 pasadas con un compactador DYNAPAC CA-25 vibratorio de 10 toneladas (métricas), ver figura 4.8; y finalmente, se dieron 2 pasadas con un equipo neumático de 7 toneladas (métricas).

Para perfilar y controlar la pendiente del pavimento se utilizaron niveles a cada lado de las guarniciones. En las zonas de difícil acceso se utilizó un compactador manual para alcanzar el peso volumétrico compacto de proyecto.



**FIGURA 4.6. EQUIPO VIBRATORIO
PARA COMPACTAR EL
PAVIMENTO DE C. C. R.**

**FUENTE: PAVIMENTO DE CONCRETO
COMPACTADO CON RODILLO.
REVISTA IMCYC. VOL. 1,
No. 5, OCTUBRE 1968.**

4.1.4.4. Curado.

El curado de la superficie del pavimento del C.C.R. se realizó con agua por un período de una semana, y no fue aplicado tratamiento adicional.

El camino fue abierto al tránsito después de 80 horas de haber sido construido. Un aspecto de textura de rodamiento se muestra en la figura 4.7.



FIGURA 4.7. TRAMO DE C. C. R. PUESTO EN OPERACION.
FUENTE: PAVIMENTO DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO.
REVISTA IMCYC. VOL. 1, No. 5, OCTUBRE 1968.

4.1.5. CONTROL DE CALIDAD.

4.1.5.1. Pruebas de Laboratorio.

Se elaboraron 10 mezclas de concreto, cuatro de ellas se compactaron utilizando la prueba Proctor Modificada y las otras seis empleando el Procedimiento Neumático. La energía específica que se proporcionó en cada espécimen fue la misma en los dos métodos: $E_e = 27.36 \text{ Kg cm/cm}^3$. El objetivo de realizar estas pruebas fue verificar si existe una relación entre los

resultados que se obtienen utilizando la Prueba Proctor Modificada y el Procedimiento Neumático, además de utilizar dicha información como base para el diseño del espesor del pavimento.

El proporcionamiento de las mezclas empleadas se muestra en la tabla 4.3. La relación de arena en los agregados fue de 35% del volumen absoluto. Los métodos de ensaye que se utilizaron siguen las Normas Oficiales Mexicanas (NOM). Las pruebas que se efectuaron a las mezclas de concreto fresco fueron: peso volumétrico húmedo, contenido de humedad, contenido de aire y prueba Vebe Modificada. A los especímenes de concreto endurecido se les practicaron las siguientes pruebas: resistencia a compresión simple, resistencia a tensión indirecta, módulo de ruptura y módulo de elasticidad a 7 y 28 días. Para cada edad se ensayaron dos especímenes.

No.	Proctor Modificada				Procedimiento Neumático					
	Mezcla No.				Mezcla No.					
	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6
1 Cemento, Kg/m ³	298	289	283	277	298	289	288	283	280	277
2 Arena, Kg/m ³	665	650	635	621	665	650	642	635	628	621
3 Grava, Kg/m ³ TMA 3/4 pulg.	1236	1207	1180	1153	1236	1207	1193	1180	1166	1153
4 Agua, Kg/m ³	93	114	134	153	93	114	124	134	143	153
5 Densidad, Kg/m ³	2290	2260	2232	2204	2290	2260	2245	2232	2217	2204
6 Agua/Densidad, %	4	5	6	7	4	5	5.5	6	6.5	7
7 Agua/Cemento	0.31	0.39	0.47	0.55	0.31	0.39	0.43	0.47	0.51	0.55

TABLA 4.3. PROPORCIONAMIENTO DE LA MEZCLA DE C.C.R.

FUENTE: PAVIMENTO DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS. REVISTA IMCYC VOL. 1, No. 5, OCTUBRE DE 1968.

4.1.5.2. Propiedades del C.C.R.

4.1.5.2.1. Propiedades del C.C.R. en estado fresco.

En la tabla 4.4 se presentan las propiedades de las mezclas de concreto empleando la Prueba Proctor Modificada y el Procedimiento Neumático. En la figura 4.8 se muestra el peso volumétrico seco contra el

contenido de humedad; de acuerdo a los resultados se observa que utilizando el Procedimiento Neumático se obtienen pesos volumétricos secos mayores, hasta de 2,220 Kg/m³, esto se debe posiblemente a que el material grueso se trituró por la energía de compactación del equipo utilizado.

El contenido de aire de las mezclas de concreto varió de 2.2% al 2.7%; en otros ensayos se ha observado hasta un 1.25%. La Prueba Vebe Modificada se efectuó inmediatamente después de elaborar la mezcla para obtener su consistencia; esta prueba se repitió nuevamente a los 25 min. El equipo utilizado para realizar dicha prueba fue el convencional, lo único que se modificó fue el sobre-peso de la placa de apoyo, el cual se incrementó de 3.41 Kg a 10.97 Kg. El ACI 211.3.B considera estas mezclas como extremadamente secas, ya que la consistencia varía de 18 a 32 segundos.

No.	Material	Proctor Modificada Mezcla No.				Procedimiento Neumático Mezcla No.					
		1	2	3	4	1	2	3	4	5	6
1	Peso volumétrico húmedo compacto Kg/m ³	2158	2258	2294	2317	2047	2230	2306	2398	2395	2383
2	Peso volumétrico seco compacto Kg/m ³	2065	2155	2152	2137	1938	2088	2203	2220	2209	2189
3	Contenido de humedad, %	4.5	5.3	6.6	8.4	5.6	6.8	7.4	8.0	8.5	8.9
4	Contenido de aire, %					N	2.7	N	2.2	2.5	2.3
5	Prueba Vebe modificada, seg.										
	inicial (t=0)					-	60	60	33	24	26
	final (t=25 min)					-	N	N	59	42	N
	N= No se efectuó la prueba										

TABLA 4.4. PROPIEDADES DEL C. C. R. EN ESTADO FRESCO.

FUENTE: PAVIMENTO DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS. REVISTA IMCYC VOL. 1, NO. 3, OCTUBRE 1988.

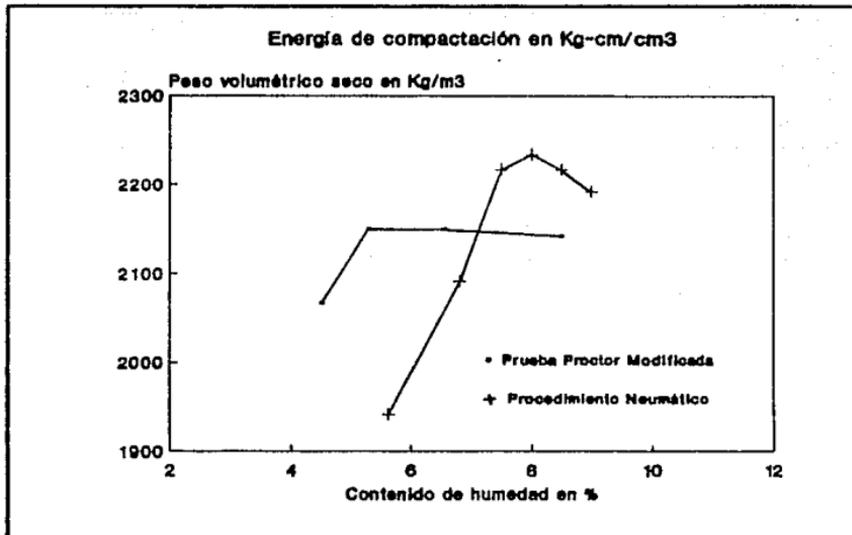


FIGURA 4.8. PESO VOLUMETRICO SECO CONTRA CONTENIDO DE HUMEDAD DEL C. C. R
FUENTE: PAVIMENTO DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO. REVISTA IMCYC.
VOL. 1, No. 5, OCTUBRE 1988.

4.1.5.2.2. Propiedades del C.C.R. en estado endurecido.

Las propiedades de los especímenes en estado endurecido a 7 y 28 días, de acuerdo a los dos procedimientos (Proctor Modificada y Neumático), se muestran en las tablas 4.5 y 4.6, respectivamente.

En la figura 4.9 se puede observar que las resistencias a compresión simple obtenidas con el Procedimiento Neumático a 7 y 28 días son mayores que las de la prueba Proctor Modificada. Además, el contenido de humedad del 8% para la resistencia máxima de 394 Kg/cm² a 28 días, obtenida con el Procedimiento Neumático, coincide con la humedad óptima del peso volumétrico seco máximo. Sin embargo, el contenido de humedad del 5.3% para la resistencia máxima de 350 Kg/cm² a 28 días obtenida con la prueba

PRUEBA PROCTOR MODIFICADA						
No.	Tipo de ensaye	Edad días	% de humedad			
			4	5	6	7
1	Compresión simple, Kg/cm ²	7	194	281	251	268
		28	211	350	281	303
2	Tensión indirecta, kg/cm ²	7	-	-	27.2	28.8
		28	-	-	28.9	32.4
3	$f_{fb}/f'c, \%$	7	-	-	10.9	10.7
		28	-	-	10.3	10.7

TABLA No. 4.3. PROPIEDADES DEL C. C. R. EN ESTADO ENDURECIDO. PROCTOR MODIFICADA.

FUENTE: PAVIMENTO DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS. REVISTA IMCYC VOL. 1, No. 5, OCTUBRE 1968.

PROCEDIMIENTO NEUMATICO								
No.	Tipo de ensaye	Edad días	4	5	5.5	6	6.5	7
1	Compresión simple, Kg/cm ²	7	40	182	266	304	297	310
		28	50	160	330	394	369(1)	329
2	Tensión indirecta, Kg/cm ²	7	5.5	20.2	-	27.0	-	25.6
		28	12.5	22.2	-	27.6	-	27.1
3	Módulo de ruptura, Kg/cm ²	7	-	40.0(2)	-	40.8	-	39.3
		28	-	36.0	-	39.8	-	41.2
4	Módulo de elasticidad, Kg/cm ²	7	15,603	88,602	88,738	107,889	103,343	98,450
		28	-	65,542	102,891	109,596	110,077	103,780
5	$E=K\sqrt{f'c}$ K=	7	2,487	6,394	5,441	6,168	5,997	5,592
		28	-	5,182	5,664	5,521	5,762	5,722
6	$f_{fb}/f'c, \%$	7	13.8	10.5	-	8.9	-	8.3
		28	20.8	13.9	-	7.0	-	8.2
7	MR/f'c, %	7	-	20.8	-	13.4	-	12.7
		28	-	22.5	-	10.1	-	12.5
8	$MR=C\sqrt{f'c}$ C=	7	-	2.89	-	2.34	-	2.23
		28	-	2.85	-	2.01	-	2.27

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

TABLA 4.6. PROPIEDADES DEL C. C. R. EN ESTADO ENDURECIDO. PROCEDIMIENTO NEUMATICO.

FUENTE: PAVIMENTO DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS. REVISTA IMCYC VOL. 1, No. 5, OCTUBRE 1968.

Proctor Modificada, es menor que la humedad óptima del peso volumétrico seco máximo que es del 6%. De acuerdo a los resultados de la prueba Proctor Modificada, el agua requerida para obtener la máxima resistencia es menor que la del peso volumétrico seco máximo. No hay que perder de vista que lo que nos interesa es obtener pesos volumétricos altos, ya que la resistencia inicial del pavimento está dada por la energía de compactación. De aquí que los diseños de las mezclas de C. C. R. estarán relacionados con el óptimo de humedad de la gráfica de peso volumétrico seco contra contenido de humedad (γ_d-w).

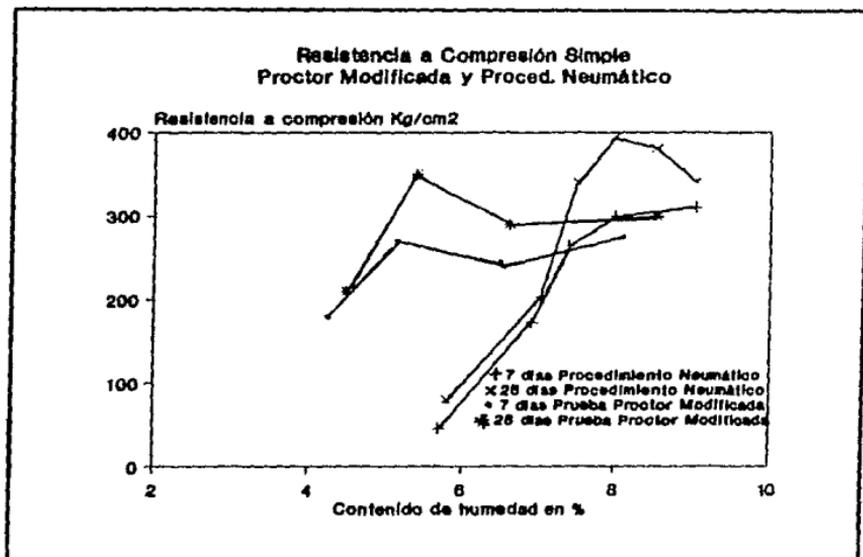


FIGURA 4.D. RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE. PROCTOR MODIFICADA Y PROCEDIMIENTO NEUMATICO.

FUENTE: PAVIMENTO DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO. REVISTA IMCYC. VOL. 1, No. 5, OCTUBRE 1988.

El esfuerzo de tensión debido a flexión (módulo de ruptura) se obtuvo ensayando vigas con carga en los tercios, y se encontró que dicho esfuerzo varió del 10 al 20% de la resistencia a la compresión

simple del concreto. Una prueba alternativa podría ser la tensión indirecta, en la cual el esfuerzo a tensión varió del 7 al 14% de la resistencia a compresión simple.

El módulo de elasticidad de las mezclas de C.C.R. para el contenido de humedad óptimo es de aproximadamente 110,000 Kg/cm² a 28 días. Este módulo es bajo comparado con los módulos de elasticidad obtenidos en concretos convencionales a base de agregados andesíticos.

4.1.5.3. Pruebas de campo.

Antes de construir el pavimento de C.C.R. se realizaron en campo seis mezclas de prueba de 300 lt cada una y se compactaron con un equipo vibratorio manual DYNAPAC PR-8. El objetivo fue verificar algunos puntos importantes como:

- Eficiencia del equipo de mezclado.
- Uniformidad de la mezcla de concreto y tiempo de mezclado.
- Rendimiento de la mezcla de concreto.
- Segregación del material durante el transporte.
- Pérdida de humedad por temperatura ambiental.
- Contenido de humedad del C.C.R. utilizando horno eléctrico y parrilla de gas.
- Espesores abundados y compactos.
- Número de pasadas del equipo para lograr el porcentaje de compactación deseado.

Las mezclas se diseñaron para contenidos de humedad del 5, 5.5 y 6%. El proporcionamiento para la mezcla del 6% fue 85 Kg de cemento, 155 Kg de arena, 389 Kg de agua y 41 lt de agua. La relación grava-arena fue de 1.86.

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

La compactación se realizó en tres etapas: en la primera se dieron 2 pasadas (una pasada se considera ida y vuelta) con rodillo estático para armar el cuerpo de la mezcla de C.C.R.; en la segunda etapa se dieron de 4 a 8 pasadas con rodillo vibratorio para el acomodo del material granular; y en la tercera se dieron dos pasadas con rodillo neumático para cerrar la textura de la superficie. Ver figura 4.10.

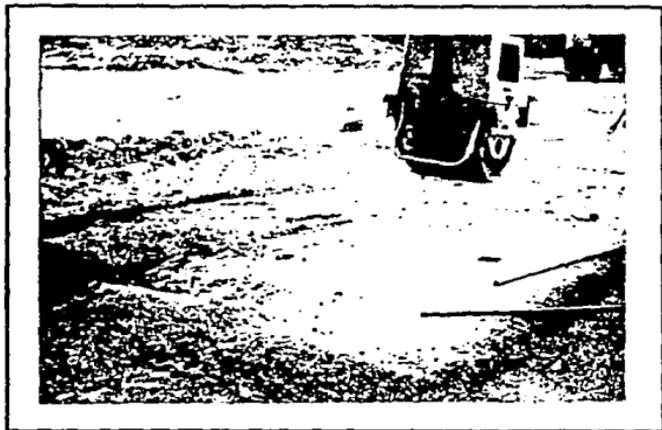


FIGURA 4.10. COMPACTACION DE MEZCLAS DE C.C.R. CON RODILLO MANUAL EN CAMPO.
FUENTE: PAVIMENTO DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO
REVISTA IMCYC. VOL. 1, No. 5, OCTUBRE 1988.

En la mezcla de C.C.R. no se utilizaron aditivos retardantes, ya que el tiempo de dosificación, mezclado, transporte y colocación estuvieron dentro del rango de una hora, tiempo especificado para que el concreto no pierda sus propiedades mecánicas.

De las mezclas compactadas se extrajeron 3 corazones de 2x4" (ver figura 4.11), y se ensayaron a compresión simple. Los resultados se presentan en la tabla 4.7.



FIGURA 4.11. EXTRACCION DE CORAZONES DE C.C.R. EN TRAMOS DE PRUEBA.

FUENTE: PAVIMENTO DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO REVISTA IMCYC. VOL. 1, No. 5, OCTUBRE 1988.

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

TABLA 4.7. RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE DE CORAZONES DE C.C.R.

FUENTE: PAVIMENTO DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO. REVISTA IMCYC VOL. 1, No. 5, OCTUBRE 1988.

4.1.6. COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO A LARGO PLAZO.

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

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

4.2. PAVIMENTACION DE DOS CARRILES EN EL ACCESO A UN PATIO DE UNA PREMEZCLADORA EN CIUDAD JUAREZ, CHIHUAHUA.

4.2.1. DESCRIPCION GENERAL DE LA OBRA.

El 10 de diciembre de 1988 se construyó un tramo de prueba de pavimentación de C.C.R. de 89 m² en una sección rectangular de 18 m por 3.8 m, con un espesor compacto de 12 cm sobre un terraplén de 20 cm de espesor compacto. La mezcla de C.C.R. tuvo una relación grava-arena de 40-60 y su contenido de cemento fue del 9% del peso total de la grava. La grava que se utilizó es de origen calizo triturada parcialmente con un tamaño máximo de 3/4", proveniente de una carbonífera ubicada en Ciudad Juárez y la arena proviene de un banco propiedad de COPRECHISA.

El 15 de diciembre de 1988 se compactó la subrasante 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 (se consideró 30% de abudamiento) y posteriormente se compactó con el rodillo vibratorio, quedando un espesor compacto de 15 cm. El material que constituye la sub-base se le conoce localmente como "caliche" con un tamaño máximo de 4 1/2", el cual proviene de la carbonífera de Ciudad Juárez. El peso volumétrico seco máximo (PVSM) del caliche es de 2,160 Kg/m³ con una humedad óptima del 7.3%. Se le dió un acabado a la sub-base con un compactador neumático Koehring PSR-C10 de 9 ruedas. Además, se verificó su pendiente longitudinal y transversal.

Finalmente, el 19 de diciembre de 1988 se pavimentaron dos carriles de 158 m² en una sección rectangular de 48 m por 3.3 m cada uno.

4.2.2. PROCESO CONSTRUCTIVO.

Los materiales se dosificaron por peso mediante una dosificadora MIPSAs. La mezcla de concreto fue elaborada en ollas revolventoras montadas sobre camión de 7 m³ de capacidad, los cuales inicialmente descargaron la mezcla directamente sobre una pavimentadora (finisher) BARBER GREENE 10-14 ft. Posteriormente se preparó una rampa con una pendiente ligera para descargar simultáneamente dos camiones revolventora a un camión de volteo de 6 m³ en un tiempo de 20 minutos y se transportó 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 tendido de la mezcla con dos pavimentadoras, una BARBER GREENE 10-14 ft montada sobre neumáticos y otra 8-12 ft montada sobre orugas. Esta última dañaba ligeramente la sub-base en los giros que realizaba, además de ser un equipo muy antiguo (1952), pero tuvo que utilizarse en el segundo carril ya que la otra pavimentadora presentó fallas mecánicas. El espesor de la capa tendida fue de 17 cm suelta, lo que implicó el 40% de abudamiento.

La compactación se realizó primero con un rodillo estático marca GALION roll-o-matic (tríciclo) en dos pasadas. Posteriormente se dieron 6 pasadas con rodillo vibratorio y finalmente se le dió acabado a la superficie con un compactador de neumáticos de la marca BROS RED SEAL (9 neumáticos) con cuatro pasadas.

Después se le dió un riego por aspersión, 1.5 horas de haber sido tendido el material, el curado se hizo con agua limpia durante dos días, la temperatura ambiental varió entre 10 y 15° C, con una velocidad del viento de 70-80 Km/hr.

4.2.3. CONTROL DE CALIDAD.

Se realizaron las siguientes pruebas para tener una calidad adecuada:

- Se elaboraron dos cilindros para la prueba Proctor Modificada de 15x30 cm en el lugar de la obra para ensayarse a los 28 días.
- Fueron realizados estudios granulométricos del material (grava-arena), así como las propiedades físicas de los agregados.
- Se obtuvieron los contenidos de humedad de las mezclas.
- Se obtuvo el peso volumétrico seco máximo de la subrasante y del pavimento de C.C.R. utilizando el volumen de arena.

4.2.4. PROBLEMAS EN CAMPO.

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

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

2.- Se tuvo la descompostura de la pavimentadora y se detuvo el tren de construcción más de 24 horas. Es recomendable prever las fallas en el equipo que se utilizará y considerar su repercusión económica, ya que puede ser factible el tener una máquina extra sobre todo en la etapa de construcción.

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

Se debe analizar y estudiar correctamente el equipo a emplear en determinado proyecto, sobre todo si se tiene un gran volumen.

4.3. EL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS EN ESPAÑA.

4.3.1. INTRODUCCION.

La red carretera española actualmente cuenta con 315.000 Km, de los cuales 23.000 Km de la red estatal que se encuentra bajo la administración del Gobierno Central y la diferencia de los Gobiernos Autónomos y Diputaciones Provinciales. La longitud de autopistas es ligeramente mayor a 2.300 Km, de la cual 350 Km está formada por pavimentos de concreto hidráulico.

Uno de los objetivos del plan carretero gubernamental para el ciclo 1984-1991, es convertir 3.250 km de la red troncal principal en autovías y vías de doble calzada de accesos controlados. La autovía es una especie de autopista con control de accesos y libre de peaje. Además, existe un "Plan Puente", dentro del Programa de Desarrollo Regional de la Comunidad Económica Europea (CEE), para construir 1.000 Km adicionales en el período 1992-1993, dicho plan, servirá de enlace con un proyecto a más largo plazo, denominado "Segundo Plan", el cual se prolongará hasta 1999. Hay que tomar en cuenta que, a pesar de las obras realizadas en los últimos años, la red viaria española es aún muy deficiente (ver tabla 4.8). Por otra parte, la red de carreteras existente requiere de obras de conservación y mejora.

RED ESPAÑOLA DE VIAS DE DOBLE CALZADA	
	Longitud (Km)
Autopistas anteriores a 1984 (peaje+libres)	1.820
Autovías y vías de doble calzada	480
Plan de carreteras 1984-91	3.250
"Plan Puente" 1992-93	1.000

TABLA 4.8. RED ESPAÑOLA DE VIAS DE DOBLE CALZADA.

FUENTE: CARRETERAS DE C. C. R. LA MEJOR SOLUCION. REVISTA IMCYC
VOL. 2, No. 17, OCTUBRE 1989.

4.3.2. DESARROLLO DE LOS PAVIMENTOS DE C.C.R. EN ESPAÑA.

Las primeras aplicaciones del C.C.R. tuvieron lugar alrededor de 1970 en la provincia de Barcelona. Se trata de pavimentos sujetos a tránsitos ligeros ubicados en caminos rurales y zonas urbanas, ver figuras 4.12 y 4.13.



FIGURA 4.12. PAVIMENTO DE C. C. R. EN CAMINOS RURALES.

FUENTE: CARRETERAS DE C. C. R., LA MEJOR SOLUCION. REVISTA INCYC. VOL. 2, No. 17, OCTUBRE 1990.



FIGURA 4.13. PAVIMENTO DE C. C. R. EN ZONAS URBANAS.

FUENTE: CARRETERAS DE C. C. R., LA MEJOR SOLUCION. REVISTA INCYC. VOL. 2, No. 17, OCTUBRE 1990.

Esta técnica ha sido desarrollada por algunos contratistas en forma autodidacta, las obras fueron realizadas sin estudios previos de laboratorio y sin suficientes controles durante su ejecución para determinar las densidades y las resistencias, el comportamiento de las mismas permite afirmar que a través de la práctica se ha puesto a punto una tecnología totalmente adecuada a las vías en las que se ha utilizado, la superficie pavimentada con C.C.R. rebasa los 4 millones de metros cuadrados. La figura 4.14 muestra un detalle de la textura de una calle urbana de C.C.R.

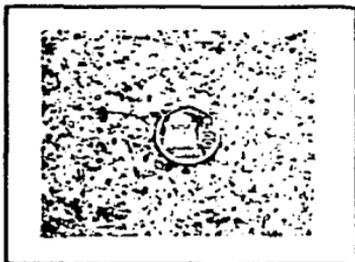


FIGURA 4.14. MUESTRA DE UN DETALLE DE LA TEXTURA DEL C.C.R. EN UNA CALLE URBANA.

FUENTE: CARRETERAS DE C.C.R., LA MEJOR SOLUCION. REVISTA INCYC. VOL. 2. No. 17, OCTUBRE 1989.

Otra de las aplicaciones que ha tenido el C.C.R. lo constituye la pavimentación de carreteras para tránsito medio y pesado, la primera experiencia que se tuvo fue la pavimentación del túnel Cadí en la provincia de Barcelona en septiembre de 1984. Posteriormente se ha empleado esta técnica en la construcción de nuevas vías o en la rehabilitación y refuerzos de obras existentes. Puede estimarse que se han construido hasta el momento con este material más de 600.000 m³ de carreteras principales.

4.3.3. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO.

4.3.3.1. Espesores y Resistencias.

El diseño de los pavimentos de Concreto Compactado con Rodillos se ha realizado con las técnicas que se utilizan en los pavimentos de concreto hidráulico convencional, siempre y cuando no se considere una capa de rodamiento en la superficie supuesta del C.C.R.

Estas hipótesis pueden considerarse válidas ya que ambos materiales tienen propiedades mecánicas similares. Sin embargo, cuando se requiere asegurar una superficie de rodamiento de mayor calidad, se puede emplear una carpeta de concreto asfáltico por lo que, una reducción del espesor del C.C.R. puede considerarse válida; esto se justifica al emplear modelos de sistemas multicapa basados en la teoría elástica. Este enfoque ha sido utilizado por las Normas Oficiales Españolas, las cuales a partir de 1989 consideran las secciones estructurales que se muestran en la tabla 4.9.

NIVEL DE TRANSITO		T0		T1		T2	T3	T4	
		ALTERNATIVA I	ALTERNATIVA II						
E3	CARRIL DE DISEÑO								
	ACOTAMIENTO								

Autometros en centímetros



CONCRETO ASFÁLTICO



CONCRETO HIDRAULICO CONVENCIONAL



CONCRETO COMPACTADO CON NODULOS



BASE GRAVILAR TRATADA CON CEMENTO



SUB-BASE SUELO CEMENTO $f'_{c} = 28 \text{ kg/cm}^2$ a 28 días
 30 kg/cm^2 a 90 días

$M_i = 48 \text{ kg/cm}^2$ a 28 días

$M_i = 32 \text{ kg/cm}^2$ a 28 días
 $M_i = 46-55 \text{ kg/cm}^2$ a 28 días

T0: TRANSITO > 2000 VEHICULOS PESADOS/DIA

T1: 800 < TRANSITO < 2000 VEHICULOS PESADOS/DIA

T2: 200 < TRANSITO < 800 VEHICULOS PESADOS/DIA

T3: 50 < TRANSITO < 200 VEHICULOS PESADOS/DIA

T4: TRANSITO < 50 VEHICULOS PESADOS/DIA

E3: VES > 20

Es importante señalar que la carga legal en España es de 13 toneladas para el eje simple y de 21 toneladas para el eje tandem, sin embargo, estudios realizados han demostrado que existen sobrecargas medias, por lo que las cargas de los ejes llegan a ser hasta de 15.1 toneladas y 24.8 toneladas respectivamente, aunado a las condiciones climatológicas extremas que existen en gran parte del País. Esto ha originado que muchas de las técnicas que se han desarrollado en otros países deben ser modificadas considerablemente antes de ser empleadas en un país determinado.

Por otra parte, España es uno de los primeros países que cuenta con el "Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, Hormigón Compactado" del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo de España, noviembre de 1987, en las cuales podemos encontrar como desarrollar las dosificaciones para C.C.R., los ensayos previos a la dosificación, el equipo para la construcción y las tolerancias y controles que se deben efectuar.

4.3.3.2. Juntas Transversales, Longitudinales y de Construcción.

Las Normas Oficiales consideran juntas transversales a cada 7 m con un esviajamiento 1:6 de la misma manera que en los pavimentos de concreto convencional. Por otra parte, las normas no estipulan juntas longitudinales en el pavimento.

En trabajos realizados, donde se ha dado un tratamiento a la superficie de rodamiento, se ha dejado que las juntas transversales se formen aleatoriamente. Sin embargo, se ha dispuesto aserrar dichas juntas y darles un tratamiento, para evitar el problema de agrietamiento.

En algunos tramos de carretera que se habían construido anteriormente se planeó aserrar las juntas a cada 15 m, pero debido a los niveles de humedad relativa bajos y a las temperaturas ocasionalmente por arriba de los 40 grados centígrados, fue necesario reducir la distancia a cada 10 m. Cabe mencionar que el patrón de agrietamiento varía de 10 a 25 m, pero como se mencionó, las condiciones climatológicas tienen una gran influencia en estas variaciones. Se ha observado que el tiempo para aserrar las juntas está comprendido dentro de las 8 horas de haber tendido el C.C.R. Para tránsito ligero y volúmenes pequeños, las juntas se han aserrado únicamente con fines estéticos.

Las juntas de construcción se construyen cuando se presenta el fin de la jornada, aunque también puede ser que por condiciones climatológicas o por descompostura de algún equipo del tren de construcción tengan que suspenderse las actividades. El procedimiento a seguir es efectuar un corte

a 90 grados a todo lo ancho del pavimento y tener una rampa de arena o material suelto para que el equipo pueda subir al área de trabajo cuando se inician las actividades. Posteriormente el material producto del corte y el material suelto se retiran para continuar el procedimiento de tendido.

4.3.3.3. Textura y Superficie de Acabado.

Para obtener una superficie de rodamiento resistente al patinaje, se ha previsto una carpeta de concreto asfáltico cuyo espesor puede variar de 4 a 10 cm. Además dicha capa absorberá las pequeñas depresiones que pudieran dejar los rodillos vibratorios durante el proceso de compactación.

En caminos con volumen de tránsito pequeño se ha optado por dejar la superficie del pavimento de C.C.R. libre, en algunos casos para ofrecer una textura adecuada se le da un acabado con una allanadora mecánica. Las velocidades recomendadas en estas condiciones son de hasta 40 Km /hr.

4.3.4. MATERIALES.

4.3.4.1. Agregados.

Para evitar la segregación y obtener una mejor calidad de la superficie se utilizan agregados triturados con tamaños máximos de 20 mm (3/4") o 16 mm (5/8"), los rangos para cada tamaño se presentan en la tabla 4.10.

TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO EN mm	% QUE PASA	
	16	20
No. Malla		
1"	-	100
3/4"	100	85-100
5/8"	88-100	75-100
3/8"	70-87	60-83
No. 4	50-70	42-83
No. 10	35-50	30-47
No. 40	18-30	16-27
No. 200	10-20	9-19

TABLA 4.10. GRANULOMETRIA TIPICA PARA PAVIMENTOS DE C. C. R.

FUENTE: CARRETERAS DE C. C. R. LA MEJOR SOLUCION.
REVISTA INCYC, VOL. 2, NO. 17, OCTUBRE 1969.

Cabe mencionar que la granulometría incluye el cemento con la finalidad de limitar el contenido de finos que pasa la malla 200, a los límites que se fijan en la tabla anterior.

Los agregados que se emplean son de origen calizo o silíceo y se pueden administrar en tres, dos o un tamaño, dependiendo de su clasificación. Se recomienda que del material utilizado en la dosificación cuando menos las 2/3 partes sean producto de la trituración de rocas.

4.3.4.2. Aglutinante.

El contenido de cemento de la mezcla de C.C.R. fluctúa de 280 a 330 kg/m³, que representa del 11.5% al 14.5% del peso seco de los agregados. En España el cemento que se ha utilizado en la mezcla contiene un alto contenido de adiciones activas, se ha observado que las resistencias que se logran son mayores que las mezclas con una proporción menor de adiciones.

Algunas ventajas que se obtienen al utilizar las adiciones y que son atractivas en la pavimentación con C.C.R. son: bajo calor de hidratación, disminución del agrietamiento debido a contracciones, notable retraso en el proceso de fraguado y un comportamiento adecuado en la reología 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 el 45% en peso de los materiales secos, el cual está constituido de un 50% de adiciones activas. El tipo de adición activa más común en el mercado español es la ceniza volante de tipo sílico-aluminoso.

4.3.4.3. Contenido de Humedad y Energía de Compactación.

El contenido de humedad de la mezcla varía de 105 a 130 lt/m³ que representa de un 4.5% a un 5.5% del peso de los agregados secos. Para elaborar los especímenes de C.C.R. se ha empleado la energía específica de la Prueba Proctor Modificada y el Martillo Kango (vibratorio), sin embargo, en España 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 de campo, pues el material se tritura alterando su granulometría original.

4.3.4.4. Aditivos.

El tipo de aditivo que se ha utilizado es un retardante, que incrementa el tiempo de trabajabilidad de la mezcla, logrando que las operaciones de compactación puedan efectuarse adecuadamente. La cantidad de retardante varía de 0.5 a 1.0% del peso de cemento. En realidad este porcentaje tendrá que ser medido en la obra para evaluar su correcta dosificación.

4.3.5. CONSTRUCCION DE LA AUTOVIA SEVILLA-GRANADA-BAZA.

A continuación se examinará brevemente el proceso constructivo de algunos tramos de carretera en la provincia de Granada ubicada en el Sur de la Península Ibérica.

4.3.5.1. Mezclado.

El mezclado se efectuó en una planta continua con capacidad de 300 ton/hr. En la figura 4.15 se muestra un modelo del mezclador que debe ser utilizado en este tipo de mezclas secas. La marca de este es Lebrero-Zaragoza con ordenadora Ramses de fabricación española. en la figura 4.16, se puede apreciar el equipo puesto en operación, el mezclado se realizó en forma energética para lograr uniformidad en la producción del concreto fresco, la dosificación del agua se efectuó por medio de "flautas".



FIGURA 4.15. MODELO DE MEZCLADO PARA MEZCLAS DE C. C. R.

FUENTE: CARRETERAS DE C. C. R., LA MEJOR SOLUCION. REVISTA INCYC. VOL. 2, No. 17, OCTUBRE 1989.



FIGURA 4.16. DOSIFICACION DEL AGUA Y MEZCLADO.

FUENTE: CARRETERAS DE C. C. R., LA MEJOR SOLUCION. REVISTA IMCYC. VOL. 2, No. 17, OCTUBRE 1989.

El cemento y la ceniza se dosifican por peso y los agregados pueden dosificarse por volumen. Estos equipos además de producir mezclas de concreto extremadamente secas, pueden elaborar mezclas de suelo-cemento y gravas tratadas con cemento.

4.3.5.2. Transporte.

La mezcla de concreto se transportó en camiones de 15 m³ de capacidad "bañeras" al lugar de la obra, ver figura 4.17.

4.3.5.3. Extendido y Compactación.

La estructura del pavimento está constituida por una sub-base de suelo-cemento de 20 cm de espesor compacto, una base de C.C.R. de 22 cm y una carpeta de concreto asfáltico de 8 cm de espesor.

En la figura 4.18 se puede apreciar el tendido de un geotextil anticontaminante/drenante entre la capa de sub-rasante y sub-base. La figura 4.19, muestra la capa de la sub-base estabilizada con cemento al 6% en peso de los materiales secos. También se puede observar el control del espesor mediante un dispositivo electrónico "palpador" y un hilo previamente nivelado, después de avanzar un tramo determinado la pavimentadora regresa e inicia el carril contiguo con el objeto de evitar la junta longitudinal.

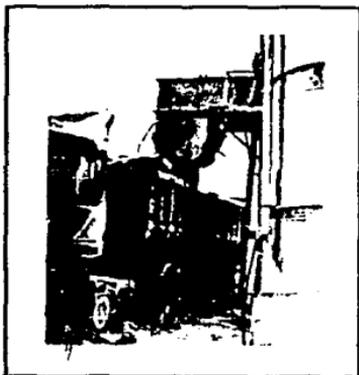


FIGURA 4.17. UNIDADES DE TRANSPORTE DE ALTA CAPACIDAD.

FUENTE: CARRETERAS DE C. C. R., LA MEJOR SOLUCION, REVISTA IMCYG, VOL. 2, No. 17, OCTUBRE 1989.



FIGURA 4.18. TENDIDO DEL ANTICONTAMINANTE DRENANTE.
FUENTE: CARRETERAS DE C. C. R., LA MEJOR SOLUCION, REVISTA IMCYG, VOL. 2, No. 17, OCTUBRE 1989.



FIGURA 4.19. SUB-BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO.
FUENTE: CARRETERAS DE C.C.R., LA MEJOR SOLUCION.
REVISTA IMCYC. VOL. 2, No. 17, OCTUBRE
1969.

En la figura 4.20 se aprecia la compactación de la capa suelo-cemento, generalmente se deja un bordillo de unos 50 cm sin compactar, los cuales sirven de contención y de amarre cuando se compacta el carril adyacente.

El mismo equipo que se utiliza para tender y compactar el suelo-cemento se emplea en la capa de C.C.R. Por ejemplo el rodillo vibratorio debe tener un peso no menor de 30 Kg/cm del ancho del rodillo y el número de pasadas puede variar de 4 a 8.

Para cerrar la textura de la superficie se utiliza un compactador de neumáticos con un peso de 3 ton por cada neumático y una presión de inflado no menor a 8 Kg/cm² (115 lb/pulg²), el número de pasadas, al igual que en el punto anterior, puede llegar a 8. Para verificar la densidad de cada capa se utiliza un densímetro nuclear que cuenta con una fuente de Cs-137 (rayos gama), para tal objetivo y en el caso de medir la humedad una fuente de AM-241: berilio (Neutrones).

En la figura 4.21, se puede observar un densímetro nuclear de la marca Troxler. Con la ayuda de estos equipos la densidad y el contenido de humedad se pueden obtener en un tiempo muy breve, comparándolo con el de los métodos tradicionales como son el del volúmetro de membrana y el de la arena.



FIGURA 4.20. BORDO DE CONSTRUCCION Y AMARRE.

FUENTE: CARRETERAS DE C. C. R., LA MEJOR SOLUCION. REVISTA IMCYC. VOL. 2, No. 17, OCTUBRE 1989.



FIGURA 4.21. DENSIMETRO NUCLEAR.

FUENTE: CARRETERAS DE C. C. R., LA MEJOR SOLUCION. REVISTA IMCYC. VOL. 2, No. 17, OCTUBRE 1989.

En la figura 4.22. se puede apreciar la estructura del pavimento de C.C.R. terminada, así como la junta de construcción.



**FIGURA 4.22. PAVIMENTO DE C. C. R.
TERMINADO.**

**FUENTE: CARRETERAS DE C. C. R., LA
MEJOR SOLUCION. REVISTA IMCYC.
VOL. 2, NO. 17, OCTUBRE 1969.**

4.3.5.4. Juntas.

La figura 4.23 muestra el aserrado de juntas transversales a cada 7 m y en las figuras 4.24 y 4.25, se puede observar el tratamiento de las juntas con una banda de 10 cm de ancho de productos asfálticos para evitar que la grieta aserrada se refleje en la carpeta.



**FIGURA 4.25. ASERRADO DE JUNTAS
TRANSVERSALES.**

**FUENTE: CARRETERAS DE C. C. R., LA
MEJOR SOLUCION. REVISTA IMCYC.
VOL. 2, NO. 17, OCTUBRE 1969.**

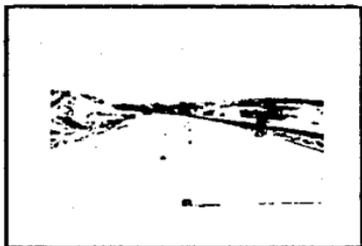


FIGURA 4.24. TRATAMIENTO DE JUNTAS.
FUENTE: CARRETERAS DE C. C. R., LA MEJOR SOLUCION. REVISTA IMCYC. VOL. 2, No. 17, OCTUBRE 1980.



FIGURA 4.25. TRATAMIENTOS DE JUNTAS.
FUENTE: CARRETERAS DE C. C. R., LA MEJOR SOLUCION. REVISTA IMCYC. VOL. 2, No. 17, OCTUBRE 1980.

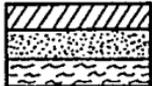
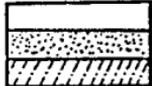
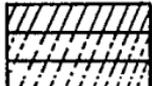
En la figura 4.26, se muestra un tramo de la autopista Sevilla-Granada ya puesto en operación al público.



FIGURA 4.26. AUTOVIA SEVILLA-GRANADA EN OPERACION.
FUENTE: CARRETERAS DE C.C.R., LA MEJOR SOLUCION,
REVISTA IMCYG, VOL. 2, No. 17, OCTUBRE 1969.

4.3.6. COSTOS.

En la tabla 4.11, se presentan los costos comparativos de algunas secciones de pavimento para la autovía empleando diferentes estructuras. El costo considera un kilómetro de pavimento con dos carriles de 3.5 m cada uno, un acotamiento interior de 1 m y otro exterior de 2.5 m. En todos los casos se considera el mismo nivel de tránsito.

SUPERFICIE TÍPICA	↓ COSTO/Km	%
 8 C.A. 22 C.C.R. 20 S.C.	21,061,200	1,000
 25 C.A. 20 S.C.	22,733,870	1,036
 18 C.A. 22 S.C. 20 S.C.	23,070,480	1,051
 25 C.C. 18 S.C. 20 S.N.	23,363,180	1,064
 25 C.A. 25 S.A. 25 S.N.	24,016,620	1,117

* PESETAS ESPAÑOLAS

Asociación de carreteras

RENOMBRATURA:

- C.A. CONCRETO ASFÁLTICO
- S.A. SUB-BASE ARTIFICIAL
- S.N. SUB-BASE NATURAL
- C.C. CONCRETO HIDRAULICO CONVENCIONAL
- S.C. GRAVA CEMENTO
- S.C. SUELO CEMENTO
- C.C.R. CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS

TABLA 4.11. COSTOS COMPARATIVOS DE SECCIONES ESTRUCTURALES DE PAVIMENTO.
 FUENTE: CARRETERAS DE C. C. R. LA MEJOR SOLUCION. REVISTA IMCYC.
 VOL. 2, NO. 17, OCTUBRE 1980.

CAPITULO 5

DIVERSAS APLICACIONES DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS

5.1. PATIO DE SELECCION DE TRONCOS EN CAYCUSE COLUMBIA BRITANICA

Aunque Estados Unidos estaba progresando en los años setentas con las presas de C.C.R., sólo una pequeña sección de pavimento de prueba de C.C.R. (3.85 x 32 m) fue instalada en la estación experimental de Vías Fluviales del Ejército de E.U.A. en Mississippi en 1975. Sin embargo, algunos ingenieros y contratistas de Columbia Británica, Canadá, estaban obteniendo excelentes resultados empleando pavimento de C.C.R. como base con una delgada superficie de desgaste de concreto asfáltico, para construir pavimentos de uso pesado en áreas de estacionamiento de muelles de carga. El material demostró ser particularmente apropiado para patios de contenedores, de remolques, por lo que se decidió ensayar el C.C.R. como base y superficie de rodamiento combinados y como pavimento total.

Esto condujo a la construcción, en 1978, de todo un pavimento para un patio de selección de troncos de árbol en Caycuse, en la parte central de la isla de Vancouver, en Columbia Británica. La industria de productos forestales se enfrentaba entonces a rígidos reglamentos ambientales, que no hacían práctico continuar con el método común de seleccionar y conservar los troncos en el agua a lo largo de las zonas boscosas. Pero los grandes patios de selección en seco de inmediato se convertirían en grandes lodazales a no ser de que estuvieran revestidos. Puesto que el asfalto no era práctico en muchos lugares aislados, la decisión fue probar con el Concreto Compactado con Rodillos.

El patio de selección de troncos en Caycuse, construido en el otoño de 1978, comprendía 182 hectáreas de pavimento de C.C.R. de 35 cm de espesor, colocado en una maniobra de dos capas sobre una capa de roca triturada de 15 cm. En 1979 se le agregaron dos hectáreas más. Se empleó grava en bruto de la localidad con tamaño máximo de 3/4 de pulgada. La capa inferior de 20 cm tenía un contenido de cemento de 8% y la capa superior de 15 cm, fue elaborada con un contenido de cemento de 12%.

El equipo y los procedimientos de construcción en Caycuse fueron similares a los utilizados en obras posteriores. Cerca del sitio de la construcción se erigió una planta de mezclado continuo, fácilmente transportable. El mezclado se efectuó en una mezcladora de doble gusano. El agregado se alimentó a la mezcladora mediante una banda transportadora con controles volumétricos (rejillas) sobre la banda. El cemento se alimentó de un silo, hacia la cinta de agregado de la banda, mediante un alimentador de paletas. El agua fue medida y se alimentó a la mezcladora mediante una barra de aspersión. Una segunda banda transportadora recogía el C.C.R. mezclado desde el lugar de descarga de la mezcladora y lo elevaba hasta el punto de carga de los camiones. Una tolva de transferencia de reja pequeña, situada en el extremo de la banda, reducía la segregación en el punto de descarga de la banda y permitía que los camiones cargaran sin tener que detenerse la planta.

Los camiones transportaban el Concreto hasta el sitio de la obra y descargaban dentro de la tolva de una pavimentadora convencional de asfalto de autopropulsión. La pavimentadora esparcía el C.C.R. en un colado uniforme de acuerdo con la línea e inclinación requeridas, con una superficie "acabada" lista para ser compactada mediante pesados rodillos vibratorios de ruedas de acero. Por lo general después de los rodillos vibratorios seguían rodillos de llantas de goma y luego con una última pasada de rodillos no vibratorios de ruedas de acero. Se proporcionaba una reducida compactación mediante las llanas vibratorias de la pavimentadora. La pavimentadora podía operarse electrónicamente desde un patrón, que funcionaba en el carril adyacente pavimentado. Era más común la utilización de controles manuales.

Cada carril de pavimento fue colado inmediatamente adyacente al carril anterior; la junta longitudinal de construcción se formó dejando una franja de 30 a 45 cm sin compactar con rodillos en el borde del carril precedente y rodillándola después de colar el siguiente carril junto al anterior. Cuando la operación tenía que suspenderse durante la noche, el borde del último carril se recortaba con una motoniveladora, hasta dejar una cara vertical, el nuevo carril se empalmaba con esta cara al día siguiente. No se formaban juntas transversales, simplemente se dejaba que el pavimento se agrietara al ocurrir la contracción.

Cuando se inspeccionaron estos pavimentos en diciembre de 1983 y de nuevo un año después, se encontraron en excelente estado, a pesar de las severas condiciones de servicio. Los mayores apladores de troncos aplican cargas hasta de 109 toneladas sobre ejes de dos ruedas, y los camiones que transportan los troncos tienen un peso bruto de 120 toneladas. Además el pavimento es sometido a intensa abrasión cuando los troncos son empujados sobre la superficie. Casi no se encontraron problemas estructurales y la superficie estaba en condición excelente. Se observaron pocas juntas longitudinales de construcción abiertas, muchas de las grietas transversales eran estrechas; la mayoría eran de 1.5 a 3 mm de ancho y muy pocas de 9 mm. No se había tratado de sellar las grietas o hacer algún trabajo en ellas y no se apreciaban señales de desmoronamiento o descascaramiento; las grietas no estaban causando problema alguno.

5.2. CAMINO DE PRUEBA CONSTRUIDO EN FORT LEWIS, WA

El interés por los pavimentos de C.C.R. realmente esta en auge en el área noroeste de la costa del Pacífico, debido en gran parte a la información que llega de Columbia Británica. El Distrito de Seattle del Cuerpo de Ingenieros, construyó el primer pavimento de C.C.R. en esta área en octubre de 1984. Durante la construcción de este camino de prueba en Fort Lewis, Washington, muchos visitantes llegaron de regiones circunvecinas, para observar los trabajos; a partir de entonces se produjo en el campo comercial un gran interés por los pavimentos de C.C.R.

El camino de prueba de Fort Lewis era de 7 m de ancho, 213 m de largo y 21 cm de espesor. Fue construido en una parte de un camino de grava muy transitado, del cual se removieron 21 cm de recubrimiento y base, para que el acabado del C.C.R. concordara con el de la superficie original. Durante esta construcción se ensayaron diversas variables para poder comparar su eficacia. El camino se construyó en dos carriles en dos días distintos, a fin de que hubiera juntas de colado no continuas, tanto longitudinal como transversalmente. Se utilizaron dos mezclas diferentes (ver tabla 5.1). La mezcla A, empleada en alrededor de dos tercios del camino de prueba, incluía cemento portland, ceniza volante y grava natural. La mezcla B, utilizada en la parte restante, solo tenía cemento portland y agregado triturado con tamaño máximo de 5/8 de pulgada, agregado de concreto asfáltico utilizado por el Departamento de Transporte de Washington, cuyo 7 a 10% pasa a través de la malla No. 200.

MEZCLAS DE C. C. R. POR METRO CUBICO		
MATERIAL/PROPIEDADES	MEZCLA A	MEZCLA B
CEMENTO PORTLAND	207 Kg	308 Kg
CENIZA VOLANTE	108 Kg	-----
AGREGADO GRUESO	1147 Kg DE GRAVA DE 3/4 DE PULGADA	2075 Kg DE GRAVA TRI- TURADA DE 3/8 PULG.
ARENA	929 Kg	-----
AGUA	100.3 lt	121.1 lt
RESISTENCIA A LA FLEXION A 28 DIAS	42 Kg/cm ²	56 Kg/cm ²
RESISTENCIA A LA FLEXION A 90 DIAS	49 Kg/cm ²	62 Kg/cm ²

TABLA 5.1. MEZCLAS DE C. C. R. PARA EL CAMINO DE PRUEBA EN FORT LEWIS, POR METRO CUBICO.

FUENTE: PAVIMENTOS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS. REVISTA IMCYC. VOL. 24, No. 189, FEBRERO 1987.

Los equipos de dosificación (alimentación) y de mezclado fueron esencialmente los mismos que se emplearon en Columbia Británica; pero fueron necesarios dos suministros para la mezcla A, porque tenía agregado grueso y fino. Las prácticas de transportación, pavimentación y rodillado también fueron similares a las utilizadas en Columbia Británica. El número de pasadas con los rodillos de ruedas se modificó para estudiar su efecto. La opinión general fue de que dos pasadas ayudaron a apretar la superficie, pero que una cantidad mayor tendía a degradarla. La mezcla de grava de 3/4 de pulgada (mezcla A) se coló y se le dió un buen acabado, aunque fue aún más fácil el manejo y acabado de la mezcla con agregado de asfalto triturado de 5/8 de pulgada.

Ambas mezclas produjeron superficies consistentes de C.C.R. a una tolerancia promedio de 0.95 cm, cuando se midieron transversalmente con una aplanadora con escantillón de 3 m. Se formaron grietas transversales espaciadas de 50 a 80 pies (15 A 25 m). Las pruebas de resistencia temprana sobre franjas extraídas del pavimento mostraron que la mezcla B (sin ceniza volante) era de 30 a 40% más resistente que la mezcla A. (ver tabla S.1).

5.3. PUERTO DE TACOMA.

A principios de la primavera de 1985, en el puerto de Tacoma en Washington, se comenzó la construcción de la primera de tres áreas de carga a lo largo de las vías férreas en los muelles del puerto, teniendo cada una de 29,283 a 41,805 m² de pavimento de C.C.R. de 30 a 40 cm de espesor. Estas áreas pavimentadas se diseñaron para almacenamiento de grandes contenedores de carga, y para la operación de grúas con carga de eje de 93 toneladas, para el manejo de los contenedores de carga.

La mezcla de C.C.R. fue diseñada con 204 Kg de cemento portland, 45 Kg de ceniza volante y agregado triturado de 5/8 de pulgada. En la primera área, el precio más bajo cotizado fue de 1'784.000 dólares para el C.C.R., en comparación con los 2'275,000 cotizados para concreto convencional de cemento portland.

Los dos primeros proyectos de C.C.R. en los muelles de Tacoma fueron construidos con equipo similar al ya descrito anteriormente, pero en el tercer proyecto se utilizó una pavimentadora Alemana, nueva en Estados Unidos. La máquina es similar a las pavimentadoras Estadounidenses, pero funciona para trabajo más pesado y es capaz de colar una área de 30 cm de espesor de C.C.R. ya compactado. Estaba equipada con dos llanas apisonadoras que pueden compactar el material al 94 o 95% de la prueba Proctor Modificada, conforme sale de la pavimentadora. Ver figura 5.1.



FIGURA 5.1. UN CAMION DESCARGA MEZCLA RIGIDA EN LA PAVIMENTADORA EQUIPADA CON LLANA VIBRATORIA DE TRABAJO PESADO.

FUENTE: PAVIMENTOS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS. REVISTA IMCYC. VOL. 24, No. 189, FEBRERO 1987.

Así pues, el rodillo sencillo que la seguía efectuó muy poca compactación adicional y casi no originó asentamiento alguno de la superficie del pavimento, lo cual es una gran ventaja para mantener tolerancias de acabado.

5.4. AEROPUERTO INTERNACIONAL DE PORTLAND, OR.

A principios de 1985, el aeropuerto de Portland, Oregón, solicitó cotizaciones para la construcción de 34,500 m² de plataforma de estacionamiento. Debido a las condiciones de carga de larga duración, se consideraron como alternativas el pavimento de concreto asfáltico y el del C.C.R. El C.C.R. presentó más ventajas sobre el pavimento de concreto asfáltico, incluyendo una mayor resistencia a los agentes químicos de los aceites hidráulicos y gasolinas, agrietamiento sin importancia debido a las pesadas cargas a las que iba a ser sometido, y un ahorro considerable en el costo.

El diseño para el concreto asfáltico se realizó de acuerdo al método de la FAA (Federal Aviation Agency). El tipo de avión que se utilizó para el diseño fue un DC-10, de acuerdo a los cálculos resultó un CBR (California Bearing Ratio, Valor relativo de soporte, VRS) de 5. Los resultados obtenidos de los análisis fueron los siguientes: 5 pulgadas (127 mm) de concreto asfáltico, 8 pulgadas (203 mm) de base bituminosa, 4 pulgadas (102 mm) de base granular y 19 pulgadas (483 mm) de sub-base; dando una sección total de 36 pulgadas (914 mm). Ver figura 5.2.

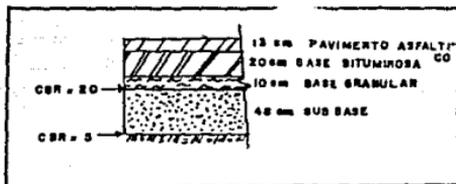
El diseño para el C.C.R. se determinó también en base al método de la FAA, sin embargo en este caso se utilizó un Boeing 727 en vez de el DC-10 que se utilizó para el concreto asfáltico; esto fue debido a la diferencia existente entre los pavimentos rígidos y los pavimentos flexibles cuando son sometidos a cargas. De acuerdo a los resultados del método se obtuvo una capa de 14 pulgadas (356 mm) de Concreto Compactado con Rodillos y una base granular de 4 pulgadas (102 mm). Ver figura 5.2.

El pavimento se coló en dos etapas. La mezcla consistió en lo siguiente:

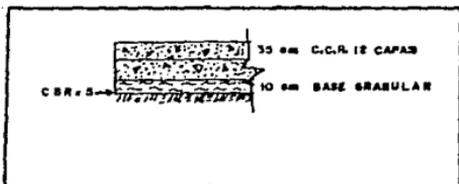
- 221 Kg de cemento Portland.
- 54 Kg de ceniza volante.
- 119 litros de agua.
- 1031 Kg de agregado de tamaño máximo de 3/4 de pulgada.

El agregado era de granulometría modificada de acuerdo con la Oregon State Highway; material triturado del que del 5 al 10% pasaba por la malla No. 200. La relación agua/(cemento + puzolana) era de 0.43.

Las dos capas iguales se colaron con una pavimentadora similar a la utilizada en el puerto de Tacoma. La plataforma rectangular fue pavimentada longitudinalmente con anchos que variaban de 5.5 a 7.3 m. Cada carril longitudinal estaba dividido en tres secciones, de manera que la pavimentadora podía regresar al principio del carril que estaba pavimentando para comenzar a colocar la capa superior antes de que la capa inferior tuviera 10 minutos de colada. Después de 10 minutos de que la pavimentadora colaba un tramo el rodillado tenía que comenzar para que se terminara en los 50 minutos, para después colocar la siguiente capa con la pavimentadora. Ver figura 5.3.



SECCION DE PAVIMENTO ASFALTICO .



SECCION DE C.C.R.

FIGURA 5.2. SECCIONES DE PAVIMENTO ASFALTICO Y DE C.C.R.
 FUENTE: RCC PAVEMENTS, AND AIRPORT APRON AND A COUNTY ROAD
 CONCRETE INTERNATIONAL, VOL. 9, No. 2, FEBRERO 1967.

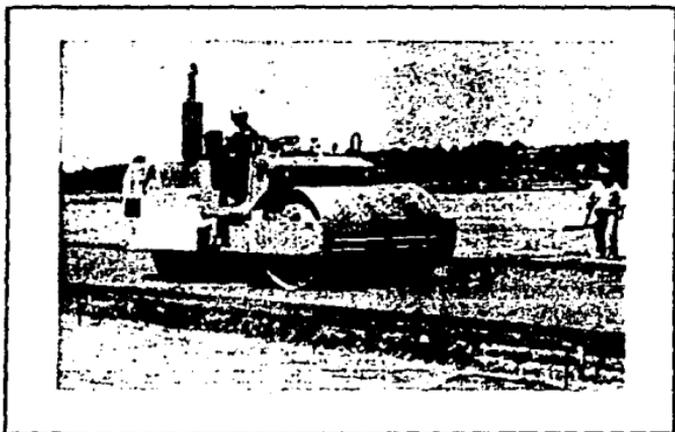


FIGURA 5.2. APLANAADORA VIBRATORIA UTILIZADA EN EL AEROPUERTO
 DE PORTLAND.
 FUENTE: PAVIMENTOS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS.
 REVISTA IMCYC, VOL. 24, No. 189, FEBRERO 1967.

El método que se utilizó para el curado fue de aspersión de vapor durante las siguientes 24 horas, y un curado adicional durante los siguientes 7 días. Ver figura 5.4.

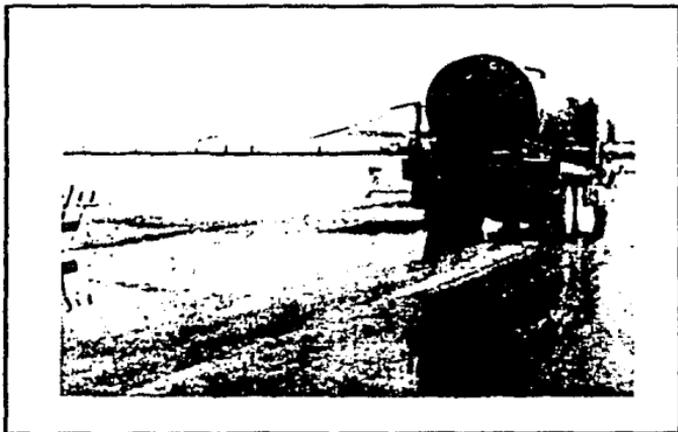


FIGURA 5.4. APLICACION DE ASPERSION DE VAPOR APLICADO SOBRE C.C.R. FRESCO, EN EL AEROPUERTO DE PORTLAND.

**FUENTE: PAVIMENTOS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS.
REVISTA IMCYC. VOL. 24, No. 190, FEBRERO 1987.**

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

La técnica del Concreto Compactado con Rodillos es una alternativa económica para México, siendo que viene a sustituir a los pavimentos de concreto hidráulico y en algunos casos a los de concreto asfáltico y a las presas de tipo gravedad tanto de concreto convencional como de materiales graduados. Lo anterior no quiere decir que se van a excluir del campo de trabajo a las firmas con equipo de pavimentación con concretos asfálticos ni a los técnicos que conocen y trabajan con la pavimentación tradicional con concreto, en cuanto a pavimentos se refiere, sino por el contrario a todos les abre más posibilidades de acción.

Es por eso que uno de los puntos primordiales para la utilización del C.C.R. es que no se necesita equipo diferente al que actualmente se utiliza para la construcción de carreteras, presas, aeropuertos, etc., sino que para su fabricación, colocación y manejo se utiliza el mismo equipo, siempre y cuando se tomen en cuenta sus características y se rijan por un estricto control de calidad en campo.

El Concreto Compactado con Rodillos es ideal para climas extremosos, puesto que resiste al congelamiento. Se tienen experiencias en un patio de selección de troncos en Caycuse Columbia Británica en donde las temperaturas invernales llegan hasta los -6°C , y dicho pavimento ha presentado muy buenas condiciones de servicio.

El porcentaje de finos puede ser mayor que el permitido en los concretos convencionales, ya que debido a la poca relación agua/cemento, éstos ayudan a llenar todas las cavidades del agregado y cubrir toda el área superficial de los mismos. Además en el C.C.R. se permite la adición de finos no plásticos reduciéndose la tendencia a la segregación, ayudando a la compactación y aumentando la resistencia.

En el caso de que no existieran finos en la mezcla de C.C.R., el contenido de vacíos será mayor, este problema se puede solucionar incluyendo una ceniza volante, la cual tiene la función de reducir el contenido de vacíos y además el costo porque no se usará más cemento. Con el uso del Concreto Compactado con Rodillos se obtienen mayores resistencias que con los concretos convencionales, debido a la baja relación agua/cemento, la cual es beneficiosa para la resistencia temprana. La energía de compactación también contribuye a la resistencia en el C.C.R., ya que se obtiene una alta energía específica, con la que se obtiene una mayor resistencia.

En el caso de pavimentos construidos con Concreto Compactado con Rodillos puede utilizarse el mismo equipo que para los de concreto asfáltico; y además, se tienen también ventajas en comparación con los de concreto convencional, como son: no se requiere de cimbra, no se utiliza acero de refuerzo, por la baja relación agua/cemento se requiere de menos cemento, es un procedimiento constructivo continuo y la apertura al tránsito es inmediata. Por otro lado el C.C.R. se considera como pavimento rígido, por lo tanto el diseño puede realizarse de acuerdo a los procedimientos tradicionales, y no se tienen que utilizar nuevas ecuaciones para el diseño del espesor, sino que se utilizan las mismas que para los pavimentos rígidos hechos con concretos convencionales; no hay que perder de vista que lo que nos interesa es obtener pesos volumétricos altos, ya que la resistencia inicial de un pavimento está dada por la energía de compactación; por lo tanto, se debe tener especial cuidado en que los diseños de las mezclas de C.C.R. se realicen de acuerdo al óptimo de humedad de la gráfica de peso volumétrico seco contra contenido de humedad. Una de las recomendaciones en el caso de pavimentación con C.C.R. es que no se realicen riegos de material fino en la superficie del pavimento después de que se ha terminado la compactación, pues al abrir el pavimento al tránsito puede perderse. Lo que se debe buscar son mezclas uniformes y evitar al máximo la segregación.

En el caso de pavimentos una de las bondades más grandes del C.C.R. es que soporta cargas pesadas y su costo es menor en relación a los pavimentos de concreto convencional. En México se tienen grandes problemas de secciones que se realizan con pavimentos asfálticos, como por ejemplo los estacionamientos de camiones de carga pesada o las áreas de estacionamiento de camiones de pasajeros, en donde se producen hundimientos en la capa de asfalto bastantes considerables. Dichos problemas se pueden evitar con el C.C.R., ya que está comprobado que tiene una alta resistencia. Otro ejemplo de los problemas que se tienen con los pavimentos asfálticos lo presenta el aeropuerto de la Ciudad de México, en donde el mantenimiento a las pistas de aterrizaje y las áreas de estacionamiento de los aviones es muy frecuente y muy costoso, además, este problema ocasiona demoras en las salidas y llegadas de los aviones provocando pérdidas económicas muy fuertes y malestar en los usuarios por los tiempos de espera. Este problema podría ser solucionado con la Técnica del Concreto Compactado con Rodillos, posiblemente la inversión inicial sea mayor, pero se evitarán en gran medida los mantenimientos a las pistas y se dará un mejor funcionamiento al aeropuerto, dando un servicio más eficiente y seguro a todos los usuarios.

Para el caso de presas se tiene la ventaja de que pueden utilizarse los recursos naturales del lugar y la ejecución del proyecto en un tiempo correspondiente al 25% del que normalmente se requiere en presas de diseño tradicionales, por los volúmenes mucho menores origina una reducción en el costo, además de la recuperación a corto plazo de la inversión por los beneficios inmediatos a recibir. Se abate el costo de la construcción, al utilizarse menor volumen de materiales, menor tiempo de construcción y el no utilizar cimbra. Se tiene la gran ventaja de que en caso de que se presente una creciente inesperada, la cortina de la presa en construcción puede ser brincada por el agua sin mayores consecuencias.

La compactación con el rodillo vibratorio da lugar a una mayor compacidad en el concreto, reduciéndose la permeabilidad del mismo y por lo tanto las filtraciones, sobre todo al colocarse en capas de 25 a 30 cm, lo cual hace que el calor de hidratación generado por el cemento se reduzca considerablemente, evitando mayores variaciones volumétricas del concreto y por tanto menores agrietamientos, dando por resultado una mejor impermeabilidad del mismo.

Se recomienda que antes de iniciar la construcción de un tramo de prueba, se realicen todos los estudios necesarios para desarrollar el proyecto final, ya que sin el apoyo de éstos es difícil que se obtengan resultados satisfactorios. En el caso de presas por ejemplo, es de vital importancia la realización de un bordo de pruebas, ya que éste servirá para la obtención de todos los datos referentes a las características y comportamiento de los agregados, densidad y resistencia, adherencia entre capas, tratamiento de paramentos, número mínimo de pasadas con los rodillos para satisfacer las necesidades de diseño, verificación del equipo de compactación, y adherencia del C.C.R. con la cimentación y empotramientos.

Es de suma importancia que durante todo el proceso de construcción se tenga especial cuidado en que el tiempo de elaboración de la mezcla, transporte, tendido y compactación no sea mayor de una hora, ya que es el tiempo especificado para que el concreto no pierda sus propiedades mecánicas, de lo contrario se podrán utilizar aditivos retardantes para el fraguado.

Para tener una buena calidad en el C.C.R. se debe tener un buen control entre la producción y la colocación del mismo, teniéndose que prever las probables demoras en la maquinaria y evitar al máximo las juntas frías, ya que se podrá tener el mejor equipo pero si no se prevén fallas y se lleva a cabo un buen control de calidad, seguramente no se obtendrán buenos resultados. Uno de los problemas que preocupan durante el proceso constructivo del C.C.R. es el tratamiento que se le debe dar a

las juntas frías, ya que en el C.C.R. se tiene ausencia de lechosidad. Mediante las experiencias que se han tenido en otros países se ha llegado a la conclusión de que se debe colocar una delgada capa de concreto de algún revenimiento para asegurar la adherencia en las juntas frías. Se obtienen aún mejores resultados cuando la superficie de la junta fría está relativamente libre de humedad, ya que con ello se tiene una adherencia superior.

Cabe mencionar que existen ciertas diferencias entre el C.C.R. que se utiliza para presas y el utilizado para pavimentos. El Concreto Compactado con Rodillos que se utiliza para presas es una forma de concreto masivo de bajo contenido de cemento, en donde se permiten tamaños máximos de agregado de hasta $1\frac{1}{2}$ " (38 mm) de diámetro. El diámetro que se aconseja para pavimentos es de $\frac{3}{4}$ " (20 mm), debido a que el material va a ser sometido a fricción del tránsito y se puede llegar a producir desmoronamiento de la superficie. Estos factores junto con un enfoque diferente del diseño de la mezcla, producen una mezcla mucho más trabajable que la empleada para presas, aunque sigue siendo una mezcla sin revenimiento y lo bastante rígida para soportar los rodillos vibratorios.

Mientras más experiencias se tengan en el País serán identificadas todas las dificultades que surgen en el acondicionamiento al sitio, preparación de los bancos de materiales, la transportación al sitio y el control de calidad durante la construcción. Hasta la fecha en México se han tenido pocas experiencias, mas con este trabajo se pretende exponer un conocimiento amplio de lo que es el C.C.R., así como de sus posibles aplicaciones, ya que éste puede ofrecer numerosas ventajas en la mayoría de los proyectos de Ingeniería Civil, en cuanto a pavimentos y presas se refiere. Además el C.C.R. también se puede aplicar en patios de maniobras de muelles, pavimentos urbanos, y en áreas críticas como plataformas de operaciones y zonas de estacionamiento para vehículos pesados.

Además, se considera que existen en el País un gran número de captaciones de tamaño mediano, tanto para abastecimiento de agua como para riego y generación de energía a través de pequeñas hidroeléctricas que deberán realizarse durante las próximas administraciones y en las que la técnica del C.C.R. hace atractiva la inversión, tanto en costo como en tiempo, al acelerar los términos de recuperación y reducir los costos financieros de esas construcciones, además de facilitar el atractivo meramente político que permite entregar obras terminadas en el breve plazo de las Administraciones Federal, Estatal y aún Municipal.

Es por eso que esta nueva técnica no debe ser una limitación, sino por el contrario, debe ser un reto a la creatividad, inventiva e imaginación de los ingenieros que diseñarán, proyectarán y ejecutarán esta clase de proyectos.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- SCHRADER, Ernest K. The first gravity dam designed and built for roller compacted construction methods. Concrete International. USA. Vol. 4, No. 10, octubre 1982.
- 2.- RODRIGUEZ, Francisco Andriolo. Use of roller compacted concrete in Brasil. Concrete International. USA. Vol.6, No. 5, mayo 1984.
- 3.- SCHRADER, Ernest K. Concreto para cortinas compactado con rodillos. Revista IMCYC. Vol. 20, No. 139, noviembre 1982.
- 4.- CANNON, Robert W. El concreto compactado con rodillos y el rolacreto en las presas. Revista IMCYC. Vol. 24, No. 183, agosto 1986.
- 5.- KEIFER, Oswin. Pavimentos de concreto compactado con rodillos. Revista IMCYC. Vol. 24, No. 189, febrero 1987.
- 6.- Roller compacted concrete for airport apron. Construction Industry International. USA. Vol. 13, No. 12, diciembre 1987.
- 7.- Pavimentos con hormigón compactado con rodillo (HCR). Boletín del Cemento Portland Argentino. Año 19, No. 121, enero-febrero, 1988.
- 8.- Hormigones secos compactados con rodillos. Aportes Técnicos Chile. No. 13, 1985.
- 9.- LONDORO, Cipriano. El concreto compactado con rodillo: Un nuevo material para pavimentos. Boletín del Instituto Colombiano de Productores del Cemento. No. 42, julio-septiembre, 1988.

10. - SCHRADER, Keifer W. Compaction of roller compacted concrete. Consolidation of concrete. ACI-SP-98, 1977.
11. - NIETO, José R. J. La tecnología del concreto compactado con rodillos (CCR). Revista IMCYC. Vol. 1, No. 5, octubre 1988.
12. - FIGUEROA, Donato Gallo. Pavimento de concreto compactado con rodillo. Revista IMCYC. Vol. 1, No. 5, octubre 1988.
13. - GOMEZ Domínguez, Jorge y Scholer, Charles F. Construcción de caminos de bajo volumen con concreto compactado con rodillos. Revista IMCYC. Vol. 1, No. 5, octubre 1988.
14. - FIGUEROA, Donato Gallo. El concreto compactado con rodillos y su control de calidad. Memoria. Reunión Nacional de Laboratorios de Materiales de Construcción. San Luis Potosí, 1987.
15. - Concreto compactado con rodillos. Curso IMCYC, Chihuahua, 1988.
16. - FIGUEROA, Donato Gallo. El concreto compactado con rodillos y su control de calidad. Revista Mexicana de la Construcción, No. 398, enero, 1988.
17. - Presa Trigomil. Revista Grupo ICA. Vol. 50, noviembre - diciembre, 1988.
18. - Cálculo de las cantidades necesarias de ceniza volante y cemento que se requieren para la construcción del bordo de prueba del proyecto Trigomil, Jalisco. S.A.R.H. Junio, 1989.
19. - RODRIGUEZ, Benito y Ochoa Octavio. Presa Trigomil. Procedimiento de construcción de la cortina de concreto compactado con rodillo. ICA. Reunión Técnica del 40° Aniversario del Grupo ICA. julio, 1987.