



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

“EL CONCRETO HIDRAULICO EN LA CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS COMPACTADOS CON RODILLO”

T E S I S

PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL

PRESENTA:
NEFTALI ARROYO VELASCO

DIRECTOR DE TESIS:
ING. ALEJANDRO PONCE SERRANO



MEXICO, D. F.

2004



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
FING/DCTG/SEAC/UTIT/128/03

Señor
NEFTALÍ ARROYO VELASCO
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. ALEJANDRO PONCE SERRANO, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"EL CONCRETO HIDRÁULICO EN LA CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS COMPACTADOS CON RODILLO"

- I INTRODUCCIÓN
- II EL CONCRETO HIDRÁULICO COMO MATERIAL CONSTRUCTIVO
- III CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO
- IV APLICACIÓN DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO EN LA PAVIMENTACIÓN
- V REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE LABORATORIO
- VI EJEMPLO PRÁCTICO DE APLICACIÓN DE PAVIMENTOS DE CCR EN MÉXICO
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- APÉNDICES

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 1 Diciembre 2003.
EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/AJP/crc.

AGRADECIMIENTO:

Quiero agradecer a todos aquellos ingenieros y personas que, desinteresadamente me brindaron su apoyo y opinión constante en la realización y desarrollo de ésta investigación y en especial hago referencia del **Ing. ALEJANDRO PONCE SERRANO**, quien es profesor en la Facultad de Ingeniería de la UNAM y aceptó ser director para dirigir el presente tema de tesis, ya que, esmeradamente colaboró con la planeación y revisión de éste trabajo, haciendo observaciones técnicas y comentarios al respecto. También agradecer a los funcionarios Directores y Personal del Departamento de Pruebas de Laboratorio de la Dirección General de Servicios Técnicos y de la Dirección General de Conservación de Carreteras, ambas dependientes de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), gracias a su anuencia, se otorgó el permiso para la realización de las pruebas de laboratorio y gran parte de la información.

Asimismo hacer hincapié de muchas facilidades proporcionadas por el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC) para la consulta en la Biblioteca de varias fuentes técnicas básicas y elementales en la materia y en particular hago mención del **Ing. DONATO FIGUEROA GALLO** quien con mucho cuidado colaboró con la opinión técnica normativa en la revisión de éste trabajo.

De la misma manera agradecer al **Ing. GILBERTO HERNANDEZ GOMEZ**, por auxiliarme a seleccionar el tema de tesis, así como a donde acudir para compilar toda la información necesaria y adecuada que sirvió de base para desarrollar esta exposición.

Deseo un agradecimiento más para mencionar al **Ing. ALEJANDRO GUERRERO VARGAS**, quien es mi cuñado y que colaboró con la captura y demás correcciones del trabajo.

DEDICATORIA.

El presente trabajo que desarrollé como tema de tesis, se la dedico sinceramente a mis padres **ANTONIO ARROYO SIDERIO** y **CONSUELO VELAZQUEZ LOPEZ**, Como una muestra más de que los quiero y que siempre recibí cuando estudiante un gran apoyo moral y económico; así mismo a mis hermanos que los aprecio mucho, **RONEY, CARMEN Y YOLANDA.**

Con todo cariño a mi esposa **GRACIELA GUERRERO VARGAS** por su constante insistencia e impulso para la terminación de este trabajo.

Con mucho respeto a mis hijos: **MARCELA MARLENE** y **NEFTALI ANTONIO**, Como una muestra y guía de ejemplo a seguir ya que con la perseverancia en el estudio, se logra todo para la superación personal y así poder realizar mayor responsabilidad en el ejercicio profesional como en el desarrollo del trabajo y la productividad.

A mis tíos más cercanos y amigos distinguidos.

INDICE

	Pág.
INDICE	1
INTRODUCCION.	4
CAPITULO: I.- EL CONCRETO HIDRAULICO COMO MATERIAL CONSTRUCTIVO.	6
1.1 Componentes del concreto hidráulico.	6
1.1.1 Cemento.	6
1.1.2 Agregados.	19
1.1.2.1. Arenas.	22
1.1.2.2. Grava.	24
1.1.2.3. Agua.	24
1.1.2.4. Aditivos.	25
1.2 Tipos de concreto y sus diferentes usos.	26
1.2.1 Concreto de bajo peso específico.	26
1.2.2 Concreto de alta resistencia.	27
1.2.3 Concreto de alta trabajabilidad.	28
1.2.4 Concreto reforzado con fibras.	29
1.2.5 Concreto compactado con rodillos.	30
CAPITULO: II.- CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO.	32
2.1 Antecedentes históricos.	32
2.1.1 Definición.	32
2.1.2 Antecedentes.	32
2.2 Materiales que lo componen.	35
2.2.1 Cementantes.	36
2.2.2 Agregados.	37
2.2.3 Dosificación y mezclas.	42
2.2.4 Selección de proporcionamiento.	46
2.2.5 Revenimiento y tamaño máximo de agregado.	47
2.3 Características físicas y mecánicas.	52
2.3.1 Propiedades del CCR.	52
2.3.2 Esfuerzo.	53
2.3.3 Módulo de elasticidad.	55
2.3.4 Valores de diseño.	56
2.3.5 Fatiga.	57
2.3.6 Permeabilidad.	58
2.3.7 Resistencia a las heladas.	59
2.3.8 Propiedades térmicas.	59
2.3.9 Elaboración de especímenes.	60
2.3.10 Prueba de cilindros de concreto	64

	Pág.
CAPITULO: III.- APLICACION DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO EN LA PAVIMENTACION.	68
3.1 Generalidades.	68
3.2 Influencia de las propiedades del concreto en las características del pavimento.	71
3.2.1 Resistencia.	72
3.2.2 Rigidez.	72
3.2.3 Contracción.	73
3.2.4 Estabilidad superficial.	73
3.2.5 Color.	74
3.3 Criterios generales para el diseño.	74
3.3.1 Pavimentos industriales, urbanos y carreteros.	76
3.3.1.1 Bases para el diseño.	77
3.3.1.2 Proceso de diseño para el espesor.	79
3.3.1.3 Procedimiento para el diseño para tránsito mixto.	92
3.4 Método constructivo.	93
CAPITULO: IV.- REALIZACION DE PRUEBAS DE LABORATORIO.	101
4.1 Generalidades	101
4.2 Descripción de los trabajos	102
4.3 Ensayes a Compresión y Tensión .	103
4.4 Dosificación de las mezclas.	103
4.4.1 Mezcla A. Dosificación para CCR.	103
4.4.2 Mezcla B. Dosificación para concreto normal.	104
4.5 Resultados obtenidos.	105
4.6 Análisis de resultados.	110
CAPITULO: V.- EJEMPLO PRACTICO DE APLICACIONES DE PAVIMENTOS DE CCR EN MEXICO.	111
5.1 Camino de acceso al Proyecto Hidroeléctrico Aguamilpa (Estado de Nayarit).	111

	Pág.
5.2 Análisis de factibilidad económica.	122
5.2.1 Generalidades.	122
5.2.2 Análisis comparativo de pavimento CCR y pavimento asfáltico de la SCT.	122
5.2.2.1 Metodología.	122
5.2.2.2 Ejemplo de cálculo comparativo de costos de pavimento flexible y pavimento rígido (CCR).	124
5.2.2.3 Análisis de resultados.	125
5.2.3 Cálculo de los Análisis de precios unitarios en los conceptos de carpeta de concreto asfáltico y CCR para determinar el cuadro comparativo de costos por km y mantenimiento anual	126
5.2.4 Análisis de costos para el tramo de acceso al Proyecto Hidroeléctrico Aguamilpa.	143
5.2.5 Comentarios al análisis obtenido.	144
 CAPITULO: VI.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	 145
 APENDICE I.- METODO DE PRUEBA VeBe (Traducción al Español).	 149
 APENDICE II.- ALTERNATIVA PARA PODER CONSTRUIR PAVIMENTOS DE CCR, UTILIZANDO MAQUINARIA Y EQUIPO INTEGRADO CON TECNOLOGIA DE PUNTA.	 158
 II.1.- Cuadro comparativo de factibilidad económica y de costos de financiamiento de pavimento flexible, pavimento de CCR con equipo tradicional y CCR con equipo integrado con tecnología de punta.	161
II.2.- Análisis del Precio Unitario actualizado hasta Enero del 2003 del concepto concreto hidráulico rodillado de 25 cm de espesor (CCR).	162
II.3.- Ejemplo de cálculo de costos de financiamiento de pavimento rígido (CCR), construido con equipo integrado con tecnología de punta.	164
II.4.- Análisis de resultados.	164
 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.	 165

INTRODUCCION.

En la actualidad casi toda construcción lleva por lo menos un elemento hecho con concreto hidráulico. Esto es debido a que presenta características semejantes a la de una roca, posee una gran capacidad al esfuerzo de compresión, una menor resistencia a la tensión, es bastante impermeable, y resiste al fuego, entre otras características. Además, por ser la mezcla de varios componentes (cemento Portland ordinario, agua, agregados, fibras, aditivos), sus propiedades pueden ser trabajables hasta cierto punto.

Uno de los concretos que en la actualidad ha venido a revolucionar las técnicas de construcción de pavimentos es el concreto compactado con rodillo (CCR), que en México ha tenido poca difusión aún y cuando en otros países como España, Estados Unidos y Japón principalmente, su aplicación se ha dado desde hace varios años con excelentes resultados. Esto me motivó para tomar como tema de tesis al Concreto Compactado con Rodillos.

En esta investigación se presentan las características, propiedades, formas de elaboración en pavimentos, y los costos aproximados que en la actualidad representa un proyecto cuyo elemento principal es el CCR. El desarrollo del trabajo se divide en cinco capítulos los cuales se describen a continuación.

En el **capítulo I:** Se presentan las características del concreto hidráulico así como los componentes que lo integran, a saber: cemento, agregados pétreos (grava y arena), agua y aditivos.

También se exponen las pruebas a las que se somete para determinar sus propiedades físicas y mecánicas; y por último se exponen los diferentes tipos de concreto que se elaboran dependiendo de las características de sus componentes.

A partir del **capítulo II:** Se expone al concreto compactado con rodillo características, ventajas, propiedades y proporcionamiento, hacen una alternativa más comparada con la del CCR un sustituto excelente del concreto asfáltico.

En el **capítulo III:** Se describen los criterios para diseño de una losa de CCR para pavimento, las características de los materiales que intervienen en su construcción, el procedimiento constructivo necesario y el análisis de factibilidad económica.

El **capítulo IV**: Explica la serie de pruebas de laboratorio, ejecutadas en los laboratorios de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y en donde se comparan las dosificaciones y resistencias obtenidas para mezclas del CCR y concreto normal (CN). Al final se presenta el análisis de los resultados obtenidos.

Así mismo, en el **capítulo V**: se presenta como ejemplo práctico de aplicación del CCR un informe técnico referente a la construcción del camino de acceso a la Presa Aguamilpa, en los límites de los Edos. Nayarit- Jalisco, Estado de Nayarit, en donde se construyeron 36 Km con este procedimiento.

En el **capítulo VI**: Se expone en forma breve las razones fundamentadas como conclusión de lo que desarrollé en este trabajo, por las cuales se recomienda ampliamente construir caminos aplicando el CCR como sustituto del concreto asfáltico y de los métodos tradicionales en pavimentación, debido a su durabilidad y bajo costo.

CAPITULO I : EL CONCRETO HIDRAULICO COMO MATERIAL CONSTRUCTIVO.

1.1 Componentes del concreto hidráulico.

El concreto es un material rígido artificial capaz de formar bloques monolíticos una vez que la pasta inicial pierde su plasticidad.

Los materiales que lo constituyen son generalmente: agua, cemento Portland ordinario, arena y grava, aunque a veces se le incluyen aditivos u otros componentes que tienen por objeto mejorar o modificar algunas de sus características físicas o mecánicas.

Se conoce con el nombre de agregado a toda partícula de material pétreo que al incluirlo en una mezcla, influye en los niveles de resistencia, trabajabilidad y costo de la misma. Con base en su tamaño, el agregado puede ser grava o arena.

De acuerdo a lo que se espera del concreto, los agregados deben reunir determinadas características y estar dosificados en las proporciones adecuadas. Por ejemplo, una grava degradable reducirá la resistencia final del cuerpo, o bien una arena que retenga agua salina puede generar reacciones inapropiadas con el cemento, dando lugar a una masa poco cohesiva.

Debe tenerse especial cuidado en la selección de éstos, puesto que además de afectar las propiedades de la mezcla, determinan las propiedades mecánicas que ésta tendrá en su vida útil, trayendo como consecuencia su rentabilidad y durabilidad.

1.1.1 Cemento.

Es un material inorgánico finalmente pulverizado, comúnmente conocido como cemento, que al agregarle agua, ya sea solo o mezclado con arena y grava, u otros materiales similares tiene la propiedad de fraguar y endurecer incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas durante la hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad.

[1]

Nota: La reproducción de la norma ONNCCE es con fines educativos y no persigue ningún aspecto comercial .

* 1.- Saad, Miguel. Tratado de construcción vol. 1 (de. CECSA, México, 1964. 3a reimp. Págs. 204- 206, 207, 226.

A) MATERIALES COMPONENTES DEL CEMENTO.

Según las definiciones establecidas en la Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999. "Industria de la Construcción- Cementos Hidráulicos- Especificaciones y Métodos de Prueba".- Publicada en el Diario Oficial de la Federación el día 6 de Julio de 1999.

[2]

a) Caliza .- Materiales de naturaleza inorgánica y origen mineral carbonatado, compuestos principalmente por carbonato de calcio (CaCO_3), en forma de calcita, que molidos conjuntamente con clinker de cemento Portland, afectan favorablemente las propiedades y el comportamiento de los conglomerados de cemento.

b) Cenizas volantes.- Material que se obtiene por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas con carbones pulverizados se consideran como materiales puzolánicos.

c) Clinker Portland.- Es el producto artificial obtenido por extracto de los crudos correspondientes, es decir, por calcinación y sintetización de los mismos a la temperatura y durante el tiempo necesario y por enfriamiento adecuado, a fin de que dichos productos tengan la composición química y la constitución mineralógica requerida. Los crudos de Clinker Portland son mezclas suficientemente finas, homogéneas y adecuadamente dosificadas a partir de materias primas que contienen cal (CaO), Sílice (SiO_2), Alúmina (Al_2O_3), Oxido Férrico (Fe_2O_3) y pequeñas cantidades de otros compuestos minoritarios, los cuales se clinkerizan.

d) Escoria Granulada de Alto Horno.- Es un sub-producto no metálico constituido esencialmente por silicato y aluminio-silicatos cálcicos, que se obtienen por el enfriamiento brusco con agua o vapor y aire, del residuo que se produce simultáneamente con la fusión de minerales de hierro en el alto horno.

Nota: La reproducción de la norma ONNCCE es con fines educativos y no persigue ningún aspecto comercial .

* 2.- Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999. "Industria de la Construcción -Cementos Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Prueba". Publicada en el Diario Oficial de la Federación el día 6 de Julio de 1999.

e) Humo de sílice.- Material puzolánico muy fino, compuesto principalmente de sílice amorfa que es un sub-producto de la fabricación de silicio o aleaciones de hierro silicio con arco eléctrico (también conocido como humo de sílice condensado o microsílíce).

f) Puzolanas.- Las puzolanas son sustancias naturales, artificiales y/o subproductos industriales, silíceas o silico-aluminosas o una combinación de ambas, las cuales no endurecen por sí mismas cuando se mezclan con agua, pero finalmente molidos, reaccionan en presencia de agua a la temperatura ambiente con el hidróxido de calcio y forman compuestos con propiedades cementantes.

g) Sulfato de calcio (Comúnmente conocido como yeso) .- Es el producto natural o artificial que se utiliza para regular el tiempo de fraguado y se presenta en diferentes estados: Anhidrita (CaSO_4), Yeso ($\text{CaSO}_4 - 2\text{H}_2\text{O}$) y Hemihidrato ($\text{CaSO}_4 + 1/2\text{H}_2\text{O}$).

B) CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DE LOS CEMENTOS.

Las características especiales se consideran, en la resistencia a los sulfatos, la baja reactividad alcali agregado, el bajo calor de hidratación y el color blanco, estos deben tener una designación adicional acorde con las características que se presenten según la norma mexicana NMX- C- 414 – ONNCCE- 1999.

a) Cementos resistentes a los sulfatos.- Se consideran cementos con resistencia al ataque de los sulfatos, aquellos que por su comportamiento cumplan con el requisito de expansión limitada de acuerdo con el método de prueba establecido.

b) Cementos de baja reactividad alcali agregado.- Son aquellos que cumplan con el requisito de expansión limitada en la reacción alcali-agregado, según el método de prueba indicado.

c) Cemento de bajo calor de hidratación.- Son cementos que desarrollan un calor de hidratación igual o menor al especificado en la norma mexicana.

Nota: La reproducción de la norma ONNCCE es con fines educativos y no persigue ningún aspecto comercial.

d) Cementos Blancos.- Se consideran cementos blancos todos aquellos cuyo índice de blancura sea igual o superior que el valor de referencia que se especifica en la norma mexicana y lo que estipulan los apéndices A y B, mismos que se describen en el desarrollo de este trabajo.

Tabla 1.1 Cementos con características especiales.

Nomenclatura	Características especiales de los cementos
RS	Resistencia a los Sulfatos
BRA	Baja reactividad alcali agregado
BCH	Bajo calor de hidratación
B	Blanco

[2]

Quando se requiera que un cemento tenga alguna característica especial, de acuerdo a esta tabla, éste debe cumplir con las especificaciones de la tabla 1.2 .

Tabla 1.2 Especificaciones de los cementos con características especiales.

Nomenclatura	Características especiales	Expansión por ataque de sulfatos		Expansión alcali agregado máx %		Calor de hidratación máx Kj/ kg (Kcal/kg)		Blancura min. %
		6 meses	1 año	14 días	56 días	7 días	28 días	
RS	Resistencia a los sulfatos	0.05	0.10					
BRA	Baja reactividad alcali agregado			0.020	0.060			
BCH	Bajo calor de hidratación					250 (60)	290 (70)	
B	Blanco							70

[2]

Nota: La reproducción de la norma ONNCCE es con fines educativos y no persigue ningún aspecto comercial.

* 2.- Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999. "Industria de la Construcción - Cementos Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Prueba". Publicada en el Diario Oficial de la Federación el día 6 de Julio de 1999.

C) CLASIFICACION DE LOS DIFERENTES TIPOS DE CEMENTO

a) Cemento Portland Ordinario (CPO) .- Es el cemento producido a base de la molienda del clinker Portland y usualmente sulfato de calcio.

b) Cemento Portland Puzolánico (CPP) .- Conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clinker Portland, materiales puzolánicos y usualmente sulfato de calcio.

c) Cemento Portland con escoria de alto horno (CPEG).- Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clinker Portland, escoria granulada de alto horno y usualmente sulfato de calcio.

d) Cemento Portland Compuesto (CPC).- Conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta del clinker Portland que, usualmente contiene sulfato de calcio y una mezcla de materiales puzolánicos, escoria de alto horno y caliza. En el caso de la caliza, ésta puede ser componente único.

e) Cemento Portland con humo de sílice (CPS).- Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clinker Portland, humo de sílice y usualmente sulfato de calcio.

f) Cemento con escoria granulada de alto horno (CEG).- Conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clinker Portland y mayoritariamente escoria granulada de alto horno y sulfato de calcio. En la tabla 1.3 , se clasifican los diferentes tipos de cemento.

Nota: La reproducción de la norma ONNCCE es con fines educativos y no persigue ningún aspecto comercial.

Tabla 1.3 Clasificación de los tipos de cemento.

Tipo	Denominación
CPO	Cemento Portland Ordinario
CPP	Cemento Portland Puzolánico
CPEG	Cemento Portland con escoria granulada de alto horno
CPC	Cemento Portland Compuesto
CPS	Cemento Portland con humo de sílice
CPG	Cemento con escoria granulada de alto horno

[2]

D) ESPECIFICACIONES Y RESISTENCIA DE LOS CEMENTOS -SEGUN SUS COMPONENTES PRINCIPALES.

En la tabla 1.4, se define la composición según sus materiales de los diferentes tipos de cemento (Norma NMX-C- 414- ONNCCE-1999).

Nota: La reproducción de la norma ONNCCE es con fines educativos y no persigue ningún aspecto comercial.

* 2.- Norma Mexicana NMX-C – 414 - ONNCCE – 1999. "Industria de la Construcción – Cementos Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Prueba". Publicada en el Diario Oficial de la Federación el día 6 de Julio de 1999.

Tabla 1.4 Composición de los cementos (*).

Tipo	Denominación	Componentes Principales					
		Clinker Portland * yeso	Escoria granulada de alto horno	Materiales Puzolánicos ***	Humo de sílice	Caliza	Minoritarios **
CPO	Cemento Portland Ordinario	95-100	--	--	--	--	0-5
CPP	Cemento Portland Puzolánico	50-94	--	6-50	--	--	0-5
CPEG	Cemento Portland con escoria granulada de alto horno	40-94	6-60	--	--	--	0-5
CPC	Cemento Portland Compuesto ****	50-94	6-35	6-35	1-10	6-35	0-5
CPS	Cemento Portland con humo de sílice	90-99	--	--	1-10	--	0-5
CPG	Cemento con escoria granulada de alto horno	20-39	61-80	--	--	--	0-5

[2]

* Los valores de la tabla representan el % en masa.

** Los componentes minoritarios deben ser uno o más de los componentes principales, a menos que estén incluidos ya como tales en el cemento.

*** Los materiales puzolánicos incluyen: puzolanas naturales, artificiales y/o cenizas volantes.

**** El cemento Portland compuesto debe llevar como mínimo dos componentes principales excepto cuando se adiciona caliza, ya que, ésta puede ser en forma individual en conjunto con clinker yeso.

Nota: La reproducción de la norma ONNCCE es con fines educativos y no persigue ningún aspecto comercial.

* 2.- Norma Mexicana NMX-C - 414 - ONNCCE - 1999. "Industria de la Construcción - Cementos Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Prueba". Publicada en el Diario Oficial de la Federación el día 6 de Julio de 1999.

a) Resistencia Normal. La resistencia normal de un cemento, es la resistencia mecánica a la compresión a los 28 días y se indica por las clases resistentes, 20, 30 o 40. Esta subclasificación se indica a continuación en la tabla 1.5, designación normalizada en base al tipo de cemento y de acuerdo a la tabla 1.3.

b) Resistencia inicial. La resistencia inicial de un cemento viene siendo la resistencia mecánica a la compresión a los tres días; para indicar que un tipo de cemento debe cumplir con una resistencia inicial especificada se le agrega la letra R, después de la clase, solo se definen valores de resistencia inicial a 30 R y 40 R.

c) Tiempos de fraguado. Para todos los tipos de cementos y para todas las clases de resistencias se debe cumplir con las especificaciones de fraguado indicado en la tabla 1.5 .

d) Estabilidad de volumen. Para todas los tipos de cementos y para todas las clases de resistencias, se debe cumplir con las especificaciones de expansión y/o contracción indicado en la tabla 1.5 .

Tabla 1.5 Especificaciones Mecánicas y Físicas.

Clase Resistente	Resistencia a la compresión (N/mm ²)			Tiempo de fraguado (min)		Estabilidad de volumen en auto clave (%)	
	3 días	28 días		Inicial	final	Expansión	Contracción
	mínimo	mínimo	máximo	mínimo	máximo	máxima	máxima
20	- (*)	20	40	45	600	0.80	0.20
30	- (*)	30	50	45	600	0.80	0.20
30R	20	30	50	45	600	0.80	0.20
40	- (*)	40	--	45	600	0.80	0.20
40R	30	40	--	45	600	0.80	0.20

* Según las normas NMX-C-414- ONNCCE – 1999 (Ver sub inciso **b** del inciso **D**).

[2]

Nota: La reproducción de la norma ONNCCE es con fines educativos y no persigue ningún aspecto comercial.

* 2.- Norma Mexicana NMX-C – 414 - ONNCCE – 1999. "Industria de la Construcción – Cementos Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Prueba". Publicada en el Diario Oficial de la Federación el día 6 de Julio de 1999.

Ejemplos de designación normalizada:

- Un cemento portland ordinario de clase 40, con alta resistencia inicial = CEMENTO CPO 4R.
- Un cemento Portland con la adición de escoria, de clase resistencia 30 con una resistencia normal y resistencia de 40 % a los sulfatos = CEMENTO CPEG 30 RS.
- Un cemento Portland puzolánico de clase resistencia 30, con una resistencia normal, de baja reactividad alcali agregado y de bajo calor de hidratación = CEMENTO CPP 30 BRA/ BCH.

Los componentes principales de un cemento de buena calidad deben estar comprendidos dentro de los siguientes límites, ver la siguiente tabla 1.6 .

Tabla 1.6 Componentes Principales de los Cementos.

Componentes	Límites %	Promedio %
Cal (CaO)	62 - 65	63.5
Sílice (SiO ₂)	19 - 22	20.5
Alúmina (Al ₂ O ₂)	4 - 7	5.5
Oxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	2 -4	3.0
Magnesia (MgO)	1 -4	2.5
Trióxido de sulfuro (SO ₃)	1.5 - 2	1.75
Alcális (K ₂ O + Na ₂ O)	0.3 - 1	0.65
Agua y bióxido de carbono	1 -3	2.00

[1,3]

Los componentes de la tabla 1.6 al combinarse forman:

- Silicato tricálcico (3CaOSiO₂)
- Silicato Dicálcico (2CaOSiO₂)
- Aluminato Tricálcico (3CaOAl₂O₃)
- Ferroaluminato tetracálcico (4CaOAl₂O₂Fe₂O₂)

Nota: La reproducción de la norma ONNCCE es con fines educativos y no persigue ningún aspecto comercial.

* 1.- Saad, Miguel. Tratado de construcción vol. 1 (de. CECSA, México, 1964. 3a reimp. Págs. 204- 206, 207, 226.

* 3.- Herubin, Charles A. Basic Construcción Materials. Reston Publishing Company Inc., Virginia, U.S.A. , 1977. Págs. 166- 167.

De estos componentes químicos dependen las características de cada uno de los cementos y según sus proporciones que ocupan, ver tabla 1.4

E) MUESTREO. [2]

a) Procedimientos de muestreo. La obtención de muestras de cemento hidráulico se realiza después de que ha sido fabricado y está listo para ofrecerse en el mercado. Estos procedimientos deben hacerse para verificar si las muestras cumplen con las especificaciones establecidas y/o para efecto de certificación del producto. No son procedimientos de muestreo para propósito de control de calidad durante la fabricación.

b) Tipos y tamaño de las muestras. Una muestra de cemento tomada de un transportador, de un almacén a granel, de un saco o de un envío a granel en operación, se denominará como muestra puntual. Una muestra obtenida durante un intervalo de 10 min usando un equipo automático de muestreo que continuamente muestrea una corriente de cemento también puede denominarse muestra puntual. Las muestras de este tipo, tomadas a intervalos preestablecidos dentro de un periodo de tiempo, pueden integrarse para formar un compósito (integración de muestras en porciones iguales) representativo del cemento obtenido durante ese tiempo.

Todas las muestras, ya sean las puntuales o en compósito, deben pesar cuando menos 5 kg y deben obtenerse en las instalaciones del fabricante.

Las muestras se empacarán en contenedores a prueba de humedad y aire y deberán ser numeradas consecutivamente en el orden en que fueron tomadas (Se ha encontrado, eventualmente, que los contenedores de cloruro de polivinilo (PVC), afectan el potencial de inclusión de aire de una muestra de cemento. El mismo problema puede presentarse con contenedores hechos de otros plásticos).

c) Métodos de muestreo. El cemento podrá ser muestreado aplicando cualquiera de los métodos que se describen en esta sección.

Nota: La reproducción de la norma ONNCCE es con fines educativos y no persigue ningún aspecto comercial.

* 2.- Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999. "Industria de la Construcción - Cementos Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Prueba". Publicada en el Diario Oficial de la Federación el día 6 de Julio de 1999.

Del cemento envasado.

Insertar diagonalmente en la válvula de la bolsa el tubo muestreador, que consiste de dos tubos concéntricos de bronce con ranuras de registro que se abren o cierran por rotación del tubo interior, el tubo exterior tiene punta aguda para facilitar la penetración.

Entonces retirar el muestreador y tomar una muestra cada 5 t (toneladas), no deben tomarse muestras de los sacos rotos.

Muestreo en tolvas y/o camiones.

Cuando la profundidad del cemento a muestrear no exceda 2.10 m, se deben obtener las muestras con la ayuda de un tubo muestreador, el cual debe tener dimensiones entre 1.50 a 1.80 m de largo y aproximadamente 35 mm de diámetro exterior, dicho muestreador consiste en dos tubos concéntricos de bronce con ranuras de registro que se abren o cierran por rotación del tubo interior, el tubo exterior tiene punta aguda para facilitar la penetración en el cemento. Se deben tomar las muestras de puntos bien distribuidos y varias profundidades en el cemento, de tal forma que las muestras tomadas sean representativas.

Embarque sencillo.

Si solo se está llenando una tolva o camión y la carga es continua y todo de la misma fuente, tomar una muestra de 5 kg. Si dicho embarque no es continuo se deben mezclar 5 o más porciones de diferentes puntos de la carga para formar la muestra de prueba.

Embarques múltiples.

Cuando el embarque consiste de varias tolvas o camiones cargados de la misma fuente y el mismo día, muestrear el embarque, a razón de una muestra por cada 100 t (toneladas) de cemento o fracción, pero no tomar menos de dos muestras, mezclarlas para formar un compósito.

Nota: La reproducción de la norma ONNCCE es con fines educativos y no persigue ningún aspecto comercial.

F) METODO DE PRUEBA PARA DETERMINAR LA BLANCURA DE LOS CEMENTOS HIDRAULICOS (Según las normas NMX-C-414- ONNCCE – 1999) [2]

La blancura de un cemento blanco se determina por la medida de su reflectancia luminosa direccional para la luz blanca ($45^\circ / 0^\circ$), que se define por la relación existente entre el flujo luminoso que refleja una muestra iluminada con luz incidente de 45° y observada en dirección normal a su superficie (ángulo cero) y el flujo reflejado, en análogas condiciones, por la superficie de una muestra patrón de Carbonato de Magnesio, químicamente puro.

a) Aparatos y materiales.

Fotocolorímetro.

Para la determinación de esta característica, es preciso el uso de cualquier fotocolorímetro que puedan medir la reflectancia luminosa en las condiciones de iluminación y observación de la muestra indicadas en el párrafo anterior.

Molde.

El molde metálico que puede utilizarse para la preparación de la muestra debe de ser de un diámetro adecuado para que la muestra cubra el orificio que recibe la iluminación del fotocolorímetro. La altura del molde es de 5 mm (mínimo).

Chapa de vidrio.

Una placa de vidrio de 2 mm (mínimo) de espesor que se utiliza como tapa del molde de la muestra a preparar.

Balanza Analítica.

La balanza analítica tendrá una sensibilidad de 0.001 g (gramos).

Nota: La reproducción de la norma ONNCCE es con fines educativos y no persigue ningún aspecto comercial.

* 2.- Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999. "Industria de la Construcción - Cementos Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Prueba". Publicada en el Diario Oficial de la Federación el día 6 de Julio de 1999.

Carbonato de Magnesio.

Para la preparación de la muestra patrón ha de usarse Carbonato de Magnesio en polvo químicamente puro.

b) Procedimiento.

Preparación de la muestra patrón.

Se pesa la cantidad necesaria de Carbonato de Magnesio de acuerdo con el volumen a rellenar de la celda, de forma tal que la muestra comprimida tenga un peso volumétrico de 1.0 g/cm^3 . Se vierte el Carbonato de Magnesio en el molde y se coloca encima la placa de vidrio. A continuación se aplica presión manualmente hasta conseguir comprimir totalmente la muestra patrón (para los propósitos de esta prueba, el volumen de la celda se calibra llenándolo con agua destilada a $296 \text{ K} \pm 1.7 \text{ K}$, hasta un punto donde el menisco se extienda apreciablemente sobre la parte superior de la medida, colocando la placa de vidrio sobre la parte superior de la medida y dejando que el exceso de agua sea desplazado hacia afuera. La ausencia de burbujas de aire, vistas a través del vidrio, asegura que la medida este completamente llena. Se debe tener cuidado de que el exceso de agua sea limpiado de los lados del molde antes de pesar. Divida el peso del contenido de agua entre 0.9976 para determinar el volumen de la celda).

Preparación de la muestra de cemento.

Se emplea la misma técnica descrita en la tabla 1.3. El peso volumétrico de la muestra prensada ha de ser $1.8 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$.

Medición de la blancura. [2]

Siguiendo las instrucciones de funcionamiento del fotocolorímetro, se calibra el aparato a 100 con el valor que se obtenga para la medida de la reflectancia de la muestra patrón. A continuación se hará una medida similar sobre la muestra de cemento y el resultado obtenido da, directamente en tanto por ciento, la blancura de la muestra ensayada de acuerdo al procedimiento de la preparación de la muestra patrón.

Nota: La reproducción de la norma ONNCCE es con fines educativos y no persigue ningún aspecto comercial.

* 2.- Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999. "Industria de la Construcción - Cementos Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Prueba". Publicada en el Diario Oficial de la Federación el día 6 de Julio de 1999.

A continuación, se presenta la tabla 1.7, en donde se compara la resistencia de los diferentes cementos para edades de 1, 7, 28 y 90 días, mediante un curado en condiciones normales (humedad relativa del 85 al 95% y 23 °C).

Tabla 1.7 Resistencia a la Compresión del Cemento Según su Tipo.

Tipo de Cemento	Edad de los especímenes			
	1 día	7 días	28 días	3 meses
CPO	100%	100%	100%	100%
CPP	75%	85%	90%	100%
CPEG	190%	120%	110%	100%
CPC	55%	55%	75%	100%
CPS	65%	75%	85%	100%
CPG	50%	60%	70%	100%

[1,3,14]

1.1.2 Agregados.

Como se mencionó, se les llama agregados a aquellos materiales pétreos obtenidos a partir de la trituración de rocas de cantera, extraídos de depósitos fluviales o de origen volcánico como las andesitas, que se incorporan a la mezcla agua cemento o artificiales.

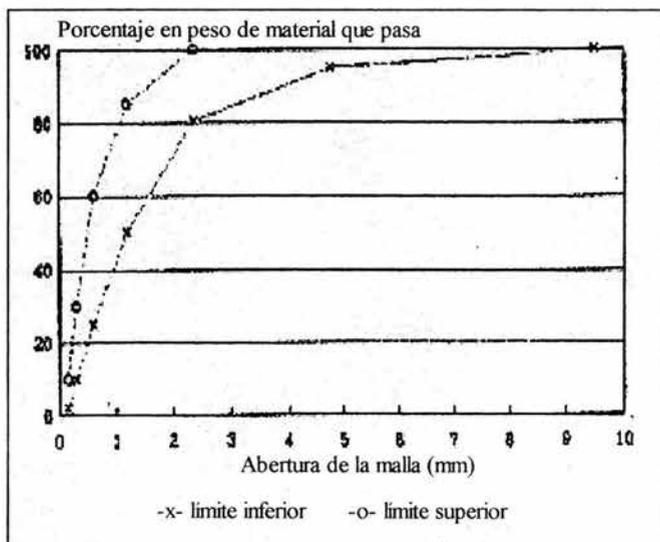
Son un factor económico de consideración, ya que su costo es bastante menor que el de la lechada; mientras más agregados tenga un concreto éste necesitará menos matriz, lo que redundará en la disminución de los costos. Sin embargo no debe menospreciarse el papel de la matriz, ya que ésta proporciona la cohesión entre los agregados y por ende la resistencia y durabilidad que tendrá nuestro concreto en su vida útil.

* 1.- Saad, Miguel. *Tratado de construcción* vol. 1 (de. CECSA, México, 1964. 3a reimp. Págs. 204- 205, 207, 226.

* 3.- Herubin, Charles A. *Basic Construcción Materials*. Reston Publishing Company inc., Virginia, U.S.A. , 1977. Págs. 166- 167.

* 14.- Waddell, Joseph J. *Concrete Construction Handbook*. Mc Graw- Hill, USA, 1974. Págs. 1-23.

La granulometría de dichos agregados es un factor muy importante, pues a una buena granulometría corresponde un menor porcentaje de vacíos y una menor cantidad de lechada para llenarlos. A continuación se presentan las gráficas granulométricas típicas para concreto, en donde se señalan los límites que deben regir para gravas y arenas.

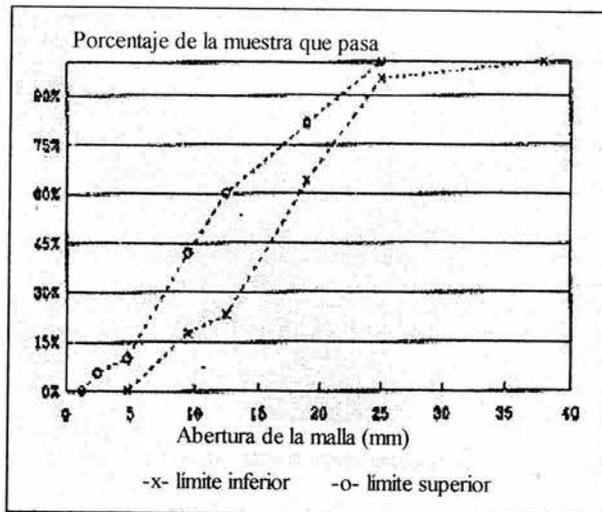


Gráfica 1.1 Granulometría para una arena con un módulo de finura de 3.12

[3,4]

* 3.- Herubin, Charles A. **Basic Construcción Materials**. Reston Publishing Company inc., Virginia, U.S.A., 1977. Págs. 166-167.

* 4.- **Apuntes de Construcción I Facultad de Ingeniería de la UNAM.**



Gráfica 1.2 Límites granulométricos para grava. Tamaño nominal de 2.5 cm. (1'').

[3,4]

La proporción entre la grava y la arena tendrá un efecto similar; así, un pequeño exceso de arena que impida que los granos de la grava entren en contacto unos con otros, propiciará que las gravas rueden unas sobre otras dando una mejor trabajabilidad. También la lechada deberá llenar los vacíos de los agregados; un exceso de ella impedirá que se toquen aumentando la facilidad de manejo del concreto.

Mientras más lechada se incluya en la mezcla ésta resultará más trabajable, hasta llegar a un punto en que empezará a perder la consistencia. Una buena proporción grava-arena y una granulometría adecuada darán como resultado una buena consistencia.

[4]

* 3.- Herubin, Charles A. Basic Construcción Materials. Reston Publishing Company inc., Virginia, U.S.A., 1977. Págs. 166-167.

* 4.- Apuntes de Construcción I Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Como los concretos ricos en cemento ya contienen una cantidad suficiente de finos, la adición de arena fina no es importante; ésta lo es solamente en casos de concreto con bajo contenido de cemento y con resultados no deseables como el agrietamiento.

La falta de finos, que se mencionó son necesarios para la buena trabajabilidad, puede suplirse con productos minerales finamente divididos, además de contar con la posibilidad de agregar una mayor cantidad de lechada.

[3,4]

Los agregados deberán tener una resistencia superior a la proyectada para el concreto, pues si está por debajo de ésta, no contribuirán, por lo que la matriz tendrá que adquirir una resistencia mucho mayor para absorber los esfuerzos que no toman los agregados; y si consideramos que la proporción entre matriz y agregados generalmente es de 1 a 4, veremos que en este caso no se consigue la resistencia buscada, sino a costa de una gran cantidad de cemento.

1.1.2.1 Arenas

Se conoce con el nombre de arenas a aquellos granos sueltos de estructura cristalina, que provienen de la desintegración de las rocas naturales, por procesos mecánicos o químicos, de depósitos naturales como son fluviales o de origen volcánico, y que poseen un tamaño de 0.06 a 6 mm.

Los morteros se dosifican de acuerdo con el objeto que se persigue. Cuando se requiere de una máxima resistencia e impermeabilidad es necesario que el agregado presente la máxima compacidad, o sea el mínimo porcentaje de vacíos; en cambio cuando solo se busca determinada resistencia, basta que la lechada sea la suficiente para cubrir la superficie de contacto de las partículas del agregado.

* 3.- Herubin, Charles A. *Basic Construcción Materials*. Reston Publishing Company inc., Virginia, U.S.A., 1977. Págs. 166-167.

* 4.- *Apuntes de Construcción I Facultad de Ingeniería de la UNAM.*

Las arenas de forma esférica, además de presentar una masa más compacta, proporcionan menor superficie de contacto, y menos superficie a recubrir con la lechada; por consiguiente, cuanto más se aproxime la forma de los granos a la esfera, tanto más compactos, resistentes y económicos resultarán los morteros.

Las mejores arenas para ser usadas en la elaboración del concreto son las de naturaleza sílica o cuarzo, pues éstas presentan una gran dureza y una buena estabilidad química. Las arenas calizas, solo podrán ser usadas si provienen de una caliza dura. Las arenas arcillosas se pueden emplear si la cantidad de arcilla es inferior al 3 %, pues éstos componentes alteran el fraguado y la plasticidad de la mezcla.

Es importante destacar que las características del concreto se ven afectadas por el grado de pureza de los agregados. Entiéndase por pureza a la escasa o nula presencia de material orgánico, sales o compuestos químicamente activos que perjudiquen el desarrollo normal de los procesos físico-químicos presentes entre el cemento y el agua. Así, no es recomendable el empleo directo de arenas de playón de río sin previo lavado, pues su alto grado de salinidad puede afectar nuestro concreto.

[1.3.4]

Las arenas no solo tienen un origen en depósitos naturales (playas de río, minas, etc.), sino que pueden ser elaboradas a partir de la trituración total de roca en los bancos de materiales con clasificación como material (C). En este caso, tanto su tamaño como su forma y pureza se encuentran controlados, por lo cual se les considera como material muy apto en la elaboración de concreto.

* 1.- Saad, Miguel. Tratado de construcción vol. 1 (de. CECSA, México, 1964. 3a reimp. Págs. 204-206, 207, 226.

* 3.- Herubin, Charles A. Basic Construcción Materials. Reston Publishing Company inc., Virginia, U.S.A., 1977. Págs. 166-167.

* 4.- Apuntes de Construcción I Facultad de Ingeniería de la UNAM.

1.1.2.2 Grava.

Las gravas o agregado grueso tiene un tamaño que varía con la clase de obra, empleándose desde 10 hasta 100 mm en las obras de concreto de masa ciclópea. Como ya se mencionó, el tamaño máximo de la grava está regido por la separación del acero de refuerzo (no debe ser mayor a 2/3 de ésta) o, en su defecto, por la menor dimensión del elemento, (no más de un quinto de la misma).

Al igual que las arenas, la masa de las gravas que presenta mayor compacidad, resistencia y plasticidad, es la que está constituida por partículas de forma aproximadamente esférica.

1.1.2.3 Agua

El agua a emplear debe ser limpia y libre de impurezas, aún cuando se toleran ciertos niveles de contaminación. Las impurezas deben afectar la velocidad del fraguado, la estabilidad volumétrica, la resistencia del concreto, causar decoloración de la masa y corrosión del acero de refuerzo.

Toda mezcla realizada con agua no potable, debe ser sometida a pruebas, siendo su resistencia a los 7 y 28 días cuando menos igual a un 90% de las que presente una mezcla similar hecha con agua pura.

Algunas de las impurezas más comunes, así como sus efectos y niveles de concentración en partes por millón (ppm) en el agua se presentan en la tabla 1.8

[3,4,11]

* 3.- Herubin, Charles A. Basic Construcción Materials. Reston Publishing Company Inc., Virginia, U.S.A., 1977. Págs. 166-167.

* 4.- Apuntes de Construcción I Facultad de Ingeniería de la UNAM.

* 11.- Nieto Juan José A. La Tecnología del Concreto Compactado con Rodillos. Construcción y Tecnología. Octubre, 1988. Pág. 16.

Tabla 1.8 Efecto de las Impurezas en el Agua.

Impurezas	N.C. ppm	Efectos.
Carbonatos y bicarbonatos de sodio y potasio	1000 en total	Acelera o retarda el fraguado.
Sales de magnesio, zinc, cobre.	1 % del peso del cemento	Reduce la resistencia a la compresión y genera variaciones en la velocidad de fraguado.
Agua marina	35,000	Corroe las varillas de acero no protegidas, puede ser usada en concretos no reforzados.
Hidróxido de potasio	1.2 % del peso del cemento.	Reduce los niveles de resistencia.

[11]

1.1.2.4 Aditivos

Los aditivos son sustancias que se introducen en el concreto durante el mezclado para mejorar una característica específica del concreto en su estado fresco o endurecido. Como su acción da una reacción química con el cemento, su dosificación se hace en proporción con el peso de éste. Los aditivos vienen generalmente en presentaciones líquidas o en polvos y se miden los primeros en volumen y los segundos en peso, ver tabla 1.9.

Tabla 1.9 Presencia de los Aditivos en el Concreto Hidráulico.

Reductores de agua	Estos aditivos reducen la cantidad de agua, por lo que con su uso se puede utilizar menor cantidad, pero se deberá disminuir la cantidad de cemento al mismo tiempo con la finalidad de mantener la relación agua-cemento constante.
Restauradores de fraguado	Se usan para prolongar el tiempo en que el concreto hidráulico puede ser colado, moldeado y vibrado o como una forma de retardar el fraguado.
Acclerantes	Estos se usan para lograr un resultado mas rápido en el fraguado del concreto hidráulico, es decir, cuando se desea que éste soporte algunos esfuerzos a edades tempranas, como lo es, el descimbrado o en aquellos casos en que el concreto puede ser dañado por algún agente externo, taponamiento de vías de agua y colados de puentes dentro del agua.

* 11.- Nieto Juan José A. La Tecnología del Concreto Compactado con Rodillos. Construcción y Tecnología. Octubre, 1988. Pág. 15.

1.2 Tipos de concreto y sus diferentes usos.

El concreto normal hecho con cemento Portland ordinario y agregados convencionales, sufre varias deficiencias. En busca de superarlas se han desarrollado diferentes concretos, con base a sus componentes o su forma de elaboración, los cuales se describen de manera breve a continuación.

1.2.1 Concreto de bajo peso específico

El Concreto de bajo peso específico es aquel que se puede usar como concreto normal, aunque tiene el inconveniente de su elevado costo. Esta hecho con agregados de bajo peso específico, por lo que la masa de éste reduce su peso hasta un 30% del concreto normal.

La resistencia que alcanza este tipo de concreto a los 28 días es de 17 Mpa y con un peso de 1850 kg/m³. El concreto se puede hacer con agregados de bajo peso específico o con la combinación de agregados normales y de bajo peso específico.

Desde el punto de vista de la trabajabilidad y otras características, es común usar arena como agregado fino, y limitar el tamaño nominal del agregado ligero a un máximo de ¾ de plg.

Las propiedades del concreto fresco para este tipo de concreto son esencialmente las mismas que para el concreto de peso normal; sin embargo, debido a la baja densidad y a la porosidad de sus agregados, se debe poner especial cuidado en la trabajabilidad del concreto. En general al colocarlo y compactarlo se necesita menos energía, por lo que un revenimiento de 5 a 8 cm es suficiente para obtener los resultados comparables de un revenimiento de 10 a 13 cm en un concreto de peso normal.

Debido al bajo peso de los agregados que se usan en este tipo de concretos se obtiene una segregación inversa, es decir, en un concreto con agregados normales si ponemos un exceso de mortero se puede presentar una segregación, en cambio, en el caso de concreto ligero los agregados flotan sobre el mortero.

[5]

* 5.- P. Kumar, Mehta. *Concrete Structure, Properties and Materials*, Prentice- Hall Inc. USA 1986. Págs. 347- 404.

Generalmente se usa concreto hecho con agregados ligeros para bajar el costo total de una construcción. Aún y cuando el costo de los agregados ligeros es mayor al de los agregados normales, el costo total de la estructura se puede reducir como resultado de la reducción del peso muerto, lo cual baja el costo de la cimentación.

1.2.2 Concreto de alta resistencia.

Para mezclas de concreto hechas con agregados normales, el concreto de alta resistencia se define como aquel que soporta una compresión mayor a 420 kg/cm^2 .

- 1.- Los concretos convencionales generalmente tienen un rango de falla a la compresión entre 200 y 420 kg/cm^2 . Para lograr un concreto que soporte más de 420 kg/cm^2 , se necesita un mayor cuidado de los materiales que componen al mismo.
- 2.- Estudios experimentales muestran que el comportamiento microscópico del concreto que sobrepasa una resistencia de 420 kg/cm^2 , es diferente a los concretos convencionales.

Cuando la trabajabilidad es adecuada la relación agua-cemento es la clave de la resistencia. Con una baja relación agua-cemento generalmente se observa una alta resistencia mientras que para una alta, se tienen valores bajos. Experimentos hechos revelan que para una relación agua-cemento de 0.38 , 0.36 y 0.34 la resistencia a la compresión es 420 , 530 y 630 kg/cm^2 , respectivamente. Sin embargo hay un problema, pues a medida que el contenido de agua baja se vuelve más difícil mezclar, colocar y compactar el concreto.

Para la producción de concreto de alta resistencia se deben usar aditivos de reductores de agua para alcanzar una buena trabajabilidad, esto explica la gran comercialización de los aditivos fluidificantes en los últimos años, sin los cuales sería muy difícil alcanzar la trabajabilidad adecuada.

Actualmente los concretos de alta resistencia que se producen en forma industrial tienen una resistencia a la compresión a 28 días de 560 a 770 kg/cm². Se han llegado a alcanzar concretos con una resistencia de 980 a 1400 kg/cm².

[5]

Varios investigadores han encontrado que debido a la baja permeabilidad del concreto de alta resistencia, éste presenta una buena resistencia a varios agentes físicos y químicos que normalmente deterioran al concreto. Sin embargo las aplicaciones industriales están limitadas a aquellos miembros estructurales que no estén expuestos a ciclos de congelación y deshielo.

1.2.3 Concreto de alta trabajabilidad.

El concreto de alta trabajabilidad es aquel que en su estado fresco posee un revenimiento del orden de 17.5 a 23 cm, el cual puede ser compactado con muy poca o ninguna energía de compactación; al mismo tiempo, es lo suficientemente cohesivo como para ser manejado y colocado sin que se presente segregación o sangrado.

Los químicos que se utilizan para alcanzar un revenimiento de éste tipo son caros; el uso de éstos puede incrementar el costo de la mezcla en un 10% por m³, pero con el incremento de este concepto se ahorra en la colocación y en la compactación de la mezcla, en resumidas cuentas los beneficios de utilizar este tipo de concretos son los siguientes:

- 1.- La colocación del concreto reduce la vibración de áreas cerradas por el acero de refuerzo y en áreas con un difícil acceso.
- 2.- Su rápida y fácil colocación sin necesidad de vibración es apropiada para colar losas, columnas y en general estructuras cuando el armado esté muy cerrado.
- 3.- Este tipo de concreto es muy fácil de bombearse.
- 4.- Produce una superficie lisa y uniforme cuando endurece la mezcla.

* 5.- P. Kumar, Mehta. *Concrete Structure, Properties and Materials*, Prentice- Hall Inc. USA 1986. Págs. 347- 404.

1.2.4 Concreto reforzado con fibras.

Aquel concreto que contiene cemento hidráulico, agua, agregados finos, gruesos y fibras discontinuas lo llamamos concreto reforzado con fibras. Este también puede contener puzolanas y otros aditivos como aquellos que se utilizan para el concreto normal. Las fibras son de varios tipos y tamaños, las cuales pueden ser de acero, plástico, vidrio y materiales naturales; de cualquier manera para propósitos estructurales y no estructurales las fibras que se usan con mayor frecuencia son las de metal.

Como sabemos, el concreto posee una baja resistencia a la tensión. Se pensó que agregando fibras al concreto o mortero se iba a incrementar ésta resistencia, pero resultados obtenidos por experimentos hechos con diferentes volúmenes y tamaños de fibras laminares las cuales se incorporaban al concreto o mortero, revelaron que las fibras no ofrecen un incremento importante en la resistencia del concreto a los esfuerzos de tensión y flexión.

[5]

Sin embargo, las pruebas que se han realizado a este tipo de concretos muestran que aún y cuando el esfuerzo de ruptura a la compresión del concreto sigue siendo aproximadamente el mismo que para el concreto simple, la tenacidad del concreto adicionado con fibras es mayor. Es por esto que este tipo de concretos llega a presentar una deformación mayor a la normal antes de la ruptura por tensión.

Las fibras de acero que normalmente se usan tienen un diámetro entre 0.2 y 0.8 mm (así como otros tipos de fibras), éstas pueden tener sus extremos rebordeados, aunque presentan mejores características aquellos cuyas fibras están rebordeadas. También se pueden usar fibras de vidrio las cuales tienen un diámetro de entre 0.0050 a 1.27 mm.

Al incorporar cualquier tipo de fibras al concreto se reduce la trabajabilidad del mismo, esta pérdida es proporcional al volumen concentrado de las fibras, más sin embargo, la colocación y compactación es mejor con una baja consistencia.

* 5.- P. Kumar, Mehta. Concrete Structure, Properties and Materials, Prentice- Hall Inc. USA 1986. Págs. 347- 404.

La contribución más importante de las fibras se refiere al incremento de la capacidad flexionante del concreto, y no de la capacidad para soportar esfuerzos de compresión. Relacionado a ésta se encuentra que la resistencia para soportar impactos y fatigas también aumenta considerablemente.

La durabilidad del concreto reforzado con fibras de acero depende de lo protegidas que estén estas del agua, por lo que al usar fibras de acero conviene hacer una mezcla de alta trabajabilidad y una buena compactación, para reducir los poros por los cuales pueda filtrarse el agua.

Las fibras de vidrio no pueden ser usadas en concretos y morteros hechos con cemento Portland, pues sus componentes químicos son alcalinos los cuales son atacados por los componentes de la pasta. Las fibras hechas con Zirconia y otras fibras alcalinas poseen mayor resistencia a la lechada, pero aún estas sufren deterioros con el tiempo.

[5]

1.2.5 Concreto compactado con rodillos.

El concreto compactado con rodillos es un tipo de concreto que tiene poco tiempo relativamente de haberse introducido en la pavimentación de carreteras. Se considera como un concreto sin revenimiento, el cual se transporta, coloca y compacta con la misma maquinaria que se utiliza para la pavimentación del concreto asfáltico y movimiento de tierras.

Los japoneses son quienes han construido más obras con éste tipo de concreto (sin olvidar que España ocupa el primer lugar mundial en kilómetros construidos -dos millones de Kms.- de carreteras y caminos aproximadamente con CCR) y de su experiencia nos indican que las principales ventajas de construir con este tipo de concreto son:

* 5.- P. Kumar, Mehta. Concrete Structure, Properties and Materials, Prentice- Hall Inc. USA 1986. Págs. 347- 404.

- 1.- El consumo de cemento es bajo.
- 2.- El tiempo de trabajo en campo es menor por el método de colocación.
- 3.- No se necesitan procesos para enfriar la masa del concreto.
- 4.- El costo por acarreo es menor que el normal, porque puede ser transportado por camiones de volteo, bandeado con motoconformadora y compactado con rodillos lisos metálicos.
- 5.- Los tiempos y movimientos de la maquinaria son mayores con este tipo de concretos.
- 6.- El tiempo de construcción puede reducirse considerablemente.

El concreto rodillado se diferencia principalmente del concreto normal en su consistencia requerida, pues ésta debe ser lo suficientemente seca como para evitar el sangrado cuando se compacta, lo suficientemente húmeda como para permitir una adecuada compactación y suficiente agua para hidratar el cemento Portland. Para este tipo de concretos lo que determina su resistencia, más que una adecuada relación agua-cemento, es el grado de compactación que se alcanza y éste ocurre cuando la mezcla es más húmeda al soportar a un rodillo compactador. En el siguiente capítulo se tratará de una manera más detallada este tipo de concreto.

CAPITULO II: CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO (CCR).

2.1 Antecedentes históricos.

2.1.1 Definición.

El CCR es un concreto elaborado con agregado grueso, arena, cemento (CPO), agua y aditivos (si es necesario). El tamaño máximo del agregado suele ser de $\frac{3}{4}$ de pulg. , aunque se han hecho mezclas con tamaños de $1\frac{1}{2}$ y 3 pulg. La principal diferencia con el concreto normal es que el CCR tiene una consistencia seca con cero revenimiento, y apariencia similar a la de una base estabilizada con cemento.

Se coloca con equipo pesado y se compacta mediante vibración externa utilizando un rodillo liso. Al endurecer adquiere aspecto y propiedades físicas semejantes a las del concreto convencional, pero usando una menor cantidad de cemento. Esto se logra gracias a un adecuado procedimiento de compactación.

2.1.2 Antecedentes.

Es muy probable que el CCR se haya originado en el otoño de 1923 en el camino Sheridan, Chicago (EU), donde se construyó una losa de concreto de 15 a 20 cms de espesor, construida con una técnica conocida como Pavimento de Concreto Comprimido "**Armorplated**", que consistía en una derivación del método vibrolítico de comprimir el aire y el exceso de agua de un concreto plástico utilizando la combinación de fuerzas de vibración y presión aplicadas simultáneamente lo cual deja una losa con una relación agua-cemento lo más baja posible, y produce un pavimento de resistencia y densidad máxima.

La elevada densidad y resistencia se lograba incrustando una cantidad específica de grandes pedazos de roca triturada. Luego se daba un acabado a la superficie distribuyendo uniformemente la delgada capa de mortero formada a partir del proceso de consolidación.

Sin embargo, a pesar de lo que pudo considerarse un gran adelanto en la tecnología de los pavimentos, quedó relegado a tal punto que no es sino hasta la década de los 70's (gracias a la crisis energética), cuando los proyectos de investigación en torno al CCR son retomados e impulsados.

Su declinación durante los años precedentes se debió a:

- a) El desarrollo de la pavimentadora deslizable para concreto asfáltico.
- b) El uso extensivo de materiales asfálticos para la construcción de caminos.

Con la creciente aplicación del CCR en la construcción de presas como: (Tarbela, Pakistán; Shimajigawa, Japón; Willow Creek, EU; Tucuri, Brasil; y más recientemente, Trigomil y La Manzanilla en México), se empezaron a construir muchas secciones de prueba para pavimentos.

Gracias a las investigaciones del grupo de Ingenieros de los EU, se encontró que los pavimentos de CCR competían ventajosamente contra aquellos de concreto asfáltico, debido al corto periodo de construcción y ahorros hasta de un tercio del costo de un pavimento convencional.

Hasta ahora la técnica de pavimentar con concreto compactado con rodillo ha sido empleada exitosamente en áreas de almacenamiento y caminos para camiones de carga pesada, así como en zonas de estacionamiento para aeronaves en aeropuertos. Su uso puede extenderse a la construcción de caminos secundarios o de bajo volumen de tráfico, lo cual ya se ha hecho en España con muy buenos resultados; extendiendo su empleo hacia la construcción de carreteras principales. En este caso, la superficie del CCR se cubre con una capa de asfalto para lograr que los vehículos pueden desarrollar altas velocidades.

Además, la transición entre pavimentación asfáltica y pavimentación con CCR es relativamente similar, ya que, se puede utilizar el mismo equipo con reducido grupo de personas.

La tecnología del CCR hace atractiva la inversión en obras de construcción de carreteras así como en obras medianas de abastecimiento y captación de aguas para riego y generación de energía tanto en costo como en tiempo, al acelerar los términos de recuperación y reducir los costos financieros de construcción como ya se indicó; además de facilitar el atractivo meramente político que permite entregar obras terminadas en el breve plazo de las administraciones federal, estatal y municipal.

Con la aparición del CCR como procedimiento de construcción y de los métodos de diseño para determinar el estado de esfuerzos y deformaciones en cualquier punto de una pavimentación, es posible ensayar variantes de la geometría del terreno con el objeto de que sean seguras y funcionales, construidas a un costo menor y en un tiempo más corto.

A fin de que el diseñador cuente con los elementos necesarios para lograr un proyecto adecuado de las estructuras, es indispensable realizar estudios geotécnicos en el sitio.

Los estudios geotécnicos determinarán los parámetros mecánicos indispensables para el diseño, como son el módulo de elasticidad, la relación de Poisson y la resistencia al esfuerzo cortante del suelo que soporte la carpeta.

[6,7]

Estos parámetros se obtendrán de preferencia en el campo con procedimientos plenamente conocidos, por ejemplo, los ensayos de placa, el gato Goodman y el corte directo; o bien, en laboratorio por medio de los métodos convencionales. Así mismo se pueden disponer los requerimientos de resistencia que debe cumplir el concreto. También será necesario realizar estudios sobre los materiales que se vayan a emplear a fin de asegurar una determinada calidad cumpliendo con los requisitos especificados por el diseño y que conduzcan a la solución económica más conveniente.

Una vez elegidos los materiales, se llevarán a cabo pruebas de tramos en carreteras, con la finalidad de obtener los valores óptimos del peso volumétrico, la resistencia al esfuerzo cortante, el módulo de elasticidad y la relación de Poisson del CCR para su aplicación en las obras de que se trate.

Con la información de laboratorio y de campo será posible verificar el diseño preliminar y definir la sección del pavimento con el factor de seguridad deseado.

* 6.- Gómez Domínguez, Jorge. Construcción de caminos de bajo volumen con CCR. Concreto Compactado con Rodillos. Curso IMCYC. Octubre, 1988. Págs. 23-28.

* 7.- Treviño S., José. Construcción y Tecnología. IMCYC. Octubre, 1988.

El análisis de estos resultados permitirá elaborar las especificaciones de construcción, y además, establecer el criterio de control de calidad necesario para garantizar que la construcción del camino se apegue a lo considerado en el diseño.

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

Las experiencias que se han tenido en México en la construcción de pavimentos de CCR se desarrolla en el capítulo V. Bastará por el momento mencionar que se han construido al menos varios tramos cortos del sistema carretero en los Estados de Durango, Nayarit, Morelos, y Veracruz; así también en áreas urbanas como en el estado de Durango, Baja California, Chihuahua y Edo. De México, así como en áreas industriales en los Estados de Tamaulipas, Michoacán y Veracruz.

2.2 Materiales que lo componen.

Los materiales usados en la elaboración del CCR son básicamente los mismos que en el caso del concreto convencional, aunque sus requerimientos difieren un poco, pues el CCR necesita una menor cantidad de cemento, menor cantidad de agua y límites de granulometría mayores. Esto es debido a que el concreto convencional usualmente se emplea en elementos con armado cerrado, por lo que deberá tener una fluidez y tamaño de agregados adecuado para rellenar todos los espacios del volumen en cuestión. En contraste, el CCR, por ser utilizado en elementos amplios en los pavimentos y ser compactado mediante rodillos vibratorios no requiere de fluidez. En consecuencia los agregados que podemos incluir en una masa de CCR son mayores.

[7]

* 7.- Treviño S., José. Construcción y Tecnología. IMCYC. Octubre, 1988.

A continuación se detallan las características de los materiales que constituyen al CCR como cementantes, gravas, arenas, agua y aditivos.

2.2.1 Cementantes.

El tipo y cantidad de cemento Portland puzolánico (CPP), requeridos en la mezcla dependen del volumen de la estructura, de la agresividad del medio y del tipo de propiedades que se quieran resaltar. Por otro lado hay que considerar la generación de calor de hidratación al momento de reaccionar el cemento con el agua.

El contenido de cemento (CPP), varía usualmente entre los 60 kg/m³ y los 248 kg/m³, siendo el valor medio común de 130 kg/m³. Las puzolanas incrementan en un 20 ó 30% el peso de los materiales cementantes.

Cemento Portland Puzolánico.

El desarrollo de esfuerzos internos en el concreto es, en principio, directamente proporcional a la cantidad de calor generada por la hidratación de cemento, aún cuando a la larga estos esfuerzos resulten ser mayores en los concretos con baja generación de calor.

Para carreteras, el ministerio de España recomienda el empleo de cementos Portland puzolánicos o bien cementos mixtos donde el clinker de Portland esté en proporción de 20 a 60% en masa, la carga mineral caliza en proporción de 5% en masa y presencia de cenizas volantes.

Puzolanas.

Se define a la puzolana como un material silícico o silícico y aluminico que carece en sí mismo de valor cementante, pero que finalmente pulverizado y en presencia de agua, puede reaccionar con hidróxido de calcio a las temperaturas ordinarias y formar un compuesto cementante.

La selección de ésta para el CCR debe seguir los criterios comunes y considerar el efecto que puede producir en el concreto, así como las cantidades necesarias y su disponibilidad.

Como las puzolanas necesitan de humedad para reaccionar con el hidróxido de

calcio, se infiere que tendrán un mejor comportamiento en mezclas con altos contenidos de humedad que en aquellas casi secas.

En la mayoría de las mezclas para CCR en las que se incluye puzolana, se opta por la ceniza volante [fly ash] tipo F (con bajo contenido de óxido de calcio). Además, las cantidades de carbón que se agregan a la ceniza deben limitarse en tal forma que no afecten las propiedades de esfuerzo del CCR.

Otros tipos de cenizas volantes han sido empleados con éxito, por ejemplo las del tipo C (alto contenido de óxido de calcio), arcilla calcinada o escorias.

Las cenizas volantes, subproducto de la utilización del carbón mineral no coquizable en las plantas carboeléctricas, se utilizan en un porcentaje máximo del 6% con respecto al peso de la grava y la arena.

La puzolana [fly ash] ha sido empleada para sustituir porciones de cemento, resultando tanto un incremento en la trabajabilidad del concreto, así como un abatimiento de los costos.

[10]

2.2.2 Agregados.

Tanto para el CCR como para el concreto convencional la calidad de los agregados y su graduación son factores muy importantes. Los agregados pueden ser producto de la explotación de depósitos naturales en los cauces de los ríos, o bien, producto de la explotación y la trituración de canteras de roca, en cuyo caso se tiene la ventaja de poder controlar su granulometría. Las gravas y arenas se almacenan clasificándolas y separándolas de manera que no se mezclen entre sí, a fin de obtener la granulometría del proyecto.

La segregación del agregado grueso hacia el fondo del CCR, debido a peso propio, transporte y colocación del mismo, ha influido para que se considere una reducción del tamaño máximo de la grava a 2 pulg y se incremente la cantidad de arena en un 35 o 40%.

* 10.- Pittman, White. Concreto Compactado con Rodillo. Curso IMCYC. Octubre, 1988. Págs. 44 -46.

Muchas mezclas de CCR contienen porcentajes de finos mayores que el concreto convencional, especialmente si los finos son no plásticos, llenando los huecos del agregado, disminuyendo la cantidad de agua requerida y mejorando la compacidad.

[11]

Todo esto nos hace reconocer la importancia que tiene el control de una granulometría adecuada, la cual resulta de hecho en ahorros de costos significativos, debido a la necesidad de emplear menos cemento para rellenar los huecos entre los agregados.

El tamaño nominal máximo empleado en CCR ha sido de 3 pulg (75 mm) y para éste se ha distinguido cuatro grupos: 1.5 a 3 pulg (38 a 75 mm), $\frac{3}{4}$ a 1.5 pulg (19 a 38 mm), criba N° 4 a $\frac{3}{4}$ de pulgada (4.75 a 19 mm) y partículas menores a la criba N° 4, es decir, arena y materiales finos.

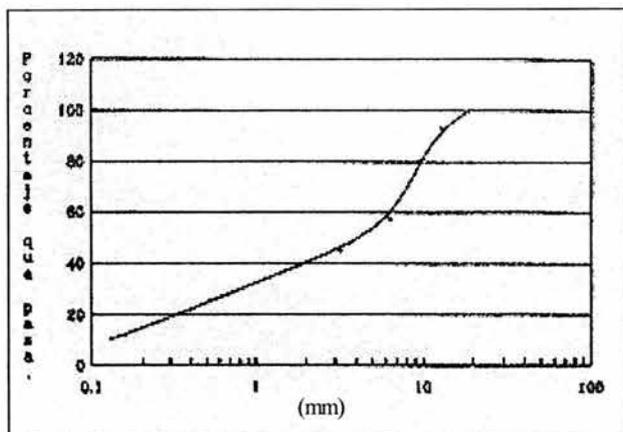
La cantidad de arena ronda entre el 30 y 35% del agregado total, aunque como se dijo, ésta puede ser llevada hasta un 40% del total. Los finos que pasan la malla N° 200 (0.075 mm) están limitados a un 3 % del total, en peso, de los agregados, sobretodo si hay la presencia de una elevada cantidad de puzolana. En muchas ocasiones los agregados no lavados son adecuados para la mezcla de CCR.

La cantidad de finos no plásticos se ubica entre un 1.5 a un 10% del total. La presencia de finos plásticos (o sea, aquellos con un límite líquido mayor a 25 y un índice plástico mayor de 5, es menor del 4%).

[10]

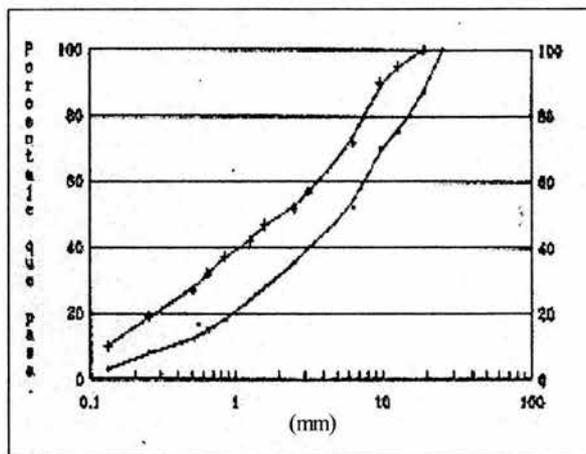
* 10.- Pittman, White. Concreto Compactado con Rodillo. Curso IMCYC. Octubre, 1988. Págs. 44 -46.

* 11.- Nieto Juan José A. La Tecnología del Concreto Compactado con Rodillos. Construcción y Tecnología. Octubre, 1988. Pág. 15.



Gráfica 2.1 Granulometría Típica para Pavimentos de CCR.

[11]



**Gráfica 2.2 Del Criterio de Granulometría para CCR
Cuerpo de Ingenieros USA.**

[9]

* 9.- Corro, Santiago. Estudio del concreto compactado con rodillo, para su aplicación en carreteras. Primera y Segunda partes. SCT- Instituto de Ingeniería, UNAM. México, Noviembre, 1991. Págs. 66-74.

* 11.- Nieto Juan José A. La Tecnología del Concreto Compactado con Rodillos. Construcción y Tecnología. Octubre, 1988. Pág. 16.

Las mezclas de CCR que contienen montos significativos de arcillas finas (esto es, de finos plásticos) han mostrado una demanda muy alta de agua, además de una actividad superficial frente a arcillas minerales. La mayor cantidad de agua induce a la contracción del CCR con lo cual se reduce su resistencia.

Por esto se recomienda usar finos no plásticos, y únicamente en la cantidad requerida para disminuir el consumo de agua y mejorar la compresibilidad de la mezcla. Tal cantidad varía del 4 al 10% del peso total de los agregados, según el tipo de concreto. En caso de que se detecte la presencia de finos plásticos, es recomendable lavar el material para retirar las partículas que pasan la malla N° 200.

La calidad requerida de los agregados depende de las características deseadas en el CCR, especialmente su resistencia. Para altas resistencias, una muy buena calidad de los agregados es indispensable, en cambio, si el CCR no se ve sometido a esfuerzos muy grandes o condiciones climáticas adversas (por ejemplo, heladas continuas) basta con usar agregados de baja o media calidad.

Las pruebas estándar para determinar las características de los agregados se mencionan a continuación:

[9]

* 9.- Corro, Santiago. Estudio del concreto compactado con rodillo, para su aplicación en carreteras. Primera y Segunda partes. SCT- Instituto de Ingeniería, UNAM. México, Noviembre, 1991 Págs. 65-74.

Tabla 2.1 Pruebas Estandar para Agregados.

Característica	Significado	Prueba N°	Nombre
Granulometría	Consistencia, compactabilidad	ASTM C136 ASTM C117	Granulometría
Resistencia a la abrasión	Calidad del agregado	ASTM C131 ASTM C535 ASTM C295	Resistencia a la abrasión y el impacto. Petrografía
Peso específico y absorción.	Dosificación	ASTM C127 ASTM C128	Peso específico y absorción.
Densidad	Dosificación	ASTM C29	Peso unitario
Resistencia al sulfato	Resistencia al intemperismo y acción química.	ASTM C88	Resistencia a la acción química.
Impurezas orgánicas		ASTM C40	Impurezas orgánicas

[8]

Agua.

El contenido de agua se determina con base en consideraciones de trabajabilidad, compactabilidad y la necesidad de obtener la máxima densidad.

Debe estar libre de excesivas cantidades de álcalis, ácidos y materia orgánica, los cuales afectan los niveles de resistencia del concreto. La mayor parte de las mezclas de CCR requieren, para un tamaño nominal máximo de 3.5 cm., de entre 89 y 119 lt. de agua por metro cúbico de concreto.

Al respecto puede aplicarse todo lo dicho para el concreto convencional, véase tabla 1.8.

Aditivos.

El empleo de aditivos en el CCR produce el mismo tipo de efectos que en el concreto convencional, a condición de volver un poco menos consistente la mezcla de CCR.

* 8.- Hansen, Kenneth D. Roller-Compacted Concrete Dams. Ed. Mc Graw-Hill. Págs. 1-28, 47-63.

Algunas ventajas en el empleo de aditivos se refieren a un acabado más fino de la superficie del pavimento tras la compactación. Se ha observado que una inadecuada aplicación y proporcionamiento de los aditivos, así como el contenido de finos y bajos niveles de humedad influyen negativamente en los efectos que se buscan al añadir aditivos. Se obtienen mejores resultados cuando la mezcla tiene contenidos de humedad mayores.

[9]

2.2.3 Dosificación y mezclas.

La dosificación del CCR es similar a la de un concreto convencional pero con algunas modificaciones. El diseño de mezclas para concreto rodillado no depende directamente de determinar las relaciones agua-cemento apropiadas para obtener la resistencia y la trabajabilidad requeridas ni tampoco las relaciones grava-arena, como ocurre en el caso del concreto convencional, sino más bien del tipo y tamaño máximo de agregado, con el fin de lograr una adecuada compactación, que es el caso de las carreteras, una superficie de rodamiento aceptable.

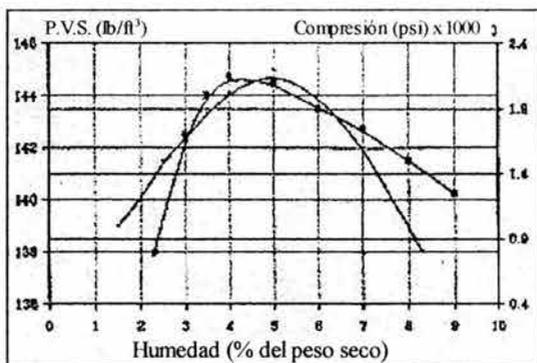
Considerando que el CCR tiene un revenimiento igual a cero, es necesario hallar algún otro método para medir la consistencia de la mezcla con el fin de proveer un parámetro cuya utilidad sea semejante al revenimiento del concreto usual.

Uno de estos métodos emplea un aparato VeBe, con el cual se vibra un cono de cero revenimiento con un peso en su corona y dentro de un cilindro con cabeza ajustable. La medida de la consistencia es el tiempo (en segundos), que tome debilitar el cono. Las pruebas de laboratorio han conducido a la elaboración de tablas para dosificar el CCR semejantes a las del concreto convencional.

Otra tendencia relativa a la dosificación del CCR es la de llevar un control de la cantidad de agua usada para alcanzar la densidad máxima, empleando una prueba Proctor Modificada, lo cual se explicará más adelante. La razón de esto es que el esfuerzo flexionante del CCR se incrementa con la densidad, alcanzando ésta un máximo bajo un determinado contenido de humedad.

* 9.- Corro, Santiago. Estudio del concreto compactado con rodillo, para su aplicación en carreteras. Primera y Segunda partes. SCT- Instituto de Ingeniería, UNAM. México, Noviembre, 1991 Págs. 65-74.

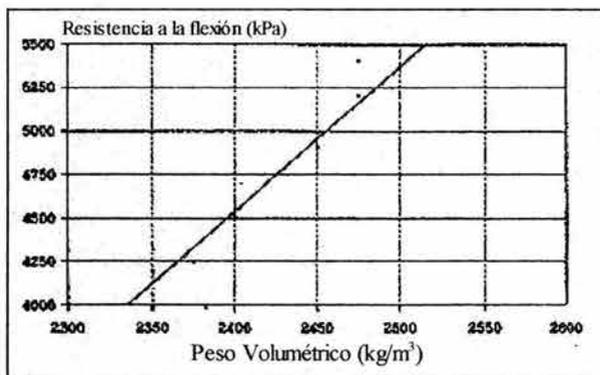
Peso Volumétrico vs. Resistencia a los 7 días



[9]

Gráfica 2.3 Resistencia- Humedad.

Relación entre Resistencia y Densidad para el CCR.

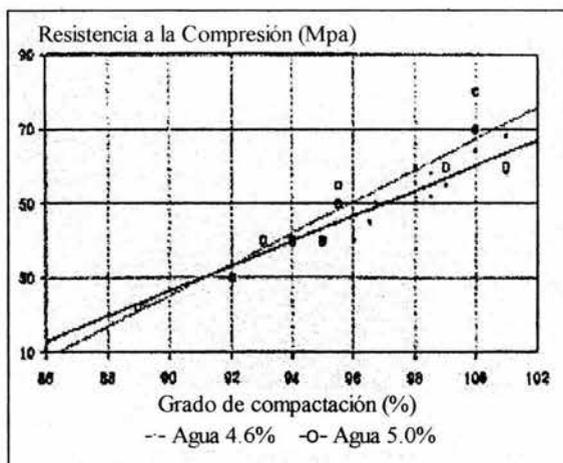


Gráfica 2.4 Flexión- Densidad

[9]

* 9.- Corro, Santiago. Estudio del concreto compactado con rodillo, para su aplicación en carreteras. Primera y Segunda partes. SCT- Instituto de Ingeniería, UNAM. México, Noviembre, 1991. Págs. 66-74.

Relación entre Grado de Compactación y Resistencia del CCR a los 28 Días



[9]

Gráfica 2.5 Compresión-Densidad

El ACI (American Concrete Institute) ha elaborado una serie de recomendaciones para el proporcionamiento del concreto con revenimiento cero (ACI 211.3-75) mismas que se transcriben a continuación.

La trabajabilidad de este tipo de concreto se puede medir con varios aparatos, entre los que destaca el VeBe, que consiste, en una mesa vibratoria, un contenedor de mezcla, un cono de revenimiento, una placa de plástico, un peso de sobrecarga y una sobrecarga y una referencia. La medida de la consistencia es el tiempo de vibrado en segundos necesario para cambiar la forma de cono truncado de concreto fresco, dejado por el cono de revenimiento en una forma cilíndrica con una superficie superior a nivel.

* 9.- Corro, Santiago. Estudio del concreto compactado con rodillo, para su aplicación en carreteras. Primera y Segunda partes. SCT-Instituto de Ingeniería, UNAM. México, Noviembre, 1991 Págs. 66-74.

Como se ilustra en la tabla 2.2 y 2.3, si consideremos la cantidad de agua requerida para lograr un revenimiento de 7.5 a 10 cms como 100%, el contenido aproximado necesario para otras consistencias sería:

Tabla 2.2 Contenidos de Agua para CCR.

Consistencia	Contenido de agua, en %	
	Thaulow	ACI 211.1
-Extremadamente seco	78	-
-Muy rígido	83	-
-Rígido	88	-
-Rígido plástico	93	92
-Plástico	100	100
-Fluido	108	106

[9]

NOTA: Los conceptos de la primera columna pueden no ser claros debido a la falta del parámetro para diferenciar unos de otros. Esto se verá en la tabla 2.3.

El comité ACI considera que, aunque la experimentación es limitada, es suficiente para recomendar los contenidos de agua de la tabla 2.3 como contenidos aproximados.

* 9.- Corro, Santiago. Estudio del concreto compactado con rodillo, para su aplicación en carreteras. Primera y Segunda partes. SCT- Instituto de Ingeniería, UNAM. México, Noviembre, 1991 Págs. 65-74.

Tabla 2.3 Requerimientos Aproximados de Agua para Diferentes Consistencias y Tamaños Máximos de Agregado.

Descripción	Consistencia		Contenido relativo de agua en (%)	Agua (kg/m ³) para el tamaño máximo y la consistencia dadas.				
	rev. (cm.)	VeBe (seg)		3/8"	1/2"	3/4"	1.0"	1.5"
Mezclas sin aire incluido								
Extremadamente seca	---	32-18	78	104	99	90	85	80
Muy rígida	---	18-10	83	109	110	99	90	85
Rígida	0-2.5	10-5	88	116	113	104	99	90
Rígida-Plástica	2.5-7.5	5-3	92	121	116	109	104	95
Plástica	7.5-13	3-0	100	133	126	118	113	104
Fluido	13- 18	---	106	142	133	125	118	109
Mezclas con aire incluido								
Extremadamente seca	----		78	92	87	81	78	73
Muy rígida			83	99	90	87	81	78
Rígida			88	104	99	90	87	81
Rígida-Plástica			92	106	102	97	94	87
Plástica			100	118	113	106	102	95
Fluido			106	126	120	113	107	100

[9]

Estas cantidades de agua son para el cálculo de cemento de bachadas de prueba. Si se requiere más agua, se debe incrementar el cemento para mantener constante la relación A-C. Si se requiere menos agua el cemento se debe mantener constante.

2.2.4 Selección de proporcionamiento.

El concreto deberá ser colocado usando la cantidad mínima de agua, consistente en el mezclado, colocación y consolidación y requerimientos de terminado, puesto que, esto tendrá efectos favorables en la resistencia, durabilidad y otras propiedades físicas.

* 9.- Corro, Santiago. Estudio del concreto compactado con rodillo, para su aplicación en carreteras. Primera y Segunda partes. SCT- Instituto de Ingeniería, UNAM. México, Noviembre, 1991. Págs. 65-74.

2.2.5 Revenimiento y tamaño máximo de agregado.

El revenimiento empleado depende el tipo de trabajo, instalaciones, equipo y procedimiento de construcción. Se recomienda, siempre que sea posible, el empleo de las consistencias más secas, adecuadamente compactadas, ya que, se obtendrá un producto mejor y más económico.

Estimación de los requerimientos de agua.

La cantidad de agua requerida para lograr una mezcla de una consistencia dada depende del tamaño máximo del agregado, forma de partícula, granulometría, aire incluido y otras variables. Las cantidades mostradas en la tabla 2.3 son suficientes para una estimación preliminar. Si con una combinación dada de materiales se considera necesario incrementar esa cantidad de agua, el contenido de cemento se deberá aumentar en la misma proporción.

Selección de la relación agua-cemento.

En la tabla 2.4 se muestran las relaciones agua- cemento máximas permitidas para varios tipos de estructuras y condiciones ambientales.

Tabla 2.4 Relaciones Agua-Cemento para CCR en Ambientes Severos. Durabilidad.

	Estructuras húmedas continua o frecuentemente y expuestas a congelación o deshielo.	Estructuras expuestas al agua de mar o sulfatos.
Secciones delgadas	0.45	0.40
Oras estructuras	0.5	0.45

[9]

Además de las condiciones de durabilidad que determina la tabla anterior, la relación agua- cemento determinada por requerimientos de resistencia se obtiene, de manera aproximada, con la siguiente tabla:

* 9.- Corro, Santiago. Estudio del concreto compactado con rodillo, para su aplicación en carreteras. Primera y Segunda partes. SCT- Instituto de Ingeniería, UNAM. México, Noviembre, 1991 Págs. 66-74.

Tabla 2.5 Relación Agua-Cemento para CCR con Base en la Resistencia.

Resis. a la compresión a los 28 días (kg/cm ²).	Relación agua- cemento en peso	
	Concreto s/aire incluido	Concreto c/aire incluido
500	0.33	-
400	0.41	0.32
350	0.48	0.40
250	0.57	0.48
200	0.68	0.59
150	0.82	0.74

[9]

Usando la relación agua-cemento obtenida en las dos tablas anteriores y la cantidad de agua dada por la tabla 2.3, se puede calcular la cantidad de cemento requerida. Si las especificaciones del trabajo marcan la cantidad mínima de cemento, se calcula la relación agua- cemento dividiendo la cantidad de agua obtenida en la tabla 2.3 entre la cantidad de cemento especificada; se selecciona agua-cemento mínima, entre la de las tablas por durabilidad, resistencia o la calculada por especificación de obra.

Estimación de la cantidad de agregado grueso.

Se debe emplear la mayor cantidad de agregado grueso consistente con los requisitos de trabajabilidad. La mejor forma de establecer esta cantidad es con ensayos de laboratorio. Las tablas 2.6 (a) y (b) dan una idea del porcentaje requerido.

* 9.- Corro, Santiago. Estudio del concreto compactado con rodillo, para su aplicación en carreteras. Primera y Segunda partes. SCT- Instituto de Ingeniería, UNAM. México, Noviembre, 1991 Págs. 65-74.

Tabla 2.6 (a) Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto de consistencia plástica (3 a 5 plg. rev.).

Tam. agregado	Max..	Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto para varios módulos de finura de la arena.			
		2.40	2.60	2.80	2.90
$\frac{3}{8}$		0.50	0.48	0.46	0.44
$\frac{1}{2}$		0.59	0.57	0.55	0.53
$\frac{3}{4}$		0.66	0.64	0.62	0.60
1		0.71	0.69	0.67	0.65
1 $\frac{1}{2}$		0.75	0.73	0.71	0.69
*ASTM C29					
Estos valores son para concreto tradicional (plástico con 3 a 5 plg., de revenimiento). Para consistencias más rígidas el contenido de agregado grueso se incrementa notablemente.					

[9]

* 9.- Corro, Santiago. Estudio del concreto compactado con rodillo, para su aplicación en carreteras. Primera y Segunda partes. SCT-Instituto de Ingeniería, UNAM. México, Noviembre, 1991 Págs. 66-74.

Tabla 2.6 (b) Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto para diferentes consistencias. *

Descripción	Consistencia				Volumen de agregado**				
	rev. (cms)	VeBe (seg)	Tabla de caída Revol.	Factor de compact.	3/8	1/2	3/4	1	1 1/2
Extremadamente seca	---	32-18	112-56	---	190	170	145	140	130
Muy rígida	---	18-10	56-28	0.70	160	145	130	125	125
Rígida	0-2.5	10-5	28-14	0.75	135	130	115	115	120
Rígida- Plástica	2.5-7.5	5-3	14-7	0.85	108	106	104	106	109
Plástica	7.5-13	3-0	<7	0.91	100	100	100	100	100
Fluido	13-18	---	---	0.95	97	98	100	100	100

* Basado en pruebas en concreto sin aire incluido, hechos con arena natural de módulo de finura 2.90 y grava redondeada con algo de material triturado.
 ** Rodillado en seco, por unidad de volumen de concreto para los tamaños máximos de agregados mostrados.
 La información de estas tablas se prevé como una base para estimar la proporción de agregado grueso de la primera mezcla de prueba.

[9]

Cabe indicar que experiencias en la Universidad de Purdue señalan que el CCR presenta en el laboratorio características de resistencia muy superiores a las del concreto convencional. Una adecuada preparación del CCR puede solo reducir significativamente la cantidad de cemento empleado, sino también incrementar en un 50% el valor del módulo de ruptura del concreto convencional, véase tabla 2.7

* 9.- Corro, Santiago. Estudio del concreto compactado con rodillo, para su aplicación en carreteras. Primera y Segunda partes. SCT- Instituto de Ingeniería, UNAM. México, Noviembre, 1981 Págs. 65-74.

Tabla 2.7 Proporciones para CCR (kg/m³), -Según la Universidad de Purdue.

	Agregado grueso ½ pulgada			Agregado grueso 1 pulgada		
	I	II	III	IV	V	VI
W/C	0.30	0.40	0.50	0.30	0.40	0.50
C	165	125	102	136	104	85
W	50	50	51	41	41	42
S	431	463	480	391	382	396
G	792	792	792	931	931	931

[6] **w=agua** **c=cemento** **s=arena** **g=grava**

NOTA: Las resistencias más elevadas correspondieron a los tipos I y IV. El agregado se considera en estado seco.

Las mezclas de CCR se diseñaron siguiendo las recomendaciones del comité ACI 207 "Concreto compactado con rodillos".

[6]

Manejo de la mezcla

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

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

* 6.- Gómez Domínguez, Jorge. Construcción de caminos de bajo volumen con CCR. Concreto Compactado con Rodillos. Curso IMCYC. Octubre, 1988. Págs. 23-28.

El concreto se colocará dentro de los treinta minutos siguientes al mezclado, en forma continua, empleando el tiempo mínimo para impedir la pérdida de agua o que se formen juntas frías. Cuando el material se encuentra en estas condiciones, deberá removerse.

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

Los cambios volumétricos potenciales ocasionados por la pérdida de humedad o la contracción por secado son significativamente menores en el concreto rodillado, debido a que su relación agua-cemento de mezclado es menor que en el concreto convencional.

Los cambios volumétricos ocurridos por la disipación del calor de hidratación también son reducidos, en razón del menor contenido de cemento y posiblemente al método de colocación, puesto que el concreto convencional se coloca en capas de 45 a 60 cm de espesor, mientras que el CCR es colocado en capas sucesivas y uniformes cuyo espesor puede variar entre 20 y 30 cm., Las capas delgadas permiten una mejor disipación de calor.

Otras aplicaciones del CCR además de los pavimentos podrían ser en construcción de presas, cimentaciones masivas para diversas estructuras, revestimiento de canales y construcción de bordos y diques.

2.3 Características físicas y mecánicas.

2.3.1 Propiedades del CCR.

Las propiedades del CCR en el sitio dependen de la calidad de los materiales empleados, la dosificación y el grado de compactación y consolidación de la mezcla. Debido a la gran variabilidad en cuanto a materiales y proporciones usados en la fabricación del CCR, no es posible obtener valores típicos para todas las mezclas aunque puede decirse que son similares a los del concreto convencional y como éste depende de las características de los agregados.

También la compactación juega un papel importante en el resultado final ya que usualmente se tiene un porcentaje de vacíos mayor al 2% producidos por una cantidad insuficiente de mezcla para cubrirlos. Una buena compactación tiende a disminuir estos vacíos, incrementando la densidad y la resistencia del CCR.

Agregados pobremente graduados o con un alto porcentaje de grava darán mezclas con elevados porcentajes de vacíos y baja densidad. Sin embargo, ello no impide que todos los agregados estén cementados entre sí.

La compactación por rodillo de una mezcla de CCR con revenimiento cero, da lugar a un material anisotrópico, esto es, que sus propiedades permanecen constantes independientemente de la dirección en que se midan.

Por otro lado, el peso unitario o densidad del concreto depende primeramente del peso específico [specific gravity] del agregado y de la cantidad de vacíos en la estructura del CCR. Usualmente, el peso unitario del CCR es mayor que el de un concreto convencional elaborado con agregados de características similares, debido al grado de compactación alcanzado. Normalmente, el peso unitario del CCR sobrepasa los 2400 kg/m³.

2.3.2 Esfuerzo.

Esfuerzos de compresión y flexión.

Según la cantidad de cemento empleado, la mezcla puede alcanzar a los 28 días resistencias a la compresión del orden de 350 kg/cm² y resistencias a la flexión de entre 35 y 50 kg/cm², respectivamente.

[8,12,13]

El valor de la resistencia a la compresión sigue un comportamiento parabólico frente al contenido de humedad (ver gráfica 2.1), de tal suerte que se alcanza un máximo en el punto óptimo de contenido de humedad y compactación. Un contenido de humedad inferior al mínimo da lugar a una baja resistencia a la compresión, aunque conforme la mezcla se halle en un grado de compactación mayor, el efecto será una reducción en la resistencia frente a contenidos de humedad mayores al óptimo.

* 8.- Hansen, Kenneth D. Roller-Compacted Concrete Dams. Ed. Mc Graw-Hill. Págs. 1-28, 47-63.

* 12.- Structural Design of Roller-Compacted Concrete for Industrial Pavements. Concreto Compactado con Rodillo. Curso IMCYC. Octubre, 1988. Págs. 67-68

* 13.- Hansen, Kenneth, D. Roller Compacted Concrete for Dams. Mc Graw-Hill, USA, Págs. 14- 30.

Esto indica la gran influencia de los vacíos en la resistencia del CCR.

Una vez determinada la cantidad de agua a emplear, la resistencia a la compresión depende exclusivamente de la cantidad de cemento puzolánico, así como de la energía de compactación. La resistencia a la compresión se incrementa con el tiempo y la cantidad de materiales cementantes en la mezcla.

Las pruebas hechas en vigas y corazones de CCR indican una relación entre los esfuerzos flexionantes y la compresión, que se expresa como:

$$f_r = C (f'_c)^{0.5}$$

donde:

f_r = esfuerzo flexionante, psi (hasta tres decimales)

f'_c = esfuerzo a la compresión, psi

C = constante que introduce la influencia de las diferentes mezclas de CCR.

Tiene un valor de entre 9.4 y 10.8

$$1 \text{ PSI} = 0.0701 \text{ kg/cm}^2$$

Se recomienda diseñar con el valor del esfuerzo flexionante a los 90 días, que usualmente es un 10% mayor que el esfuerzo a los 28 días.

Esfuerzo de tensión.

La resistencia a la tensión puede ser determinada de una manera directa o indirecta (tensión diametral). Usualmente, en pruebas indirectas de resistencia a la tensión es igual a un 10% de la resistencia a la compresión. En pruebas directas, ésta relación es igual a un 5%. Estudios en campo indican que dicha relación es igual a un 13% en promedio.

[8,12]

* 8.- Hansen, Kenneth D. Roller-Compacted Concrete Dams. Ed. Mc Graw-Hill. Págs. 1-28, 47-63.

* 12.- Structural Design of Roller-Compacted Concrete for Industrial Pavements. Concreto Compactado con Rodillo. Curso IMCYC. Octubre, 1988. Págs. 67-68

Esfuerzo cortante.

El esfuerzo cortante puede ser determinado usando la ecuación de Coulomb:

$$S = C + P (\tan c)$$

donde:

S= esfuerzo cortante.

C= constante de cohesión.

P= esfuerzo normal

c= ángulo de fricción interna.

El término **P (Tan c)**, define la resistencia a la fricción. El valor de la cohesión se obtiene usualmente por una prueba directa de cortante y el ángulo de fricción empleando diversos valores de carga. Diferentes pruebas indican que los valores para cortante del concreto convencional tienden a ser mayores, aproximadamente en un 20 %, a los que presenta el CCR.

2.3.3 Módulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad, también conocido como módulo de Young, es el cociente del esfuerzo normal para el esfuerzo de tensión para los esfuerzos de tensión o de compresión que quedan debajo del límite proporcional del material.

El módulo de elasticidad del concreto convencional es proporcional a su peso unitario y su fuerza de compresión. El valor del módulo de elasticidad se puede obtener con la siguiente fórmula:

$$E = 33 w^{1.5} \times (f'c)^{0.5}$$

donde:

w = peso unitario kg/m^3

Los datos con que se cuenta indican que el módulo de elasticidad del CCR, es igual o poco mayor que el del concreto convencional, además, el CCR tiene un peso unitario mayor.

Se ha demostrado que el tipo de agregado en la fabricación de CCR es un factor que determina el valor del módulo de elasticidad. Agregados con bajo peso unitario dan

valores de módulo de elasticidad menores a los esperados por la fórmula anterior.

La relación entre el módulo de elasticidad y el esfuerzo flexionante (kg/m²) es, para el CCR:

[8,12]

$$E = C (f ' c)^{0.5}$$

donde:

C es una constante que introduce la influencia de las mezclas de CCR y varía entre 59 000 y 67 000.

2.3.4 Valores de diseño.

Los datos conocidos indican que las relaciones entre las propiedades del CCR son similares a las del concreto convencional. Por ello, se sugiere emplear los siguientes valores:

$$f r = 9 (f ' c)^{0.5}$$

$$E = 57\ 000 (f ' c)^{0.5}$$

Los valores y datos obtenidos con estas ecuaciones (ver tabla 2.8) son auxiliares valiosos en un diseño preliminar, pero para un diseño de análisis final es imprescindible contar con los datos recabados en el laboratorio sobre especímenes de CCR.

* 8.- Hansen, Kenneth D. Roller-Compacted Concrete Dams. Ed. Mc Graw-Hill. Págs. 1-28, 47-63.

* 12.- Structural Design of Roller-Compacted Concrete for Industrial Pavements. Concreto Compactado con Rodillo. Curso IMCYC. Octubre, 1988. Págs. 67-68

Tabla 2.8 Valores de diseño para CCR. (1 psi = 0.07031 KG/CM²)

Esfuerzo de compresión (kg/cm²).	Esfuerzo de flexión (kg/cm²).	Esfuerzo de elasticidad (kg/cm²).
200	34	217,960
250	37	329,054
280	40	253,116
300	42	267,178
350	45	281,240

[12]

Módulo de Poisson.

Es la relación entre el desplazamiento lateral y el desplazamiento longitudinal de una sección que resultan de la distribución uniforme de carga axial por debajo del límite de proporcionalidad del material. Para el CCR, el valor del módulo de Poisson se ubica entre 0.17 y 0.22, siendo un valor típico el de 0.20. Esto concuerda con los valores para el concreto convencional.

[8,12,13]

2.3.5 Fatiga.

Como otros materiales, el CCR también presenta efectos de fatiga. Una falla por fatiga ocurre cuando el material se vence por la aplicación continua o cíclica de una carga que induce a tensiones constantes y menores al esfuerzo de resistencia. Depende de las fuerzas de compresión y del tiempo y es posterior a la deformación inmediata que se da en el rango elástico. La fatiga comienza inmediatamente y continúa con valores cada vez menores.

* 8.- Hansen, Kenneth D. Roller- Compacted Concrete Dams. Ed. Mc Graw-Hill. Págs. 1-28, 47-63.

* 12.- Structural Design of Roller- Compacted Concrete for Industrial Pavements. Concreto Compactado con Rodillo. Curso IMCYC. Octubre, 1988. Págs. 67-68

* 13.- Hansen, Kenneth, D. Roller Compacted Concrete for Dams. Mc Graw-Hill , USA, Págs. 14- 30.

Las tensiones críticas para el CCR son de carácter flexionante, y están relacionadas con los valores del esfuerzo flexionante a través del esfuerzo permisible [stress ratio], o (SR).

$$SR = \text{Tensión flexionante/Esfuerzo Flexionante.}$$

Por ejemplo, si un vehículo causa una tensión flexionante de 28 kg/m^2 y el CCR presenta un esfuerzo flexionante de 45 kg/m^2 , entonces:

$$SR = 28 / 45 = 0.62$$

El efecto de la fatiga en el CCR es muy similar al que se presenta en el concreto convencional.

En el CCR, la fatiga es función tanto del tipo de agregado como del valor de la resistencia a la compresión. Los agregados que dan un módulo de elasticidad bajo producirán un valor de fatiga alto. Mezclas muy resistentes poseen una estructura muy rígida y por lo tanto el valor de la deformación es menor.

[12, 13]

2.3.6 Permeabilidad.

Algunos autores señalan a la impermeabilidad como la característica más importante del CCR la cual puede estar relacionada directamente con la cantidad de cemento. Esto es especialmente cierto en mezclas donde la lechada sobrepasa los vacíos de los agregados. El grado de impermeabilidad puede ser controlado por medio de la cantidad de cementante y una proporción suficiente de agregado fino, todo lo cual reduce la cantidad de vacíos.

Los valores de permeabilidad para el CCR tienen un rango de entre $2 \times 10^{-2} \text{ cm/seg}$ y $4 \times 10^{-10} \text{ cm/seg}$. Comparando estos datos con los de la tabla 1.6 vemos que los valores de k (coeficiente de permeabilidad), para el CCR son ligeramente menores al del concreto convencional. [13]

* 12.- Structural Design of Roller-Compacted Concrete for Industrial Pavements. Concreto Compactado con Rodillo. Curso IMCYC. Octubre, 1988. Págs. 67-68

* 13.- Hansen, Kenneth, D. Roller Compacted Concrete for Dams. Mc Graw-Hill, USA, Págs. 14- 30.

2.3.7 Resistencia a las heladas.

Para el CCR ésta debe provenir de su impermeabilidad y resistencia a la tensión. Esto es especialmente importante cuando la superficie está expuesta a ciclos de helada continuos.

La resistencia al frío que presentan los pavimentos elaborados con CCR sobrepasan favorablemente las expectativas de las pruebas de laboratorio. Si las mezclas de CCR fueran diseñadas para la resistencia al frío con los datos del laboratorio, tendría que usarse una cantidad de cemento mayor a la requerida para alcanzar satisfactoriamente los niveles requeridos en otras propiedades del concreto. Es aconsejable usar poca o ninguna cantidad de puzolana en la mezcla del CCR cuando alguna superficie horizontal deba ser expuesta tempranamente a ciclos de helada en condiciones húmedas, ello debido a la gran necesidad de desarrollar rápidamente elevados índices de resistencia a la tensión.

Resistencia a la erosión o abrasión.

La resistencia a la erosión es proporcional a la resistencia a la compresión y a la resistencia a la abrasión del agregado usado. El CCR ha mostrado un excelente nivel de resistencia a la erosión y a la abrasión tanto en el laboratorio como en el campo.

2.3.8 Propiedades térmicas.

Son un factor importante en el control del cambio de volumen del concreto. Un análisis térmico del CCR incluye características tales como conductividad, difusión, coeficiente térmico de expansión, calor específico, junto con capacidad a la tensión. Las propiedades térmicas son dependientes del tipo de agregado, por lo cual un concreto convencional y un CCR elaborados con agregados similares presentarán características térmicas similares.

Densidad y resistencia.

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

Las pruebas se realizarán variando el contenido de agua y cemento, con base a las pruebas preliminares de laboratorio, para observar el comportamiento del equipo de compactación y los resultados obtenidos.

[8]

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 atore. Si la cantidad de agua es insuficiente, se presentarán fallas locales por cortante en la mezcla bajo el rodillo, o bien el cemento no podrá hidratarse totalmente.

Procedimiento para asegurar la adherencia entre las capas.

Las capas serán colocadas de una manera uniforme, vigilando la unión entre ellas. Debe definirse el tratamiento más adecuado que se dará a la superficie del concreto rodillado cuando se interrumpa la colocación del material por uno o más días.

En el caso de pavimentos, el tramo de prueba servirá para llevar un control de sus propiedades físicas y de la sección que deba emplearse en forma definitiva.

Así mismo se obtendrán núcleos de los tramos de prueba para evaluar la adherencia entre las capas de CCR en el pavimento.

Se debe tener especial cuidado al seleccionar el método y el equipo de compactación en las zonas a las que no pueda llegar el rodillo vibratorio, para asegurar la homogeneidad del material.

2.3.9 Elaboración de especímenes.

Se ha intentado, con escaso éxito, fabricar cilindros y vigas que reproduzcan tanto en el campo como en el laboratorio las características de los esfuerzos y densidades correspondientes a los corazones de pavimentos. Es muy importante tener muestras que sean verdaderamente representativas de las condiciones in situ del CCR, tanto para fabricar especímenes adecuados para las pruebas de laboratorio, como para llevar un efectivo control de calidad en la construcción.

* 8.- Hansen, Kenneth D. Roller- Compacted Concrete Dams. Ed. Mc Graw-Hill. Págs. 1-28, 47-63.

Las muestras de CCR son hechas en el campo colocando, primeramente, CCR fresco en el molde de la viga o cilindro, vibrando externamente el molde puesto sobre una mesa de vibrado y colocando un cilindro de carga en la superficie del concreto. Este es vertido y consolidado hasta llenar el molde, amasando la superficie al final.

Sin embargo, este método se ve fuertemente influenciado por el criterio del operador, lo cual es negativo en la obtención de esfuerzos confiables. Mucha mejor precisión se logra en los especímenes elaborados en laboratorio, aunque los esfuerzos obtenidos tienden a ser mayores que aquellos obtenidos en el campo.

[10]

Hoy en día no existen procedimientos estándares para la elaboración de especímenes de CCR. El problema consiste en realizar especímenes cuyas características sean representativas de las condiciones en campo (donde camiones, tractores y rodillos vibratorios compactan y consolidan la mezcla).

La tarea del laboratorista es reproducir un espécimen cuya densidad sea semejante a la mezcla en campo, ya que, se considera que el valor de la densidad es proporcional a cualquiera otra propiedad de la mezcla, especialmente la resistencia a la compresión.

La mayor parte de los especímenes han sido preparados con las medidas estándar de los cilindros de concreto convencional (152 x 304 mm.), lo cual es adecuado y puede aceptar tamaños máximos de agregado por arriba de los 50 mm. En este caso es común aceptar dimensiones de cilindros propuestas por el mismo laboratorio. Es recomendable usar moldes fácilmente desmontables, por lo cual se han empleado moldes de plástico insertados en cilindros de acero un poco más anchos de la medida estándar.

La preparación de los cilindros cae dentro de tres métodos básicos: compactado por impacto, vibrado y por vibrocompresión, para el segundo método, ver apéndice I.

[10]

* 10.- Pittman, White. Concreto Compactado con Rodillo. Curso IMCYC. Octubre, 1988. Págs. 44 -46.

Compactación por impacto.

El método de compactación para la preparación de especímenes se ha limitado a aquellas mezclas de consistencia seca. El número de capas que se usa para preparar los cilindros varía de tres capas de 100 mm., cada una a 6 capas de 50 mm. El número de capas no es tan importante como el tipo de pisón y la cantidad de energía de compactación aplicada al material.

La mayor parte de los procedimientos para preparar especímenes compactados por impacto han sido hechos con el mismo equipo que se usa para la prueba Proctor modificada para suelos.

La prueba emplea un martillo de 4.5 Kg que cae de una altura de 45 cm., hacia la masa a compactar. Actualmente se utiliza una energía de compactación de 2693 kg/m³.

Algunos investigadores (Reeves y Yates) reportan que los especímenes construidas con este método se correlacionan muy bien con las pruebas de campo. En su caso realizaron cilindros en 6 capas de 50 mm., aplicando 122 golpes por capa.

[13]

Otros investigadores han indicado que una energía de compactación menor puede ser más apropiada que este tipo de prueba, ya que, se han encontrado fracturas o cambios de graduación en el agregado grueso por usar tan elevadas energías de compactación, por lo que se recomienda que ésta sea de 1100 kg/m³ la cual se obtiene elaborando especímenes en 6 capas de 50 mm. con 50 golpes por capa.

[10]

Vibrocompresión.

Se pueden usar dos métodos distintos, el primero con un vibro-compresor neumático y el segundo con una vibradora eléctrica, conocida como martillo kango o Pistola Hilti. El diámetro del vibrocompactador es de 127 a 146 mm.

* 10.- Pittman, White. Concreto Compactado con Rodillo. Curso IMCYC. Octubre, 1988. Págs. 44 -46.

* 13.- Hansen, Kenneth, D. Roller Compacted Concrete for Dams. Mc Graw-Hill, USA, Págs. 14- 30.

Hay una marcada diferencia entre la amplitud y la frecuencia de ambos vibrocompresores. Para el primero se tiene una oscilación de unos 150 mm., mientras que para el segundo la amplitud es imperceptible, variando la frecuencia entre 2000 y 2400 impactos por minuto contra los 600 que proporciona el primer modelo.

Para ambos métodos se han usado probetas de 152 por 304 mm. , usando un tamaño máximo de 50 mm., en el agregado grueso. El uso de ambos aparatos usualmente requiere un cabezal para los cilindros para compactar adecuadamente la cabeza del mismo.

Con el primer método la compactación continúa hasta que el martillo rebota indicando que se ha alcanzado la máxima densidad. El tiempo requerido para alcanzar ésta condición varía entre los 10 y los 20 segundos por capa.

El martillo Kango o pistola Hilti puede ser sostenido manualmente o por medio de un marco fijo. Resultados más consistentes se han obtenido utilizando el marco fijo y aplicando una carga concéntrica constante. Para este caso se han realizado cilindros mediante 3 ó 4 capas en las cuales la densidad máxima se alcanza a los 20 segundos.

De acuerdo a las pruebas realizadas por diferentes investigadores se indica que los valores de esfuerzo obtenidos con cilindros elaborados por vibrocompresión presentan valores más bajos que los de campo. La mayoría de estos cilindros fueron elaborados usando un vibrocompactador neumático.

Ninguno de los métodos expuestos anteriormente ha producido energías de compactación constantes y sobre todo, el primero (de compactación por impacto), depende de la habilidad del operador.

[8]

Por otro lado aquellas probetas fabricadas mediante la prueba Proctor presentan esfuerzos mayores que los de campo, pero sus resultados son más consistentes, observándose una desviación estándar del 10.5% en pruebas de compresión a los 90 días. Los especímenes preparados con energías de compactación de 2693 kg/m³, resultan con densidades y esfuerzos más cercanos a los valores de campo.

* 8.- Hansen, Kenneth D. Roller-Compacted Concrete Dams. Ed. Mc Graw-Hill. Págs. 1-28, 47-63.

Las diferencias que se observan entre los resultados obtenidos en laboratorio y en campo se explican por la gran diversidad de factores que no pueden ser reproducidas en las probetas como variaciones en la temperatura, en el curado, en la segregación de la mezcla, el contenido de humedad, los esfuerzos de compactación y el tamaño máximo del agregado, ya que, en campo predomina un tamaño máximo de 20 mm. ($\frac{3}{4}$ " en tanto que en el laboratorio éste oscila entre los 38 y 50 mm. ($1\frac{1}{2}$ a 2"). Por esto es necesario elaborar métodos estándar para la preparación de cilindros de CCR.

2.3.10 Prueba de cilindros de concreto.

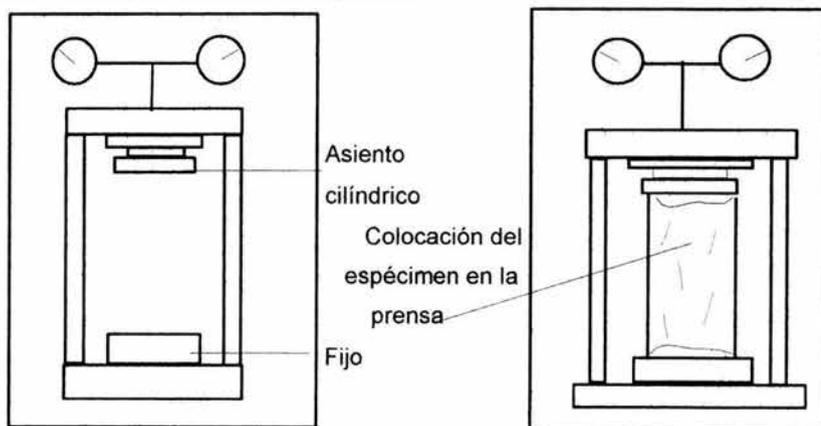
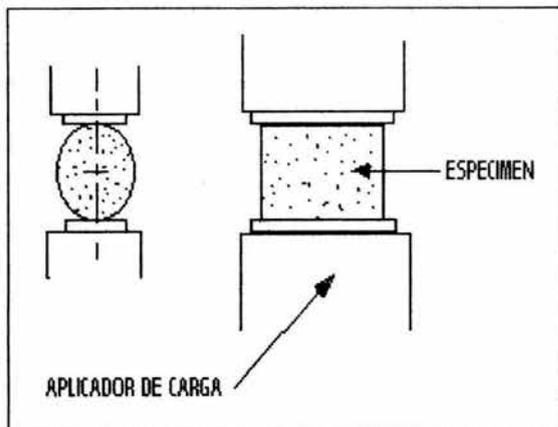


Fig. 2.2 (a) Equipo de laboratorio para pruebas de concreto hidráulico y CCR, placa de platina y prensa hidráulica con accesorios.

[4,14]

* 4.- Apuntes de Construcción I Facultad de Ingeniería de la UNAM.

* 14.- Waddell, Joseph J. Concrete Construction Handbook. Mc Graw-Hill, USA, 1974. Págs. 1-23.



[4,14]

Fig. 2.2 (b) Equipo de laboratorio para pruebas de concreto hidráulico y CCR, placa de platina y prensa hidráulica con accesorios (colocación del espécimen a tensión diametral).

El procedimiento usual para llevar un control sobre la calidad del concreto que se está colocando en obra es realizar probetas al tiempo de colado y probarlas, suponiendo que los datos en ellas recabados sean similares a los de la estructura. La realidad es que los diferentes métodos de colado y curado empleados en la estructura y en las probetas no permiten que éstas consideren todas las variables involucradas en aquella.

Por esto, los resultados obtenidos en el laboratorio pueden resultar falsos con respecto al comportamiento real de la obra.

En todo caso, pueden tomarse las pruebas como una forma de asegurar la uniformidad de la mezcla que se ésta colando, colocando o tendiendo.

La mayoría de las pruebas de laboratorio usadas actualmente para el CCR provienen de las pruebas estándar para concreto convencional y en algunos casos, para el suelo.

* 4.- Apuntes de Construcción I Facultad de Ingeniería de la UNAM.

* 14.- Waddell, Joseph J. Concrete Construction Handbook. Mc Graw-Hill, USA, 1974. Págs. 1-23.

Estas incluyen criterios para conocer las propiedades y la calidad del material, así como métodos para manejar y ensayar especímenes. Dos procedimientos son sin embargo específicos para el CCR: la preparación de los especímenes y la trabajabilidad.

Las pruebas de trabajabilidad tienen como fin determinar cuanta agua es requerida para alcanzar un determinado nivel de esfuerzo y para producir una mezcla cómoda para la compactación por rodillo. Para lograr esto, se utilizan dos criterios básicos: Uno que considera al CCR como suelo y se enfoca a determinar la relación humedad- densidad; el otro que toma al CCR como un concreto rodillado y se enfoca a determinar los tiempos de asentamiento bajo vibrado como una medida de la trabajabilidad.

[14]

Relaciones humedad- densidad.

En este caso se usa el procedimiento de una prueba Proctor modificada. Las mezclas de CCR se varían en su contenido de humedad y son compactadas a un nivel de energía constante. La humedad óptima es aquella que produce la mayor densidad seca del CCR. Usualmente se obtiene una gráfica de cinco puntos.

La humedad óptima deberá alcanzarse en la mezcla al momento de la compactación y no durante su elaboración. Será necesario agregar más agua de la que señale el punto óptimo para considerar pérdidas debidas al transporte, evaporación e hidratación temprana del cemento. También deberán considerarse algunos ajustes en campo para obtener una mezcla más fácilmente trabajable.

Pruebas de vibrado.

El propósito de éstas es determinar el contenido de humedad correspondiente a una determinada consistencia. Existe un gran número de pruebas para medir la consistencia pero todas ellas siguen tres pasos básicos:

- 1.- Un recipiente es llenado hasta el borde con concreto suelto para después colocarle una sobrecarga.

* 14.- Waddell, Joseph J. Concrete Construction Handbook. Mc Graw- Hill, USA, 1974. Págs. 1-23.

- 2.- El cilindro es sujetado a una mesa de vibrado, la cual tiene una frecuencia y amplitud constantes. La probeta es vibrada con la sobre carga hasta que completa su consolidación.
- 3.- El valor de la consistencia o trabajabilidad de la mezcla es el tiempo en segundos que esta tarda en formar un anillo en la cara interna del cilindro bajo vibrado.

La trabajabilidad se determina generalmente a través de la prueba VeBe, que consiste en hacer vibrar en una mesa vibratoria (3600 ciclos por minuto) a un recipiente de 9.5 lb. (4.3 kg) lleno de concreto y con una sobrecarga en su cabeza, cuyo peso promedio es de 20 lb. (9.1 kg). Conforme el peso de la sobrecarga aumenta, el tiempo de consistencia disminuye para una misma mezcla, (ver Apéndice I).

Varios factores pueden afectar el resultado de la prueba VeBe. Por ejemplo: una elevada cantidad de arena o una alta temperatura lo incrementan. Entre tales factores destaca la cantidad de agua en la mezcla. Bajos períodos de VeBe indican una mezcla extremadamente fluida.

Un período VeBe de cinco segundos indicaría la máxima cantidad de agua tolerable para el CCR sin que la mezcla presente revenimiento.

[23]

* 23.- Norma ASTM C-1176 "Práctica Estándar para hacer Concreto Compactado con Rodillo en Moldes Cilíndricos Usando una Mesa Vibratoria" (Reaprobada en 1998).

CAPITULO III: APLICACION DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO EN LA PAVIMENTACION.

3.1 Generalidades.

Las características del CCR son esencialmente las mismas que las de concreto normal, pudiendo usarse materiales marginales con granulometrías, plasticidad u otras características que normalmente no se aceptarían en un concreto convencional.

El peso unitario del CCR (2400 a 2560 kg/m³) depende del grado de compactación, del contenido de humedad y de las propiedades de los ingredientes. Usualmente, densidades elevadas implican resistencias a la flexión grandes (4758 a 7033 kPa) a los 28 días. El contenido de humedad varía entre un 3.5 y un 4.0% [hasta un 6%]. La cantidad de cemento a emplear varía según el procedimiento constructivo y el diseño de la mezcla.

[10]

Para evitar la segregación y obtener una mejor calidad de la superficie se utilizan agregados triturados con tamaños máximos de 20 mm. (¾ pulg.) o 16 mm. (5/8 pulg.). La tabla 3.1 muestra la granulometría típica para pavimentos de CCR en España en porcentaje que pasa la malla.

Tabla 3.1 Granulometría típica para pavimentos de CCR (País: España).

T.M.A. (mm) N° de malla	16	20
1 pulg	-	100
¾	100	85-100
5/8	88-100	75-100
3/8	70-87	60-83
N° 4	50-70	42-63
N° 10	35-50	30-47
N° 40	18-30	16-27
N° 200	10-20	9-19

[16]

* 10.- Pittman, White. Concreto Compactado con Rodillo. Curso IMCYC. Octubre, 1988. Págs. 44 -46.

* 16.- Figueroa Gallo, Donato. Carreteras de CCR. La mejor solución. Construcción y Tecnología. IMCYC. Octubre, 1989. Págs. 8-9.

Los agregados que se emplean son de origen calizo o sílico y se pueden suministrar en tres, dos o un tamaño, dependiendo de su clasificación. Es recomendable que cuando menos 2/3 partes del material sea producto de la trituración de rocas.

El contenido de cemento en las mezclas de CCR fluctúa de 260 a 330 kg/m³, que representa del 11.5 al 14.5% del peso seco de los agregados. El contenido de humedad de la mezcla varía de 105 a 130 lt/m³ que representa de un 4.5 a 5.5% del peso de los agregados secos.

[16]

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

[17]

La textura de su superficie es similar a la del concreto asfáltico. Se presentan pequeñas oquedades (de unos 3 mm de prof.) debidos a una cantidad insuficiente de mezcla o a una deficiente compactación. Una superficie mejor, menos porosa, resulta generalmente de una mezcla con un alto porcentaje de finos y con tamaño nominal máximo para gravas igual o inferior a 19 mm. (¾").

El grado de tersura (smoothness) del CCR, se mide en base a la máxima distancia vertical entre la superficie del pavimento y la corona de una regla con longitud de 3 m. El máximo valor tolerable ronda los 10 mm en 3 m. La mayoría de los pavimentos de CCR quedan muy por debajo de este valor. La tersura está en función del cuidado en las operaciones de colocación y compactado (el espesor de cada capa, además de ser afectado por el contenido de humedad y el tamaño nominal máximo de los agregados.

[10]

* 10.- Pittman, White. Concreto Compactado con Rodillo. Curso IMCYC. Octubre, 1988. Págs. 44 -46.

* 16.- Figueroa Gallo, Donato. Carreteras de CCR. La mejor solución. Construcción y Tecnología. IMCYC. Octubre, 1989. Págs. 8-9.

* 17.- Nieto R., Juan José A. La Tecnología del CCR. Construcción y Tecnología. IMCYC. Octubre, 1988. Págs. 45-46.

La comparación entre los costos de pavimentos equivalentes: de asfalto, concreto convencional y CCR (ver tabla 3.2), indica que éste último es el más económico. Además el CCR puede usarse inmediatamente después de terminada la compactación:

Tabla 3.2 Comparación de costos para pavimentos.

Pavimento	Costo básico unitario (\$/m ³) en promedio		
	Costo inicial.	Costo anual de mantenimiento	Costo a lo largo de la vida util.
Concreto asfáltico,mezcla caliente,10 cm espesor.	1039.77	* 102.41	* 1142.16
Concreto hidráulico convencional (25cm)	1825.25	** 4.02	** 1829.52
CCR, 30 cm espesor	1247.28	** 4.90	** 1251.30

[10]

* Mantenimiento para un periodo de 10 años aproximadamente.

** Mantenimiento para un periodo de 30 años aproximadamente.

Las características elásticas del CCR corresponden a las de concretos convencionales y alta resistencia y las propiedades de fatiga estudiadas en laboratorio bajo compactación controlada señalan que el CCR puede proporcionar una vida más larga a la fatiga que la del concreto convencional (igual consumo de cemento), bajo los mismos niveles de esfuerzo.

[18]

La experiencia ha señalado que la resistencia del CCR a la intemperie es excelente. Aún cuando las pruebas de laboratorio muestran lo contrario, en la práctica el CCR no muestra un deterioro visible a un ciclo de congelación -deshielo, continuo durante 7 años. Este comportamiento ha sido atribuido a la elevada densidad del CCR que impide la saturación del concreto con agua, lo cual minimiza el efecto de las heladas.

* 10.- Pittman, White. Concreto Compactado con Rodillo. Curso IMCYC. Octubre, 1988. Págs. 44 -46.

* 18.- Gómez Domínguez, Jorge. Diseño de Pavimentos Rígidos. Construcción y Tecnología. IMCYC. Abril, 1991. Págs. 29-34.

Observaciones en el país del Canadá indican que la superficie del CCR es más resistente al impacto, la abrasión y el clima que el concreto normal, lo cual puede ser debido a una mayor resistencia a la compresión en el CCR.

[10]

Por todas estas ventajas es que el empleo del CCR en la construcción de carreteras se ha incrementado en los últimos años en varios países, especialmente España.

En México se tienen pocos tramos carreteros o urbanos construidos con esta técnica pero estos han demostrado un eficiente servicio, lo cual da pauta para suponer que en los próximos años su número se incrementará notablemente. Por otro lado, el país es uno de los principales productores de cemento, por lo que no habría gran problema en cuanto a la obtención de la materia prima.

Sin embargo, diversas autoridades mexicanas en el ramo han comentado que ésta técnica debe aún perfeccionarse para su aplicación en el país debido a que los costos del CCR, contrariamente a la experiencia internacional, son iguales o más elevados que el uso de pavimentos asfálticos. La cantidad de cemento, por ejemplo, se incrementa en un 30 % respecto a la necesaria para un pavimento de concreto convencional.

En este contexto cabe considerar lo siguiente: en México existe muy poca experiencia propia en el diseño y construcción de pavimentos de concreto hidráulico o de CCR. En el primer caso esto se debe a la nula investigación teórico-práctica que se realiza en el segundo porque no es común la construcción de este tipo de obras, siendo que en muchas ocasiones los pavimentos de concreto o de CCR prestan un servicio mucho más eficiente que los pavimentos de concreto asfáltico.

[10]

3.2 Influencia de las propiedades del concreto en las características del pavimento.

Las características que se pueden observar en un pavimento de concreto se deben principalmente a la estructura y propiedades de este material.

* 10.- Pittman, White. Concreto Compactado con Rodillo. Curso IMCYC. Octubre, 1988. Págs. 44-46.

3.2.1 Resistencia.

El pavimento de concreto posee una alta resistencia, dureza que depende de la del material y que simplemente no puede ser alcanzada por el concreto asfáltico.

En estudios de laboratorio realizados en el IMCYC (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto), se han podido obtener concretos con resistencias hasta de 860 kg/cm² a los 7 días y 1005 kg/cm² a los 28 días para ciertos consumos elevados de cemento.

3.2.2 Rigidez.

Como es de esperarse, la rigidez (inflexibilidad), obtenida por medio de este material en la forma de losas, está en función de la resistencia del concreto y es directamente proporcional al módulo de elasticidad del concreto (E). Precisamente la rigidez de las losas es lo que da nombre al tipo de pavimento, ya que se considera que la losa en sí es la encargada de resistir todos los esfuerzos y deformaciones y por medio de la acción de viga transmite niveles de carga sumamente bajos al terreno de apoyo.

Rigidez relativa.

Para evaluar el estado de esfuerzos y deformaciones que sufren las losas en un pavimento de concreto, así como el diseño, se utiliza en muchos métodos el parámetro llamado rigidez relativa en el cual se relacionan la rigidez de la losa y la rigidez del suelo de apoyo, representando éste último por el módulo de reacción (k):

[18]

$$I = [Eh^3 / 12(1-\mu^2) k]^{1/4}$$

donde:

I = rigidez relativa, en pulg. o en cm

E = módulo de elasticidad del concreto, lb/pulg² o kg/cm²

h = espesor del pavimento, pulg. o cm

μ = módulo de Poisson del concreto

k = módulo de reacción de la sub-rasante, lb/pulg³ o kg/cm³.

* 18.- Gómez Domínguez, Jorge. Diseño de Pavimentos Rígidos. Construcción y Tecnología. IMCYC. Abril, 1991. Págs. 29-34.

En la expresión anterior, para k constante, (I) se incrementa aumentando el espesor del pavimento, el módulo de elasticidad o ambos. Resulta obvio el beneficio de utilizar concretos de alta resistencia en los que E puede aumentar hasta en un 50%; naturalmente esto involucraría un costo elevado en la producción del concreto, sin embargo queda como recurso el CCR, en donde se puede optimizar el uso del cemento, creando un concreto donde la cantidad de pasta tiende a ser mínima y la cantidad de agregado máxima por volumen de concreto, logrando módulos de elasticidad elevados, muy semejantes a los de los concretos de alta resistencia.

[10]

3.2.3 Contracción.

La contracción que sufre todo concreto es la característica que más ha influido en el ingenio del diseñador para sobrellevar los problemas derivados de la misma.

La contracción en sí no es mala, sin embargo el simple apoyo de las losas de concreto sobre el terreno produce fricciones que restringen la contracción, produciendo agrietamiento prematuro en el concreto al no tener éste la capacidad suficiente para resistir los esfuerzos de tensión que se desarrollan. El problema por contracción requiere por lo tanto la introducción de juntas de contracción.

3.2.4 Estabilidad superficial.

Es indiscutible que la característica más importante del pavimento desde el punto de vista del usuario, es la calidad de la superficie de rodamiento: una superficie plana de mayor estabilidad y seguridad en el manejo. La superficie de un pavimento de concreto es altamente estable y segura.

La estabilidad de la superficie de rodamiento se califica de acuerdo con su comportamiento con respecto a la acción de los agentes atmosféricos y al daño acumulado por la magnitud de las cargas de tráfico. Por otro lado, algunos estudios demuestran que los costos de operación son más altos para la circulación en los pavimentos asfálticos que en los pavimentos de concreto.

* 10.- Pittman, White. Concreto Compactado con Rodillo. Curso IMCYC. Octubre, 1988. Págs. 44 -46.

3.2.5 Color.

Además de que se puede obtener prácticamente cualquier color con el concreto, el color natural que le proporciona el cemento Portland hace que el pavimento de concreto posea una alta reflectancia a la luz. Si bien es cierto que dicha reflectancia puede llegar a ser molesta a ciertas horas durante el día, durante la noche hace que el pavimento de concreto sea más visible.

Por lo que respecta a la iluminación nocturna de carreteras, cruces y áreas peligrosas, algunos estudios señalan que utilizando materiales altamente reflectantes en la pavimentación se pueden ahorrar hasta 24 000 dólares por milla al requerir menos iluminación y hasta 1100 dólares por milla por año al reducir el consumo de energía y costos de mantenimiento.

Incidentalmente, el pavimento de concreto típico se calificó con la reflectancia más alta mientras que el pavimento asfáltico se calificó con la reflectancia más baja.

3.3 Criterios generales para el diseño.

El diseño de los pavimentos de CCR (PCCR) se ha realizado con técnicas que se utilizan en los pavimentos de concreto hidráulico convencional, siempre y cuando no se considere una capa de rodamiento en la superficie expuesta del CCR.

Asimismo puede considerarse válido, ya que, ambos materiales tienen propiedades mecánicas muy similares. Pero, cuando se requiere asegurar una superficie de rodamiento de mayor calidad, se puede emplear una carpeta de concreto asfáltico por lo cual una reducción del espesor de CCR puede considerarse apropiada.

Esto se justifica al emplear modelos multicapa basados en la teoría elástica (ver figura 3.1). Tales modelos son ampliamente usados en España, donde el proceso de diseño se reduce prácticamente a la consulta de tablas y secciones preestablecidas.

Nivel de Tránsito		T0		T1		T2	T3	T4	
Categoría de Explanada		alt I		alt II		alt I	alt II	alt I	alt II
Carril de diseño	E3	 22  15	 10  25  20	 25  15	 10  22  20	 8  20  20	 4  20  15	 4  20  20	 4  20  20
		NO TRATADA							
A c o t a m i e n t o	E3	 20-30  15	 10  23-27  20	 23-27  15	 10  20-24  20	T0: $t > 2000$ vp/día T1: $800 \leq t < 2000$ vp/día T2: $200 \leq t < 800$ vp/día T3: $50 \leq t < 200$ vp/día T4: $t < 50$ vp/día E3: vrs ≥ 20 T = Tránsito VP = Vehículos Pesados			
		 Concreto asfáltico  Concreto hidráulico Convencional  CCR  Base granular Tratada con Cemento  Sub-base suelo- cemento				$M_r = 46 \text{ Kg/cm}^2$ a 28 días. $f'c = 33 \text{ Kg/cm}^2$ a 28 días. $M_r = 46-55 \text{ Kg/cm}^2$ a 28 días. $f'c = 25 \text{ Kg/cm}^2$ a 28 días. $= 38 \text{ Kg/cm}^2$ a 90 días.			

Fig. 3.1 (Modelos multicapa para pavimentos de CCR)

Acot. en cm

[18]

* 18.- Gómez Domínguez, Jorge. Diseño de Pavimentos Rígidos. Construcción y Tecnología. IMCYC. Abril, 1991. Págs. 29-34.

De acuerdo con estos modelos (donde cada capa es considerada homogénea y linealmente elástica con extensión lateral infinita, y la sub-rasante es considerada infinita en profundidad), el espesor total del PCCR empleado en España es, en promedio, de 25 a 50 cm y comprende tres capas: sub-base de suelo cemento ($f'c = 25 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días), 20 cm; concreto compactado con rodillos, 20 cm; y concreto asfáltico, 4 a 8 cm.

[10,16]

Otro método de diseño es la teoría de diseño por fatiga, apoyada principalmente en la construcción de tramos experimentales, en los cuales se investigó conjuntamente un gran número de parámetros relativos a los materiales, tipo de cargas vehiculares y aspectos climáticos, siendo quizás el tramo de prueba AASHO (1950, ahora AASHTO), el mejor ejemplo. Los métodos empíricos resultado de dicha investigación se siguen usando hasta nuestros días.

En México se ha dado uso preferente a los criterios de diseño de la PCA (Portland Cement Association) para pavimentos de concreto, los cuales se basan también en estudios sobre la fatiga que experimentan tales pavimentos.

Cualesquiera que sea el método de diseño elegido es importante tomar en cuenta la necesidad de efectuar un tramo de prueba y evaluar densidades, resistencias y acabados en comparación con la mezcla diseñada en laboratorio.

La base de diseño de los parámetros de compactación del CCR es la prueba Proctor Modificada, cuyo control de calidad en el campo es la determinación de la relación humedad-densidad.

3.3.1 Pavimentos industriales, urbanos y carreteros.

El método que se describe a continuación es el empleado en los EU para el diseño de pavimentos industriales de CCR según el boletín (14) que al respecto editó la Portland Cement Asociación (PCA) y completado con las observaciones del Dr. Shiraz Tayabji en su investigación y publicada en boletines por la S.C.T.

* 10.- Pittman, White. Concreto Compactado con Rodillo. Curso IMCYC. Octubre, 1988. Págs. 44 -46.

* 16.- Figueroa Gallo, Donato. Carreteras de CCR. La mejor solución. Construcción y Tecnología. IMCYC. Octubre, 1989. Págs. 8-9.

Cabe destacar que no existe, para este método, diferencia alguna de procedimiento en cuanto al diseño de espesores de CCR para zonas industriales o urbanas y aeropuertos. Es por ello que la información siguiente puede aplicarse en forma general tanto para unos como para otros.

El procedimiento propuesto requiere el cálculo del esfuerzo admisible en el pavimento basado en el número de aplicaciones totales de carga y del esfuerzo esperado en el pavimento debido a la carga por rueda del diseño. Se selecciona un espesor de diseño tal que el esfuerzo esperado sea menor que el admisible. El procedimiento propuesto también es aplicable para cargas de tránsito mezclado.

Así mismo, se considera que el pavimento de CCR trabaja monolíticamente, aún cuando el espesor total de la losa se construya por etapas.

3.3.1.1 Bases para el diseño.

Durante el proceso de diseño, el espesor del pavimento se selecciona en base a esfuerzos de flexión y fatiga causados por las cargas impuestas, de cuya ubicación dependen los valores de tales esfuerzos: mayores conforme las cargas se acercan a los extremos y menores conforme se alejan de ellos.

[16]

Sin embargo, por simplicidad, los valores críticos se tomarán considerando que las cargas se localizan hacia el interior del pavimento y no en sus extremos. Cuando se considere tráfico en las orillas, bastará con incrementar en un 20% el espesor del diseño, el cual se construirá en capas que formen una estructura monolítica.

La colocación de la carga en el interior se basa en el siguiente razonamiento :

- 1.- El espaciamiento transversal de las grietas de contracción para pavimentos de CCR generalmente es del orden de 15 a 18 m, con ligero agrietamiento intermedio.
- 2.- El tránsito en las instalaciones fuera de carretera, en las calles industriales y en los patios de maniobras se realizan relativamente bajas velocidades y generalmente es bidireccional. De esta manera, los problemas de fallas y bombeo en juntas se minimizan o simplemente no existen.

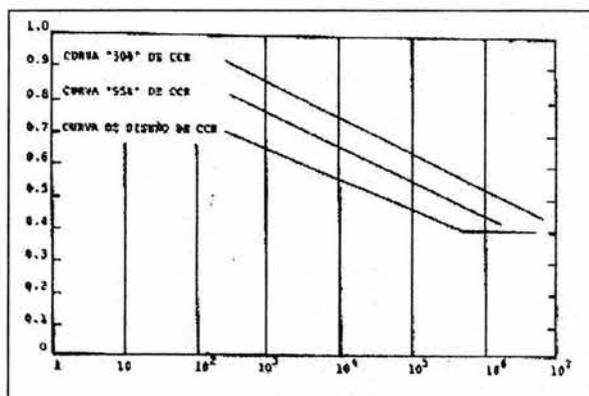
* 16.- Figueroa Gallo, Donato. Carreteras de CCR. La mejor solución. Construcción y Tecnología. IMCYC. Octubre, 1989. Págs. 8-9.

3.- Las inspecciones de campo en las que se han colocado pavimentos de CCR indican que no existen problemas asociados con las grietas de contracción.

La elaboración de capas que formen una estructura monolítica puede lograrse si la capa inferior permanece húmeda y limpia hasta la colocación de la capa superior. En caso de que los trabajos deban suspenderse por un tiempo considerable, es recomendable poner una capa de arena-cemento para asegurar la excelente unión entre ambas capas.

Los criterios de diseño son conservadores (ver gráfica 3.1). En primer lugar la curva de fatiga de diseño para el CCR se ubica alrededor de 15% abajo de la curva "95%" (esto es, es aquella por arriba de la cual quedan el 95% de los resultados) para CCR.

Esto da lugar a considerar valores de resistencia más bajos de los que presenta el material en las pruebas de laboratorio. En segundo lugar, la magnitud permisible del esfuerzo a flexión se considera como el correspondiente a los 90 días, aunque al pasar el tiempo las resistencias del CCR se vean, de hecho incrementadas.



[16]

Aplicaciones a la falla N.

(Gráfica 3.1, curva de fatiga de diseño para CCR)

* 16.- Figueroa Gallo, Donato. Carreteras de CCR. La mejor solución. Construcción y Tecnología. IMCYC. Octubre, 1989. Págs. 8-9.

Se dan como anexos a este capítulo las tablas necesarias para determinar el espesor de diseño, basadas en la ampliación que hace Pickett y Ray, del Análisis de Westergaard para las cargas al interior de una losa soportada por un medio líquido denso.

3.3.1.2 Proceso de diseño para el espesor.

Para determinar el espesor requerido en un pavimento de CCR es necesaria la siguiente información:

- 1.- Capacidad de soporte (k) de la sub-rasante o de la combinación sub-rasante – sub-base (si se emplea k_c).
- 2.- Las características de los vehículos:
 - Cargas en las ruedas.
 - Espacio entre ruedas.
 - Características de las llantas.
 - Frecuencia de aplicación de las cargas esperadas durante la vida útil en diferentes áreas del pavimento.
- 3.- Resistencia de flexión del CCR.
- 4.- Módulo de elasticidad del CCR.

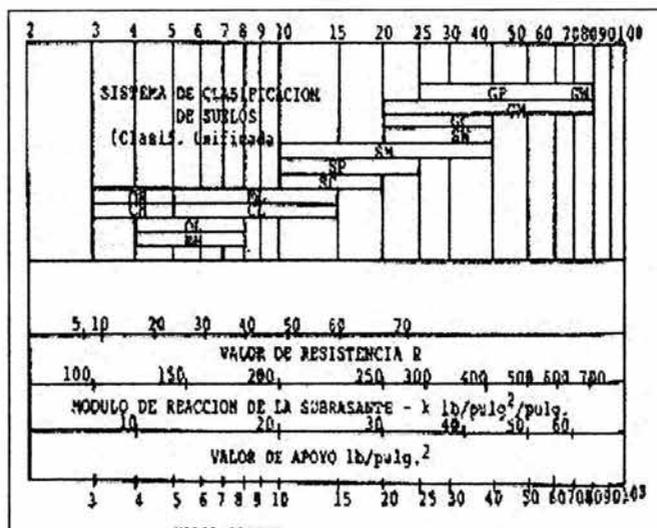
Cada uno de estos aspectos se explican a continuación:

Capacidad de soporte (k).

Uno de los elementos de diseño más importantes es aquel relacionado con la capacidad de soporte que la sub-rasante y la sub-base darán al pavimento de CCR. Esta capacidad se expresa a través del módulo de reacción k (en kg/cm^3 o en pci, pounds per cubic inch), obteniendo usualmente en campo. Como en ésta etapa no es posible acceder a un valor real de k (no se han construido ni la sub-rasante ni la sub-base) es preciso recurrir a un valor estimado del mismo.

Este valor aproximado de k (para la sub-rasante) se obtiene correlacionándolo con el valor relativo de soporte (VRS) del suelo y su clasificación (ver gráfica 3.2). Al tomar en cuenta la sub-base, se presenta un incremento en el valor de k , que deberá

tomarse en cuenta en el diseño del espesor de CCR. Este nuevo valor (k') se da en función del módulo de reacción de la sub-rasante y el probable espesor de la sub-base, ver tabla 3.3 a), b) .



[20]

Valor relativo de soporte-CBR

(Gráfica 3.2 Valores para el módulo de reacción k)

Tabla 3.3 a) Efecto del espesor de la sub-base en los valores de K.

Valor K de la sub-rasante (lb/pulg ³)	Valor K (k') de la sub-base, (lb/pulg ³).			
	4 pulg	6 pulg	9 pulg	12 pulg
50	65	75	85	110
100	130	140	160	190
200	220	230	270	320
300	320	330	370	430

a) sub-base granular

* 20.- Tayabji, Shiraz Dr. Diseño de Espesores de Pavimentos de Concreto Compactado con Rodillos. Artículo del mes. Centro de Documentación Técnica. Dirección General de Servicios Técnicos. S.C.T., México, Agosto, 1991. Págs. 16-21, 23-31.

Tabla 3.3 b) Efecto del espesor de la sub-base en los valores de K.

Valor K de la sub-rasante (lb/pulg ³)	Valor K (k') de la sub-base, (lb/pulg ³).		
	4 pulg	6 pulg	8 pulg
50	170	230	310
100	280	400	520
200	470	640	830
b) sub-base estabilizada			

[20]

Cargas vehiculares.

Otro factor muy importante es el tráfico esperado y sus características, ya que, de éste dependen las cargas que se aplican a la superficie. La información que se recabe debe ser la más completa posible y debe incluir: magnitud de las cargas en las ruedas y entre ejes, y la frecuencia de operación de los vehículos más pesados que usarán el pavimento.

Usualmente, el vehículo más pesado controla el diseño, aún cuando el diseño deberá revisarse también para vehículos no tan pesados pero cuya frecuencia de tránsito es mayor, ver tablas 3.4 y 3.5.

* 20.- Tayabji, Shiraz Dr. Diseño de Espesores de Pavimentos de Concreto Compactado con Rodillos. Artículo del mes. Centro de Documentación Técnica. Dirección General de Servicios Técnicos. S.C.T., México, Agosto, 1991. Págs. 16-21, 23-31.

Tabla 3.4 Tipos de tráfico (seleccione A, B,C o D y aplicarse -según la tabla 3.5)

1. Estacionamiento para autos y carriles de acceso interiores		
Tipo A		
Número limitado de coches, paneles y camionetas, más dos camiones por semana con cargas axiales hasta 5,450 kg.		
2. Centros comerciales, entrada y carriles de servicio.		
Tipo B		Tipo C
Volumen de tráfico en camiones y autobuses		
Bajo (50 a 100 por día)	Alto (300 a 700 por día)	
3. Areas para estacionamiento de autobuses		
Tipo B		Tipo C
Área de estacionamiento	Entrada de carriles	
Carriles interiores (Autobuses vacíos).	exteriores (incluye autobuses cargados).	
4. Areas de estacionamiento para camiones		
Tipo de camión	Areas y carriles	Entradas y carriles
	Interiores	exteriores
Unidades simples	B	C
Unidades múltiples	C	D
Cajas de trailer (cargadas)	D	--

* Un camión se define como un vehículo con al menos 6 llantas; se excluyen las camionetas panel, pick ups y otros vehículos de cuatro llantas.

[21]

* 21.- Gómez Domínguez, Jorge. Pavimentos de concreto sobre asfalto. Construcción y Tecnología, febrero 1992. Págs. 16-17.

Tabla 3.5 Espesores recomendados para el pavimento de concreto, cm.

Tipo de tráfico	Módulo de soporte del pavimento existente		
	Alto $k = 7.0$	Medio $3.6 < k < 6.7$	Bajo $2.1 < k < 3.5$
A	8.9	10.2	11.4
B	14.0	14.0	15.2
C	16.5	17.8	19.0
D	17.8	19.0	20.3

[21]

NOTA: Las anteriores tablas no pertenecen al desarrollo de la investigación del Dr. Shiraz Tayabji, sin embargo, se consideran que pueden ser utilizadas como guías en la selección del tráfico y el espesor del pavimento adecuados.

La máxima carga que una rueda transmita será equivalente a la mitad de la magnitud de carga del eje más pesado cuando el vehículo se encuentre a su máxima capacidad.

El área de contacto de diseño para la carga empleada en tablas es aquella que corresponde al área de contacto entre la losa y cada una de las llantas del vehículo bajo la máxima carga posible. Se estimara como el cociente de la carga por rueda a la presión de inflado de la llanta. En algunas ocasiones, el área de contacto está referida al área total de contacto llanta – superficie, independientemente del dibujo en la misma.

La distancia entre ruedas puede ser un actor muy significativo. Si es muy cerrada (menor al triple del radio de rigidez relativa) se hace necesario considerar la contribución al esfuerzo en el pavimento de más de una rueda. A este respecto, la distribución de las ruedas de todos los vehículos pesados que circulan en terminales o parques industriales, está clasificada en dos tipos:

Configuración simple (una rueda a cada lado del eje), ver gráfica 3.3

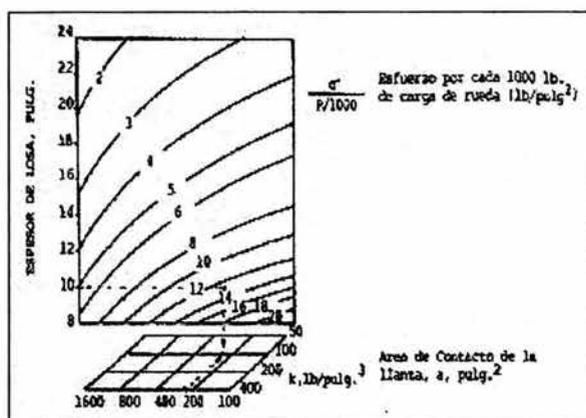
Configuración doble (dos ruedas en cada extremo del eje; en este caso, las dos ruedas están tan cerca una de la otra que su efecto combinado debe tomarse en cuenta), ver gráfica 3.4.

* 21.- Gómez Domínguez, Jorge. Pavimentos de concreto sobre asfalto. Construcción y Tecnología, febrero 1992. Págs. 16-17.

Una carga sobre una configuración doble causa menos tensión al pavimento que si estuviera sobre una configuración simple. Para el caso de vehículos con configuración tándem (dos pares de ruedas muy cercanas entre si y una detrás de la otra) se siguen los criterios para configuración doble aplicando una leve modificación que se explicará más adelante.

Valor de diseño para la flexión.

Una práctica común es considerar el esfuerzo a flexión correspondiente a los 90 días. Este valor es usado porque hay muy poca frecuencia de cargas durante los primeros meses de vida del pavimento con respecto a la que sobrevendrá después. El CCR, al igual que el concreto convencional, incrementará su valor de resistencia, colocándose rápidamente arriba del que se presenta a los 90 días.

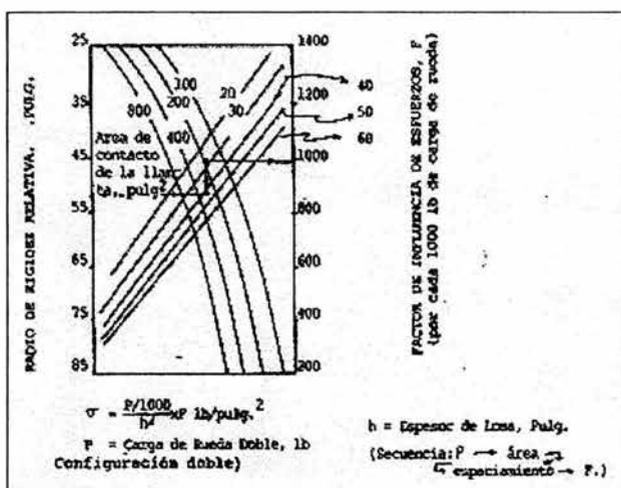


[19,20]

Gráfica 3.3 Configuración sencilla.

* 19.- Structural design of roller- compacted concrete for industrial pavements. Concrete Information. Portland Cement Association (PCA), USA, 1987 Págs. 30-31.

* 20.- Tayabji, Shiraz Dr. Diseño de Espesores de Pavimentos de Concreto Compactado con Rodillos. Artículo del mes. Centro de Documentación Técnica. Dirección General de Servicios Técnicos. S.C.T., México, Agosto, 1991. Págs. 16-21, 23-31.



[19,20]

Gráfica 3.4 Configuración doble.

Valor de diseño para la tensión.

El proceso de diseño requiere conocer tanto las cargas máximas permisibles como las que se apliquen, en tal forma que el espesor resultante asegure un esfuerzo aplicado menor al esfuerzo permisible.

El esfuerzo permisible es dependiente de la frecuencia de aplicación de la carga de diseño. Conociendo el número de veces que la carga se aplicará durante el periodo de diseño, la relación del esfuerzo permisible SR (stress ratio) se obtiene de la tabla 3.6.

Entonces, el esfuerzo permisible (T) para la tensión es:

$$T = SR \times (\text{esfuerzo de flexión a los 90 días})$$

* 19.- Structural design of roller-compacted concrete for industrial pavements. Concrete Information. Portland Cement Association (PCA), USA, 1987 Págs. 30-31.

* 20.- Tayabji, Shiraz Dr. Diseño de Espesores de Pavimentos de Concreto Compactado con Rodillos. Artículo del mes. Centro de Documentación Técnica. Dirección General de Servicios Técnicos. S.C.T., México, Agosto, 1991. Págs. 16-21, 23-31.

Tablas de diseño.

En las tablas de diseño se ha considerado para el CCR un módulo de elasticidad de 4 000 000 psi (280 000 kg/cm²). Si hubiera alguna diferencia importante con respecto a otro valor es necesario aplicar una modificación que se explica más adelante.

Para la tabla de diseño correspondiente a un vehículo de configuración doble es necesario conocer el valor de la rigidez relativa, que se define como:

$$I = [Eh^3 / 12(1-\mu^2) k]^{1/4}$$

donde:

I = rigidez relativa, en pulg. o en cm

E = módulo de elasticidad del concreto, lb/pulg² o kg/cm²

h = espesor del pavimento, pulg. o cm

μ = módulo de Poisson del concreto (0.15, para el CCR).

k = módulo de reacción de la sub-rasante, lb/pulg³ o kg/cm³.

Véase tabla 3.7.

Tabla 3.6 Relación de esfuerzo (SR) y repeticiones de carga admisibles para diseño de pavimentos de CCR.

Relación de esfuerzo.	Repeticiones Admisibles	Relación de esfuerzo	Repeticiones admisibles.
0.40	600,000	0.56	9,700
0.41	465,000	0.57	7,500
0.42	360,000	0.58	5,800
0.43	280,000	0.59	4,500
0.44	210,000	0.60	3,500
0.45	165,000	0.61	2,700
0.46	130,000	0.62	2,100
0.47	100,000	0.63	1,600
0.48	76,000	0.64	1,200
0.49	59,000	0.65	950
0.50	46,000	0.66	740
0.51	35,000	0.67	570
0.52	27,000	0.68	440
0.53	21,000	0.69	340
0.54	16,000	0.70	260
0.55	12,000	--	--

[19,20]

1) La relación de esfuerzo, es el esfuerzo en el pavimento debido a la carga por rueda dividido entre la resistencia a la flexión del CCR.

2) Ecuación de fatiga de diseño para CCR:

$$\text{Log (N)} = 10.258 - 11.198^* (\text{SR})$$

donde: **N** = repeticiones de carga admisibles.

SR = relación de esfuerzo.

* 19.- Structural design of roller-compacted concrete for industrial pavements. Concrete Information. Portland Cement Association (PCA), USA, 1987 Págs. 30-31.

* 20.- Tayabji, Shiraz Dr. Diseño de Espesores de Pavimentos de Concreto Compactado con Rodillos. Artículo del mes. Centro de Documentación Técnica. Dirección General de Servicios Técnicos. S.C.T., México, Agosto, 1991. Págs. 16-21, 23-31.

Tabla 3.7 Valores de "P" (radio de rigidez relativa), en pulg.

"h" (pulg)	K (lb/ pulg ³)								
	50	100	150	200	250	300	350	400	500
6.0	34.84	29.30	26.47	24.63	23.30	22.26	21.42	20.72	19.59
6.5	36.99	31.11	28.11	26.16	24.74	23.64	22.74	22.00	20.80
7.0	39.11	32.89	29.72	27.65	26.15	24.99	24.04	23.25	21.99
7.5	41.19	34.63	31.29	29.12	27.54	26.32	25.32	24.49	23.16
8.0	43.23	36.35	32.85	30.54	28.91	27.62	26.58	25.70	24.31
8.5	45.24	38.04	34.37	31.99	31.25	28.91	27.81	26.90	25.44
9.0	47.22	39.71	35.88	33.39	31.58	30.17	29.03	28.08	26.55
9.5	49.17	41.35	37.36	34.77	32.89	31.42	30.23	29.24	27.65
10.0	51.10	42.97	38.83	36.14	34.17	32.65	31.42	30.39	28.74
10.5	53.10	44.57	40.28	37.48	35.45	33.87	32.59	31.52	29.81
11.0	54.89	46.16	41.71	38.81	36.71	35.07	33.75	32.64	30.87
11.5	56.75	47.72	43.12	40.13	37.95	36.26	34.89	33.74	31.91
12.0	58.59	49.27	44.52	41.43	39.18	37.44	36.02	34.84	32.95
12.5	60.41	50.80	45.90	42.72	40.40	38.60	37.14	35.92	33.97
13.0	62.22	52.32	47.27	43.99	41.61	39.75	38.25	36.99	34.99
13.5	64.00	53.82	48.63	45.26	42.80	40.89	39.35	38.06	35.99
14.0	65.77	55.31	49.98	46.51	43.98	42.02	40.44	39.11	36.99
14.5	67.53	56.78	51.31	47.75	45.16	43.15	41.51	40.15	37.97
15.0	69.27	58.25	52.63	48.98	46.32	44.26	42.58	41.19	38.95
15.5	70.99	59.70	53.94	50.20	47.47	45.36	43.64	42.21	39.92
16.0	72.70	61.13	55.24	51.41	48.62	46.45	44.70	43.23	40.88
16.5	74.40	62.56	56.53	52.61	49.75	47.54	45.74	44.24	41.84
17.0	76.08	63.98	57.81	53.80	50.88	48.61	46.77	45.24	42.78
17.5	77.75	65.38	59.08	54.98	52.00	49.68	47.80	46.23	43.72
18.0	79.41	66.78	60.35	56.16	53.11	50.74	48.82	47.22	44.66
19.0	82.70	69.54	62.84	58.48	55.31	52.84	50.84	49.17	46.51
20.0	85.95	72.27	65.30	60.77	57.47	54.92	52.84	51.10	48.33
21.0	89.15	74.97	67.74	63.04	59.62	56.96	54.81	53.01	50.13
22.0	92.31	77.63	70.14	65.28	61.73	58.98	56.75	54.89	51.91
23.0	95.44	80.26	72.52	67.49	63.83	60.98	58.68	56.75	53.67
24.0	98.54	82.86	74.87	69.68	65.90	62.96	60.58	58.59	55.41

[19,20] Donde: $E = 4'000,000 \text{ lb/pulg}^2$ $\mu = 0.15$ $h = \text{espesor de la losa.}$

* 19.- Structural design of roller- compacted concrete for industrial pavements. Concrete Information. Portland Cement Association (PCA), USA, 1987 Págs. 30-31.

* 20.- Tayabji, Shiraz Dr. Diseño de Espesores de Pavimentos de Concreto Compactado con Rodillos. Artículo del mes. Centro de Documentación Técnica. Dirección General de Servicios Técnicos. S.C.T., México, Agosto, 1991. Págs. 16-21, 23-31.

Corrección para la configuración tándem.

Arriba se dijo que para vehículos tándem es posible usar las tablas para vehículos de configuración doble siempre y cuando se haga una pequeña corrección que incrementa los valores de tensión. Los siguientes factores de corrección se dan en base al área de contacto y deberán multiplicar el valor correspondiente a un vehículo de configuración doble para obtener el valor corregido para la configuración tándem.

Tabla 3.8 Factores de corrección por área de contacto.

Área de contacto (sq. in.)	Factor
100	1.067
200	1.069
400	1.073
800	1.080
1200	1.087

[19,20]

Para una consideración tándem, la frecuencia de carga [number of wheel-load repetitions] no es doble; una pasada de tándem (2 ruedas) es tomada como de frecuencia uno.

Efectos del módulo de elasticidad.

En el cálculo de los esfuerzos, el módulo de elasticidad E no tiene efectos muy importantes. Como se mencionó, las tablas que se presentan se basan en un $E = 4\,000\,000$ psi ($280\,000$ kg/cm²), apropiado para el CCR con propiedades muy similares al concreto convencional.

Si el valor de E difiriera del asumido, se obtendrán factores de corrección que deberán multiplicar al esfuerzo permisible obtenido.

* 19.- Structural design of roller- compacted concrete for industrial pavements. Concrete Information. Portland Cement Association (PCA), USA, 1987 Págs. 30-31.

* 20.- Tayabji, Shiraz Dr. Diseño de Espesores de Pavimentos de Concreto Compactado con Rodillos. Artículo del mes. Centro de Documentación Técnica. Dirección General de Servicios Técnicos. S.C.T., México, Agosto, 1991. Págs. 16-21, 23-31.

Tabla 3.9 Factores de corrección por módulo de elasticidad.

Factores de corrección		
E (psi)	Configuración simple	Configuración doble
3 000 000	1.038	1.046
5 000 000	0.972	0.968

[19,20]

Es importante tener en cuenta que la PCA advierte sobre ciertos espesores (no indica cuales o bajo que condiciones) donde es deseable que estos factores en lugar de multiplicar al esfuerzo, lo dividan.

Como aplicar el uso de las tablas.

A continuación se transcriben algunos ejemplos de diseño para que se aprecie mejor el uso de las tablas mencionadas, así como el proceso de diseño.

Ejemplo 1. (Configuración simple)

Transportador pesado

Número de ruedas = 4

Máxima carga por rueda sencilla = 26 000 lb

Presión de inflado de las llantas = 100 lb/pulg²

Area de contacto de la llanta = 260 pulg²

Resistencia a la flexión del CCR = fr = 700 lb/pulg²

Resistencia a la sub-rasante, k = 100 lb/pulg³

Número diario de aplicaciones de carga de rueda canalizadas (diseño) = 20

Número de aplicaciones de carga de rueda durante un periodo de diseño de 20 años = 146 000

* 19.- Structural design of roller- compacted concrete for industrial pavements. Concrete Information. Portland Cement Association (PCA), USA, 1987 Págs. 30-31.

* 20.- Tayabji, Shiraz Dr. Diseño de Espesores de Pavimentos de Concreto Compactado con Rodillos. Artículo del mes. Centro de Documentación Técnica. Dirección General de Servicios Técnicos. S.C.T., México, Agosto, 1991. Págs. 16-21, 23-31.

Relación de esfuerzo de diseño, $SR = 0.45$

Esfuerzo admisible. $T = 0.45 \times 700 = 315 \text{ lb/pulg}^2$

Esfuerzo admisible por cada 1000 lb de carga = $T/(P/1000) = 315/26 = 12.1 \text{ lb/pulg}^2/1000 \text{ lb.}$

Entrese a la gráfica de diseño para ruedas sencillas (gráfica 3.3), en la parte inferior con una área de contacto de 260 pulg^2 y un valor de k de 100 lb/pulg^3 . Para un esfuerzo admisible de $12.1 \text{ lb/pulg}^2/1000 \text{ lb.}$, se requiere un espesor de losa de **10.1 pulg. (úsense 25 cm).**

Ejemplo 2 (Configuración doble).

Grúa móvil (capacidad de carga, 40 ton)

Número de ruedas = 8 (4 dobles)

Carga máxima de rueda doble = 90 000 lb

Espaciamiento entre ruedas dobles = 26 pulg. (centro a centro)

Presión de inflado de las llantas = 160 lb/pulg^2

Area de contacto de cada llanta = $90\,000/2 /160 = 281 \text{ pulg}^2$

Resistencia a la flexión del CCR = $f_r = 700 \text{ lb/pulg}^2$

Resistencia a la sub- rasante – sub-base, $k' = 200 \text{ lb/pulg}^3$

Número diario de aplicaciones de carga de rueda doble canalizadas = 40

Número de aplicaciones de carga en un periodo de diseño de 20 años = 292 000

Relación de esfuerzo de diseño, $SR = 0.43$

Esfuerzo admisible, $T = 0.43 \times 700 = 301 \text{ lb/pulg}^2$

- a) El primer paso en el uso de la gráfica de diseño para ruedas dobles (gráfica 3.4) es suponer arbitrariamente un espesor de losa, dígame 15 pulg.
- b) Haciendo uso de la tabla 3.7 se determina para dicho espesor y para un valor de k' de 200 lb/pulg^3 un valor de $I = 49.0$
- c) A partir del valor de I determinado, en la gráfica de diseño de la gráfica 3.4, dirigirse a la derecha para interceptar el área de contacto de la llanta, entonces desplácese verticalmente para interceptar con el espaciamiento de ruedas dobles. De este punto, moverse a la derecha para leer un valor de F (factor de influencia por cada 1000 lb de carga de rueda doble) de 930.

d) Calcular el esfuerzo debido a la carga como sigue:

$$\text{Esf.} = (\text{Carga de rueda doble}/1000) (1/(\text{espesor de la losa})^2) (F) = \\ = (90\,000/1000) (1/(15 \times 15)) (930) = 372 \text{ lb/pulg}^2.$$

e) Se repite el proceso determinando esfuerzos para otros espesores de losa supuestos y se tabulan los datos como sigue:

Espesor de losa (pulg)	Valor de l (pulg)	F	Esfuerzo debido a la carga (lb/pulg ²)
15	49.0	930	372
16	51.4	955	336
17	53.3	970	302

f) Seleccionar un espesor de losa de diseño para el cual el esfuerzo debido a la carga sea igual o menor que el esfuerzo admisible. En este ejemplo para el esfuerzo admisible de 301 lb/pulg², el espesor de diseño es **17 pulg. (43 cm)**.

3.3.1.3 Procedimiento de diseño de tránsito mixto.

El procedimiento de diseño presentado es aplicable cuando puede identificarse como carga de rueda de diseño un tipo sencillo de carga de rueda. Cuando existe tránsito mixto, entonces es necesario calcular el daño de fatiga acumulado debido al tránsito mixto. Esta técnica requiere los siguientes pasos:

- 1.- Suponer un espesor del pavimento.
- 2.- Calcular el esfuerzo en el pavimento T , utilizando las gráficas 3.3 ó la 3.4 según el tipo de carga de rueda.
- 3.- Calcular la relación de esfuerzo (SR), para cada tipo de carga de rueda.
- 4.- Determinar el número de repeticiones de carga admisible (N_a) para cada tipo de carga de rueda, utilizando la tabla 3.6.
- 5.- Determinar el consumo de fatiga para cada tipo de carga de rueda como sigue:

$$F_n = (N_e, n) / (N_a, n)$$

donde:

F_n = consumo de fatiga para la carga de la n -ésima carga de rueda.

$E_{n,n}$ = número esperado de repeticiones de la n -ésima carga de rueda durante el periodo de diseño.

N_a, n = número admisible de repeticiones de la n -ésima carga de rueda.

- 6.- Sume los consumos de fatiga para todas las cargas por rueda.
- 7.- Si el consumo de fatiga es mayor o menor del 100%, repetir los pasos 2 a 6 con un mayor o menor espesor de pavimento, según sea el caso. El espesor de diseño es aquel para el cual el consumo total de fatiga sea de 100% o menos.

3.4 Método constructivo.

Los pasos que se siguen en el método constructivo son:

1.- Preparación de la sub- rasante.

Para ésta y la base se considera los mismos principios que para los pavimentos de concreto convencional. Cualquier área blanda en la sub- rasante debe ser reemplazada con material bien graduado, compactado a la densidad requerida.

En un principio, se pensó que la estabilización de suelos con cemento era aconsejable solamente para aquellas zonas donde no se podían encontrar el material graduado que cumpliera con las especificaciones de sub-base o base, sin embargo se ha comprobado que la estabilización prolonga la vida útil de los pavimentos de concreto, evitando que se presenten problemas de bombeo, falta de soporte y erosión entre otros.

[6,16,18]

En general los suelos arenosos a finos se llegan a estabilizar con proporciones de 5-15% de cemento en peso, en cambio en los materiales granulares de mayor tamaño los porcentajes varían de 2-5% en peso.

[18]

* 6.- Gómez Domínguez, Jorge. Construcción de caminos de bajo volumen con CCR. Concreto Compactado con Rodillos. Curso IMCYC. Octubre, 1988. Págs. 23-28.

* 16.- Figueroa Gallo, Donato. Carreteras de CCR. La mejor solución. Construcción y Tecnología. IMCYC. Octubre, 1989. Págs. 8-9.

* 18.- Gómez Domínguez, Jorge. Diseño de Pavimentos Rígidos. Construcción y Tecnología. IMCYC. Abril, 1991. Págs. 29-34.

2.- Mezclado del concreto y producción.

El CCR es mezclado normalmente en una mezcladora tipo Purgmill con doble flecha, que se usa normalmente para mezclar bases estabilizadas con cemento o concreto asfáltico. El CCR se ha producido exitosamente en pre-mezcladoras convencionales. La producción del concreto debe proceder sin interrupción y bien coordinada con la operación de colocación.

3.- Transporte.



Fig. 3.2 Camión de volteo para transporte y carga de material pétreo.



Fig. 3.3 Cargador frontal sobre llantas para carga en banco de extracción de materiales pétreos.

El CCR puede transportarse en camiones de volteo y ser vertido directamente en la tolva de la pavimentadora. Se debe evitar la pérdida de humedad durante el acarreo.

Se recomienda un tiempo de acarreo no mayor de 15 minutos ni una distancia mayor de dos millas (aprox. 3200 m.).

4.- Colocación.

Esta se ha realizado exitosamente con pavimentadoras asfálticas convencionales.

El uso de pavimentadoras de alta capacidad ha probado ser la mejor opción para obtener altas densidades en PCCR.

[20]

Antes de la operación de tendido, la base o sub – rasante tiene que ser humedecida con un rociador para evitar la pérdida de humedad en la base de la capa de concreto. La operación de tendido requiere un control preciso del espesor y nivelación del pavimento. Esto puede lograrse con controles automáticos.

El CCR se coloca de una sola vez cuando el espesor del pavimento es del orden de 25 cm o menos. Cuando el espesor es mayor de 25 cm, el concreto puede colocarse en 2 o 3 capas.

En este último caso, el espesor de las capas será de entre 6 a 10 pulg. (15 a 25 cm), dependiendo del diseño específico. El ancho del pavimento puede ser crítico para la compactación y textura superficial en las orillas del mismo, particularmente si las secciones son mayores de 14 pies (4.30 m) de ancho. El material tiende a segregarse en las orillas, debido al efecto de la hélice que distribuye la mezcla en la pavimentadora.

Se han obtenido buenos resultados en España y México al extender y nivelar el CCR con motoconformadoras.

Cuando el pavimento se construye en varias etapas, debe prestarse mucha atención al intervalo de tiempo que transcurre entre la colocación de capas sucesivas. En clima cálido, dicho intervalo no deberá exceder de una hora. En clima frío y si las condiciones de viento lo permiten, pueden dejarse pasar entre dos y tres horas.

El intervalo de tiempo es crítico para asegurar una liga adecuada en la interfase de capas de capas sucesivas. Si existe una liga adecuada en las interfases se desarrollará una resistencia al corte de cuando menos 14 kg/cm² a los 90 días.

* 20.- Tayabji, Shiraz Dr. Diseño de Espesores de Pavimentos de Concreto Compactado con Rodillos. Artículo del mes. Centro de Documentación Técnica. Dirección General de Servicios Técnicos. S.C.T., México, Agosto, 1991. Págs. 16-21, 23-31.

Si no se desarrolla una resistencia al corte adecuada en la interfase, entonces cada capa puede actuar independiente de las otras. Esta situación tiende a reducir la capacidad de carga del pavimento.

5.- Compactación vibratoria.

La principal ventaja de consolidar el CCR con rodillos vibratorios es que las mezclas pueden ser usadas en forma económica, con menos agua se podrá usar menos cemento. Una baja relación agua-cemento es beneficiosa para la resistencia temprana.



Fig. 3.4 Compactador vibratorio de rodillo liso utilizado en compactación de pavimentos (CCR).

Los rodillos vibratorios pueden ser de uno o de dos tambores, con pesos que varían desde 3 hasta más de 14 toneladas. La densidad máxima que el CCR puede alcanzar es de 160 lb pie³ (aprox. 2560 kg/m³).

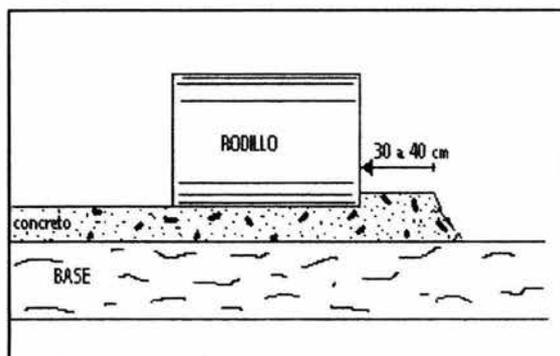
5.1.- Secuencia de compactación.

En el caso de tratarse de un solo carril, primero se compactan las orillas y luego el centro, traslapando las pasadas.

Cuando son varios carriles una de las orillas se deja sin compactar para unirse con el siguiente carril. Es ideal si un número de pavimentadoras igual al de

carriles se hacen correr paralelamente y una tras otra, para crear de inmediato una junta fresca.

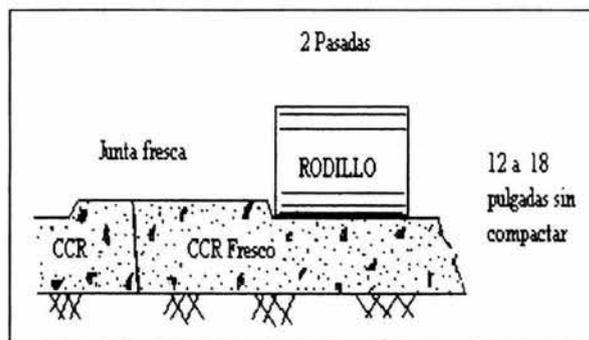
La densidad de compactación debe revisarse siempre, aunque suele alcanzarse la compactación completa del CCR con cuatro pasadas de un rodillo vibratorio de 10 ton., ver figuras 3.5, 3.6, y 3.7.



(fig. 3.5 Procedimiento de compactación).

Procedimiento de compactación para evitar el desplazamiento y grietas en el concreto compactado en la orilla: el rodillo deja sin compactar la orilla, que se consolidará después con equipo ligero (Placa vibratoria o rodillo de poco peso).

[9]



(Fig. 3.6 Construcción de junta fresca)

Compactar a partir de un pie de la orilla exterior del último carril, también en la junta fresca y el concreto que falta.

[9]

* 9.- Corro, Santiago. Estudio del concreto compactado con rodillo, para su aplicación en carreteras. Primera y Segunda partes. SCT- Instituto de Ingeniería, UNAM. México, Noviembre, 1991 Págs. 66-74.

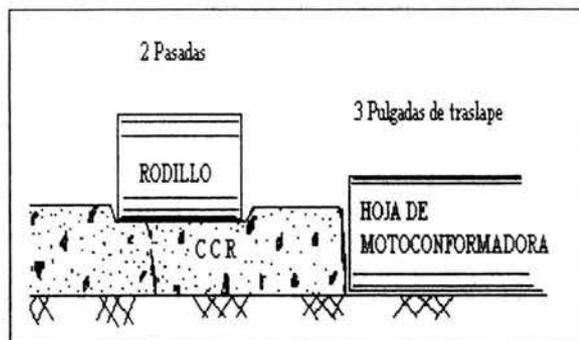


Fig. 3.7 (Construcción de junta fría.)

Recorte de orilla con motoconformadora, humedecer la orilla del concreto y colocar el nuevo, compactar la junta fría con dos o más pasadas.

[9]

5.2.- Juntas.

Las juntas pueden ser transversales (de contracción o de construcción) o longitudinales.

Las juntas transversales, ya sean de contracción o de construcción, cuando se forman perpendiculares a la dirección del tráfico son ruidosas, por lo que se aconseja crearlas esviejadas, para que las llantas de los vehículos no las toquen simultáneamente.

En España, 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, tales normas no estipulan juntas longitudinales en el pavimento.

Las juntas de construcción se construyen cuando se presenta el fin de jornada, o bien cuando el clima u otras condiciones obliguen a suspender el colocado y tendido del CCR.

El procedimiento a seguir es efectuar un corte a 90 grados a todo lo ancho del pavimento y tender una rampa de arena o material suelto para que el equipo pueda subir al área de trabajo cuando las actividades se inicien.

* 9.- Corro, Santiago. Estudio del concreto compactado con rodillo, para su aplicación en carreteras. Primera y Segunda partes. SCT- Instituto de Ingeniería, UNAM. México, Noviembre, 1991. Págs. 65-74.

Posteriormente, el material producto del corte y el material suelto se retiran para continuar el procedimiento de tendido.

Pueden también clasificarse en frías o frescas, dependiendo del menor o mayor estado de hidratación, respectivamente. Siempre que se forme una junta fría es muy probable que esta desarrolle una baja adherencia, la cual puede mejorarse con un adecuado método constructivo.

[18]

No existen reportes de cambios reales en la consistencia o en las 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 se ha limpiado con cepillo, humedecido y pintado con un mortero rico en cemento, o una pasta con una relación agua-cemento baja.

Por otro lado, los PCCR, sufren grietas de contracción espaciadas de 10 a 25 m, de donde en ocasiones se desprende el concreto; esto se soluciona formando juntas de contracción a distancias prefijadas, cortando el concreto hasta una profundidad de $\frac{3}{4}$ de pulg del espesor total del pavimento. El ranurado debe hacerse dentro de las 8 hora de haberse tendido el CCR.

[18]

6.- Curado.

En la mayoría de los casos, se aplica por lo menos durante 7 días continuos, agua por aspersión o mantas húmedas. Se obtienen mejores resultados con aspersión automática.

En trabajos pequeños, el curado puede hacerse cubriendo el pavimento con arena húmeda, lo cual proporciona mejores resultados que otros métodos.

7.- Textura final.

Para obtener una superficie de rodamiento resistente al patinaje, se ha observado que la calidad de la textura final de la superficie depende del tamaño máximo del agregado

* 18.- Gómez Domínguez, Jorge. Diseño de Pavimentos Rígidos. Construcción y Tecnología. IMCYC. Abril, 1991. Págs. 29-34.

grueso diseñado, así como del uso del compactador de llantas neumáticas después del de rodillo vibratorio ayuda a obtener una textura más cerrada, por experiencia de constructores aplicando (CCR), el exceso de compactación puede provocar grietas de arrastre, las tolerancias varían de entre $3/8$ a $1/2$ de pulgada (por cada 3 m, aproximadamente). 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 de tránsito bajo se ha optado dejar la superficie de tránsito libre. Si acaso, se le da un acabado con allanadora mecánica. En estas condiciones, es recomendable una velocidad máxima de 40 km/hr.

CAPITULO IV. RELIZACION DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO.

4.1 Generalidades.

Se analizan los resultados obtenidos en una serie de pruebas de laboratorio (compresión simple y tensión) para dos grupos de cilindros: uno incluye cilindros hechos con CCR y otro, cilindros elaborados con concreto hidráulico convencional. Los objetivos de esta serie de pruebas

son los siguientes:

- 1.- Conocer si existe verdaderamente un ahorro de cemento respecto al concreto convencional (CC) al emplear CCR, así como la relación del mismo.
- 2.- Determinar la relación entre resistencia nominal y resistencia real para cada grupo de cilindros.

Conviene aclarar que deberá entenderse por concreto convencional (CC), es el concreto hidráulico usado normalmente en las aplicaciones, a saber, presas, pavimentos, edificación y otros. El concreto compactado con rodillos (CCR) es aquel cuyas propiedades físicas facilitan el empleo de equipo como: motoconformadoras y rodillos vibratorios en su colocación y cumple con ciertas características, tales como tener un revenimiento igual a cero.

Las pruebas se realizaron en el Laboratorio del Departamento de Pruebas Estructurales de la Dirección General de Servicios Técnicos, dependiente de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, teniendo una duración de 5 meses. Se eligieron estas instalaciones debido tanto a las facilidades otorgadas por las autoridades respectivas, como la existencia en aquellas del tipo necesario para llevar a cabo la elaboración de cilindros por el método VeBe. Este método se escogió debido a que su empleo garantiza una mayor representatividad de las pruebas al no afectar la granulometría de los agregados. Por otra parte, el método VeBe (cuyas líneas básicas se explicaron en el capítulo 2), tiende a generalizarse en España, país con una basta experiencia en la fabricación y aplicación de CCR.

La arena que se empleó en las pruebas fue obtenida de un banco ubicado en la zona de Chiluca y la grava de un banco localizado en Atizapán de Zaragoza, ambos en el Estado de México. El cemento fue tipo Portland ordinario, marca Tolteca. Estos materiales fueron proporcionados en su totalidad por la Dependencia.

4.2 Descripción de los trabajos.

Se realizaron las mezclas de concreto con base a los requerimientos de resistencia buscados, esto es, la relación agua-cemento así como las cantidades de material a usar. Estas mezclas se elaboraron en una revolvedora mecánica, con un tiempo aproximado de mezclado de tres minutos y medio.

De cada mezcla se obtuvo una serie de cilindros elaborados por medio de los procedimientos normal (en unos casos) y VeBe (en otros). Se dejaron curar a medio ambiente durante veinticuatro horas, luego la mayor parte se almacenó en el cuarto en el cuarto de curado a una temperatura media de 23°C y el resto recibió un tratamiento de curado acelerado empleando el procedimiento de la Olla de Malhotra a una temperatura de 200°C. Los valores de resistencia de estos últimos cilindros se consideran representativos de una resistencia normal a los siete días de curado.

El procedimiento de curado acelerado consiste en: Llenar con agua una Olla de Malhotra y se hace calentar hasta los 200°C. Tan pronto se alcanza esta temperatura se introducen en la Olla los cilindros, aún encofrados en sus moldes y se dejan reposar ahí durante tres y media horas. Un termostato ayuda a mantener constante la temperatura en la Olla. Al final se sacan los cilindros, se dejan escurrir, secar y se desmoldan, procediendo a probarlos a compresión.

La ruptura de los cilindros, se realizó a las veinticuatro horas (curado acelerado) y a los siete y veintiocho días, a compresión y por tensión. Es importante destacar que la resistencia de los cilindros de concreto normal a los veintiocho días resultó ser del orden del 70 % del valor teórico.

Los resultados de los cilindros elaborados con las dos mezclas distintas y los dos procedimientos de fabricación, se comparan entre sí, obteniéndose las conclusiones correspondientes.

4.3 Ensayes a compresión y Tensión.

En las pruebas de compresión se utilizó un dispositivo electrónico para regular la velocidad de carga sobre el cilindro con el fin de obtener un esfuerzo constante sobre el mismo.

El modo para determinar la velocidad de carga es el que sigue:

Por norma, tiempo de carga $3 \text{ kg/cm}^2\text{-seg.} \pm 0.5$

Sección transversal promedio **179 cm^2** .

$1 \text{ KN} = 101.9 \text{ Kg}$.

$3 \times 179.0 = 537 \text{ kg/seg}$.

$537/101.9 = 5.27 \text{ KN/seg}$.

Aproximación del equipo a compresión = **0.1 KN/seg** .

Por lo tanto la constante de velocidad que deberá conservarse durante la realización de la prueba será $5.27/0.1 = 52.70$, el cual se redondeó a **53**.

4.4 Dosificación de las mezclas, para CCR de $f'c = 300$ y 350 kg/cm^2 , y 300 y 350 kg/cm^2 para CC.

4.4.1 Mezcla A. Dosificación para CCR. ($f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$)

– Peso volumétrico seco grava arena compactado con varilla (PVg-a).	1746 kg/m^3
– Densidad de la grava (Dg)	2.6 Ton/m^3
– Densidad de la arena (Da)	2.22 Ton/m^3
– Densidad del cemento (Dc)	3.1 Ton/m^3
– Proporción de grava (%g)	60 %
– Proporción de la arena (%a)	40 %
– Absorción de la grava (Ag)	2.1 %
– Absorción de la arena (Aa)	7.3 %

Con base a una resistencia $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$. La relación agua-cemento es de 0.42. Con base en el tamaño nominal máximo, el volumen de aire (Vaire) es igual a 0.5%.

$V_g = \frac{(P_{Vg-a}) (\%g) (1+A_g)}{D_g}$	Volumen de grava
$V_a = \frac{(P_{Vg-a}) (\%a) (1+A_a)}{D_a}$	Volumen de arena
$V_c = \frac{V_l}{1 + (D_c \times A/C)}$	Volumen de cemento
$V_w = V_c \times D_c \times A/C$	Volumen de agua
$W_g = (P_{Vg-a}) (\%g)$	Peso de grava
$W_a = (P_{Vg-a}) (\%a)$	Peso de arena

Para la presente dosificación los valores son, para un metro cúbico de concreto:

$$V_g = 403.1 \text{ dm}^3 \quad V_c = 109.0 \text{ dm}^3 \quad W_a = 698.4 \text{ kg.}$$

$$V_a = 314.0 \text{ dm}^3 \quad V_w = 143.0 \text{ dm}^3 \quad W_g = 1048.0 \text{ kg.}$$

Al momento de mezclarse los materiales se procurará tener a la arena en estado saturado, resultando una diferencia entre el agua absorbida por la arena y la necesaria por la dosificación.

Estas cantidades se obtuvieron con base a un programa de computadora, apoyado en las recomendaciones ACI para proporcionamiento de concreto con cero revenimiento.

4.4.2 Mezcla B . Dosificación para concreto normal o CC ($f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$).

En todas las dosificaciones para concreto normal (o convencional) se usaron como datos base los proporcionados por el empleo de las tablas para dosificación de concreto que aparecen en los apuntes de apoyo para la elaboración de precios unitarios de Conservación de Carreteras, de la SCT (Secretaria de Comunicaciones y Transportes).

- Densidad de la grava (D_g)	2.6 Ton/m ³
- Densidad de la arena (D_a)	2.22 Ton/m ³
- Densidad del cemento (D_c)	3.1 Ton/m ³

– Proporción de grava (%g)	70 %
– Proporción de la arena (%a)	30 %
– Absorción de la grava (Ag)	1.9 %
– Absorción de la arena (Aa)	7.0 %

Con base a una resistencia $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ y un revenimiento de 5 cm, la relación agua-cemento es de 0.48. Con base en el tamaño nominal máximo (20 mm), el volumen de aire (Vaire) es igual a 0.2%.

Para la presente dosificación los valores son, para un metro cúbico de concreto:

$$\begin{array}{lll} Vg = 447.5 \text{ dm}^3 & Vc = 129.0 \text{ dm}^3 & Wa = 412.0 \text{ kg.} \\ Va = 185.6 \text{ dm}^3 & Vw = 243.0 \text{ dm}^3 & Wg = 1163.4 \text{ kg.} \end{array}$$

4.5 Resultados obtenidos.

A continuación se presentan las tablas que contienen los resultados obtenidos en las pruebas de compresión y tensión para los diferentes cilindros. La serie se divide en dos partes: cilindros de CCR y cilindros de concreto normal, según la resistencia proyectada: 300 kg/cm^2 . Al margen de las tablas se mencionan la resistencia obtenida y el tipo de mezcla al que corresponden.

Tabla 4.1 CCR F'c = 350 kg/cm².

Cil. N°	Edad días	Peso Kg	Diam. cm.	Alt. cm.	Carga rup. Kg.	Esf kg/cm²	E/f ' tipo esf.
1	2*	12.65	15.3	30.3	49157	267.4	0.76 C
2	2*	12.74	15.2	30.5	48616	267.9	0.77 C
3	2*	12.67	15.2	30.6	48453	267.0	0.76 C
4	2*	12.59	15.3	30.5	51704	281.2	0.80 C
5	2*	12.50	15.2	30.5	39527	216.3	0.62 C
6	7	12.62	15.2	30.4	55230	304.4	0.87 C
7	7	12.73	15.3	30.6	49320	268.3	0.77 C
8	7	12.67	15.3	30.4	51205	278.5	0.80 C
9	7	12.54	15.2	30.3	63076	247.6	0.99 C
10	7	12.63	15.3	30.3	61955	336.9	0.96 C
11	7	12.70	15.3	30.5	64808	352.5	1.01 C
12	28	12.56	15.1	30.4	68986	385.2	1.10 C
13	28	12.53	15.2	30.5	66031	363.9	1.04 C
14	30	12.73	15.3	30.4	66541	361.9	1.03 C
15	30	12.77	15.4	30.5	68579	368.2	1.05 C
16	30	12.63	15.4	30.2	58083	311.8	0.89 C
17	30	12.60	15.3	30.3	58287	317.0	0.91 C
18	30	12.20	15.3	30.6	63789	346.9	0.99 C

***Curado acelerado.**

C = compresión

T = tensión

Tabla 4.2 CCR F'c = 300 kg/cm².

Cil. N°	Edad días	Peso Kg	Diam. cm.	Alt. cm.	Carga rup. Kg.	Esf kg/cm ²	E/f'	tipo esf.
1	2*	12.77	15.2	30.3	48800	268.9	0.90	C
2	2*	12.70	15.2	30.4	44400	244.7	0.82	C
3	2*	12.83	15.2	30.6	51400	283.3	0.94	C
4	7	12.88	15.5	30.7	46300	245.4	0.82	C
5	7	12.85	15.4	30.8	47000	252.3	0.84	C
6	7	12.90	15.3	30.5	25000	34.1	1.14	T
7	7	12.87	15.3	30.6	23700	32.2	1.07	T
8	7	12.87	15.4	30.6	25900	35.0	1.17	T
9	14	12.89	15.3	30.5	27100	36.9	1.23	T
10	14	12.95	15.4	30.5	25000	33.9	1.13	T
11	14	12.95	15.5	30.5	21000	28.3	0.94	T
12	14	12.93	15.4	30.3	22000	30.0	1.00	T
13	28	12.59	15.3	30.4	71840	390.7	1.30	C
14	28	12.63	15.3	30.1	65624	356.9	1.19	C
15	28	12.75	15.3	30.5	67356	366.3	1.22	C
16	28	12.77	15.3	30.2	37000	25.5	0.85	T
17	28	12.77	15.4	30.4	33600	22.8	0.76	T
18	28	12.72	15.2	30.4	34300	23.6	0.79	T

*Curado acelerado.

C = compresión

T = tensión

Tabla 4.3 Normal F'c = 350 kg/cm².

Cil. N°	Edad días	Peso Kg	Diam. cm.	Alt. cm.	Carga rup. Kg.	Esf kg/cm²	E/f ' tipo esf.
1	4*	12.12	15.2	30.4	32995	181.8	0.52 C
2	4*	12.28	15.2	30.5	33189	182.9	0.52 C
3	4*	12.29	15.3	30.5	37000	201.2	0.57 C
4	4*	12.42	15.3	30.4	16700	22.9	0.65 T
5	4*	12.50	15.3	30.5	16800	22.9	0.65 T
6	5*	12.44	15.3	30.5	15100	20.6	0.59 T
7	7	12.44	15.2	30.2	27809	153.3	0.44 C
8	7	12.37	15.3	30.5	28654	155.9	0.45 C
9	7	12.50	15.3	30.3	29928	162.8	0.47 C
10	7	12.25	15.3	30.2	14200	19.6	0.56 T
11	7	12.42	15.2	30.4	15400	21.2	0.61 T
12	7	12.50	15.4	30.5	16200	21.9	0.63 T
13	28	12.46	15.2	30.5	40434	222.8	0.64 C
14	28	12.45	15.4	30.1	36776	197.4	0.56 C
15	28	12.45	15.3	30.5	39527	215.0	0.61 C
16	28	12.35	15.3	30.5	23200	31.7	0.91 T
17	28	12.48	15.3	30.5	22400	30.6	0.87 T
18	28	12.45	15.3	30.5	23300	31.8	0.91 T

*** Curado acelerado C = compresión T = tensión**

Tabla 4.4 Normal F'c = 300 kg/cm².

Cil. N°	Edad días	Peso Kg	Diam. cm.	Alt. cm.	Carga rup. Kg.	Esf kg/cm²	E/f' tipo esf.	tipo
1	4*	12.30	15.3	30.5	24599	133.8	0.45	C
2	4*	12.32	15.3	30.5	24191	131.6	0.44	C
3	4*	12.26	15.2	30.6	25485	140.5	0.47	C
4	4*	12.21	15.3	30.6	14500	19.7	0.66	T
5	4*	12.24	15.3	30.4	13500	18.5	0.66	T
6	5*	12.14	15.3	30.5	13400	18.3	0.61	T
7	7	12.27	15.2	30.5	12900	17.7	0.59	T
8	7	12.25	15.2	30.4	14200	19.6	0.65	T
9	7	12.15	15.2	30.0	13600	19.0	0.63	T
10	7	12.28	15.2	30.4	24276	133.8	0.44	C
11	7	12.40	15.2	30.3	25923	142.9	0.48	C
12	7	12.20	15.3	30.2	24995	135.9	0.45	C
13	28	12.16	15.3	30.2	20600	28.4	0.95	T
14	28	12.24	15.2	30.4	35706	196.8	0.66	C
15	28	12.25	15.3	30.5	37713	205.1	0.68	C
16	28	12.24	15.2	30.5	35685	191.6	0.64	C
17	28	12.27	15.4	30.6	17400	23.5	0.78	T
18	28	12.47	15.4	30.5	18500	25.0	0.83	T

*Curado acelerado.

C = compresión

T = tensión

4.6 Análisis de resultados.

Revisando tanto los datos referentes a las dosificaciones de las mezclas como a las resistencias obtenidas en cada uno de los grupos que les corresponden, se observa lo siguiente:

- 1.- Para el caso del CCR, la resistencia real a los 28 días es mayor que la resistencia nominal. Esto es para el caso de un $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$, donde se da un incremento de hasta el 30 %. Para la mezcla de $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$, los valores reales son semejantes a los nominales, aunque presentan una variación a la alza de un 5 %.
- 2.- Para el caso del concreto convencional (CC), la resistencia real a los 28 días es en todos los casos, bastante menor que la nominal, llegándose a decrementos de hasta un 35 o 40%. Esto puede explicarse si se considera que las dosificaciones fueron hechas de manera directa, es decir, el valor de diseño para la resistencia fue idéntico al valor nominal de ésta, con lo cual no se consideran posibles defectos de material o errores de trabajo. Lo correcto hubiera sido emplear un factor que incrementara el valor nominal aproximado, digamos en un 20 % y tomar este valor aumentado como el valor de diseño.
- 3.- Empleando la técnica del CCR hay una disminución en el consumo de cemento con respecto al concreto convencional (CC) de aproximadamente un 10%.
- 4.- La proporción de grava usada en la mezcla disminuye en volumen a razón del 10% cuando se emplea CCR.
- 5.- La proporción de arena se incrementa aproximadamente en un 10% al usar CCR.

En apariencia, estos montos pudieran resultar poco significativos pero si se consideran para volúmenes de concreto muy grandes, el ahorro en costos resulta ser cuantioso.

CAPITULO V. EJEMPLO PRACTICO DE APLICACIONES DE PAVIMENTOS DE CCR EN MEXICO. [22]

Se expone un caso donde se ha aplicado la técnica del CCR exitosamente en el campo de las vías terrestres y que representa un antecedente muy importante para los fines a saber, la viabilidad del pavimento de CCR como un sustituto del pavimento asfáltico.

En la construcción de la presa Hidroeléctrica "Aguamilpa", que la Comisión Federal de Electricidad realizó al Noroeste de la ciudad de Tepic, en el Estado de Nayarit, una de las obras prioritarias complementarias al Proyecto es el acceso terrestre, necesario para el transporte de personal, maquinaria pesada, equipo y de los materiales que en forma constante se transportó a la obra durante su proceso constructivo.

Por tal motivo, para contar con un camino en buenas condiciones durante toda la época del año, que además reduzca los tiempos de recorrido, se contempló la pavimentación del camino de terracería ya existente, para lo cual se ha procedido mediante varias etapas constructivas a la realización de los trabajos de terracerías y pavimentación en toda su longitud, esto es, desde el kilómetro 0 + 000 al 36 + 500, de acuerdo con el proyecto geométrico elaborado y cuya finalidad es mejorar las características del camino, incluyendo el drenaje.

5.1 Camino de acceso al Proyecto Hidroeléctrico Aguamilpa (Estado de Nayarit).

Localización del proyecto.

En el Estado de Nayarit, y aproximadamente a 13 km al Noroeste de la ciudad de Tepic, se encuentra el origen del acceso al Proyecto Hidroeléctrico Aguamilpa, aprovechando un camino de terracería existente que presenta regulares características tanto en su alineamiento horizontal como vertical. Su construcción data de 1968 y comunica varias poblaciones ubicadas en el municipio de Tepic.

La zona referida se halla en la Sierra Madre Occidental y está caracterizada por rocas ígneas extrusivas (principalmente del mioceno y terciario) que cubren y sepultan rocas intrusivas antiguas.

* 22.- Construcción de sub-base y base rígidas con cemento Portland tipo I en camino de acceso al Proyecto Hidroeléctrico Aguamilpa. Comisión Federal de Electricidad, Tepic, Nayarit, 1991.

La región está modelada en las cercanías por montañas de fuerte pendiente, mesetas intermedias, barrancas, cañones y acantilados que constituyen un relieve muy accidentado. El clima en esta región corresponde a los tipos cálido y semi-cálido, con lluvias en verano.

Hidrográficamente la zona está comprendida en la vertiente del Pacífico y es afluente de la zona del Río Grande, Santiago, que tiene su origen en la Laguna de Chapala en el Estado de Jalisco, desembocando finalmente en el Océano Pacífico, en la parte media del Estado de Nayarit. Localmente el drenaje es de gran densidad y con patrones radiales en las partes altas, como son las sierras.

Así mismo cruzan el camino un gran número de arroyos y conducciones a través de canales que sirven para el riego de los diversos cultivos existentes en la mayor parte del tramo, los cuales desembocan finalmente en el Río Grande de Santiago.

Elección del tipo de pavimento y especificaciones para su ejecución.

Una vez iniciadas las obras de pavimentación se tuvo un escaso avance en los trabajos debido sobretodo a la temporada de lluvias, la cual inclusive, en algunos casos llegó a paralizar por completo a éstos y ocasionar graves daños por la saturación en las capas de terracería.

Por ello se determinó el empleo de un procedimiento constructivo que mediante el uso de cemento Portland fuese en gran forma compatible con la humedad excesiva ocasionada por las lluvias, además de fortalecer la estructura del camino.

La elección recayó en un pavimento rígido elaborado mediante concreto hidráulico compactado con rodillo (CCR).

Con el uso del cemento Portland en mezcla con los materiales pétreos seleccionados para las capas de sub-base y base, el procedimiento constructivo en referencia tiene características experimentales, dada su escasa repercusión o empleo en el medio nacional. Además, de acuerdo con el proporcionamiento de cemento en la mezcla, está bien definido que se excluye de la clasificación de los suelos-cemento.

Casos más comunes de este procedimiento en la construcción de caminos se tienen en España y los Estados Unidos, en donde zonas con un alto nivel freático requieren de la estabilización de los suelos que presentan este problema, lo cual ha

propiciado la difusión de este sistema, desarrollándose una técnica que aplicada al camino de acceso del Proyecto Hidroeléctrico Aguamilpa, tuvo sus variantes, principalmente en lo que corresponde al proporcionamiento de cemento Portland, pues mientras el promedio de la experiencia extranjera se registra entre 240 260 kg/m³ de material pétreo, en este proyecto tras la ejecución de varios tramos de prueba, se redujo a 120 kg/m³.

En lo referente a los materiales pétreos (agregados) para ambas capas, fueron extraídos de playones de arroyo y río, los cuales se seleccionaron cuidadosamente mediante trituración parcial y cribado a través de la malla 38 mm (1 ½”), de manera que fuese satisfactoria la composición granulométrica fijada. Este proceso se llevó a cabo siguiendo las normas de calidad de laboratorio que rigen dentro de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (S.C.T.), para la calidad de los materiales destinados a la pavimentación de caminos.

Previo a la construcción de la capa de sub-base y base se procuró que la capa inferior (sub-rasante) estuviese libre de impurezas o defectos debidos a las lluvias, cuidando que las deformaciones perjudiciales no se reflejarán en la capa construida.

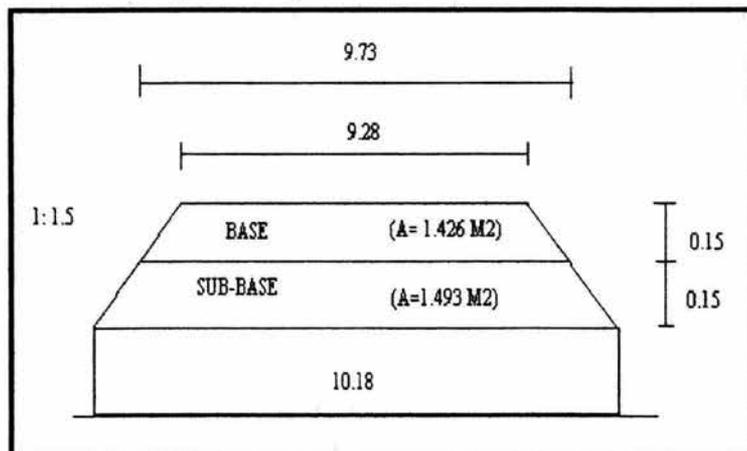
Con respecto al equipo, se fijaron los objetivos a fin de optimizar el tiempo de colocación y compactación, ya que, una vez incorporada la humedad a la mezcla de cemento y agregados, lo cual da inicio al fraguado, no es recomendable prolongar dichas actividades. Por tal motivo se dictaron las siguientes restricciones:

- A) No dar inicio al proyecto de construcción diario en caso de que alguna maquinaria o equipo presentara alguna falla.
- B) Ante la inminencia de fuerte lluvia, evitar dar comienzo a la incorporación del cemento con el material pétreo, a fin de no exponer los materiales a su pérdida.
- C) Tratar una longitud de avance de tramo diario con base en la plantilla de personal y maquinaria disponible, cuidando de no excederse en esta consideración pretendiendo un mayor avance.

Se recomendó que los trabajos de topografía fuesen lo más breve posible con el fin de reducir al máximo el tiempo total del procedimiento constructivo diario.

Posterior a la ejecución de cada tramo se indicó efectuar riegos de agua periódicos para el curado de la capa de concreto.

Se muestra en la figura 5.1, la sección de las capas de sub-base y base para cualquier punto en tangentes, resultando un poco diferentes todas aquellas que corresponden a curvas, puesto que los valores de éstas dependen de ciertos datos como son: grado de curvatura, ampliaciones y transiciones.



(fig. 5.1 Sección de pavimento. Base y sub-base.)

[22]

Posterior a la actividad de acarreo o tiro de material pétreo de 38 mm (1 ½") (calculado a partir del volumen compacto por estación de acuerdo a la selección de la capa y afectándolo por el coeficiente de abundamiento para obtener el volumen suelto o acarreado. No se considera para fines de control de tiempo por actividad en cada tramo). Se inicia el procedimiento constructivo con empleo de cemento, tal como se describen en los pasos siguientes:

Procedimiento de construcción por el sistema de mezcla en el lugar.

1.- Acamellonado de material.

La labor de acamellonamiento se realiza con base a la necesidad de uniformizar el cuerpo del camellón, así como lograr una buena homogenización del material.

* 22.- Construcción de sub-base y base rígidas con cemento Portland tipo I en camino de acceso al Proyecto Hidroeléctrico Aguamitpa. Comisión Federal de Electricidad, Tepic, Nayarit, 1991.

Salvo que el material presente humedad por causa de lluvia deberá evitarse la aplicación de agua antes o durante esta actividad, ya que, esto provocaría dificultad en el mezclado y la formación de grumos indeseables.



Fig 5.2 Barredora autopropulsada para limpieza previa a la pavimentación.

El equipo usado es la motoconformadora y el trabajo deberá hacerse en media ala del camino para no obstruir del todo la circulación de vehículos.

2.- Tendido del material con motoconformadora.



Fig 5.3 Motoconformadora utilizada en el acamellonado, bandeado y tendido del material.

El objeto de encamar el material (procedimiento a descopetar el camellón), es para incorporar el cemento en la cantidad que resulte de aplicar la dosificación de 120 kg de cemento por cada metro cúbico de material pétreo. El ancho del tendido no deberá exceder el de la cuchilla de la motoconformadora, o bien considerar únicamente el ancho que requiera el transporte de cemento utilizado.

3.- Incorporación y mezclado del cemento.

Básicamente esto se realiza directamente del transporte sobre el material previamente tendido, colocando los sacos de cemento en tres líneas uniformes en número y cuidando que corresponda a la cantidad especificada en proyecto para cada estación de 20 m.

Tras el tiro de los sacos de cemento, se hará la rotura de la envoltura de los sacos, así como la recolección y reciclado de los mismos, con el fin de no favorecer que el viento los arrastre y en algunos casos el material a tratar se contamine. Para esto, es necesario considerar las cuadrillas de descarga y rotura de sacos en trabajos independientes y simultáneos para reducir el tiempo de ejecución.

Inmediatamente después, la motoconformadora inicia el mezclado en seco de los materiales y el cemento.

4.- Mezclado de material pétreo y cemento.

Los primeros cortes durante el mezclado, se harán con cuidado para evitar el desplazamiento del cemento. Asimismo se deberán evitar los cortes en la capa anterior para no dar origen a contaminación.

Este trabajo es ejecutado con dos vueltas que se de al material en seco, mediante el empleo de motoconformadora y mezclado.

5.- Incorporación del agua utilizando pipa.



Fig. 5.4 Pipa para transporte y acarreo de agua.

La incorporación del agua se hará de tal manera que resulten uniformes los riegos, procediendo a levantar con la motoconformadora cada capa humedecida, acamellonando el material con este sistema con el fin de que se vaya arrojando sucesivamente y reduzca al mínimo la pérdida de humedad. Este proceso se llevará a cabo hasta que el material adquiera la humedad óptima.

6.- Homogeneización de los materiales con motoconformadora.

Esta actividad se requiere y tiene por finalidad, el proporcionar una homogeneización granulométrica y de contenido de humedad óptima, tratando se haga en el menor tiempo posible debido al comienzo del fraguado. Como etapa final de este trabajo, deberá colocar el material en el camino (acamellonarse) y después, mediante el tendido, repartirse equitativamente.

7.- Operación de Tendido y conformado.

Previo al tendido se procederá a verificar los niveles en cada estación de 20 m. Además resulta conveniente hacer el recorte a plomo en el empalme con el tramo construido anteriormente, desperdiciando el material producto del corte, con el fin de obtener una junta de construcción uniforme.

El tendido, a más de realizarlo en el tiempo mínimo para evitar la pérdida de humedad, deberá consistir también en un conformado propicio para la ejecución de la actividad siguiente.



Fig 5.5 Motoconformadora utilizada en el acamellonado, bandeado y tendido del material.

8.- Formación y previa compactación de la capa.

Una vez que se halla realizado el tendido, se procederá a la compactación de la capa mediante una cerrada (ida y vuelta del rodillo compactador en el tramo considerado), utilizando el rodillo vibratorio a media intensidad. Se deberá cuidar que este proceso de compactación no exceda de una cerrada, puesto que dificultaría la labor de afinado.

9.- Afinado.

Inmediatamente a la formación de la capa se verificarán los niveles topográficos, para luego iniciar la actividad de afinado, previo para el curado un riego ligero de agua. Durante la ejecución de este trabajo se evitará al máximo posible el sobrecarreo de material y su manejo excesivo. Optimizar el tiempo.

10.- Compactación de la capa.



Fig. 5.6 Vibrocompactador de rodillo liso utilizado en compactación de pavimentos (CCR).

La compactación de la capa se hará mediante un compactador vibratorio de rodillo liso a media intensidad hasta completar cuatro cerradas dadas en el sentido longitudinal, procediendo, por sistema, de las orillas al centro en el caso de tangentes y del centro a las orillas en curvas. Adicionalmente se dará una cerrada de compactación aplicando la vibración normal, para lo cual se efectuará un riego de agua , tratando que el compactador vaya tras de la pipa, por lo cual el equipo de riego deberá adaptar su velocidad a la del compactador (Recomendar no añadir mas agua).

Al terminar la compactación de cada franja, el equipo retrocederá por ella misma, sin vibrar, e iniciando la compactación de la otra franja mediante el mismo sistema.

La última cerrada tiene como objetivo formar una lechada de finos, agua y cemento, capaz de darle más consistencia a la superficie de rodamiento.

Dependiendo del estado que presente el tramo tratado, se podrán dar más riegos con agua (siempre cargados) y cerrada hasta que la superficie adquiera la textura requerida.

Control de calidad.

Fuera del control de calidad llevado a cabo durante el proceso del tratamiento de los materiales de 1 ½" (38 mm.) a finos, aquel no se aplicó en el desarrollo de los trabajos de construcción debido a que por las características de la capa no fue posible aplicar pruebas de compactación de campo, ni pruebas de cilindros a compresión simple, ya que, no se consideró propiamente como un concreto.

Por tal motivo, el único control de calidad ejercido fue el que se tuvo directamente en el tramo durante cada una de las actividades que conformaron el proceso constructivo.

Observaciones.

Durante la ejecución de la sub-base o base rigidizada con cemento, dependiendo de diversos factores, se trabajaron diariamente tramos de diversas longitudes, pero de acuerdo con lo observado, se concluye que para una jornada y una plantilla de equipo consistente en dos motoconformadoras, dos compactadores vibratorios (modelo CA-25 DINAPAC o equivalente) y dos pipas de agua de ocho mil litros de capacidad, se tuvo un rendimiento diario de trescientos metros de longitud en un promedio de nueve horas.

Cuando por efecto de las lluvias el material pétreo se encontraba húmedo, luego en la incorporación del cemento con el material acamellonado se procedía inmediatamente con la homogeneización de los materiales, disminuyéndose el tiempo necesario en la incorporación del agua, lo que redundó en un mayor rendimiento en cuanto a los tiempos de ejecución.

Cuando se trabajó fuera de temporada de lluvias, el material requirió de una mayor cantidad de agua para adquirir su grado óptimo de humedad, por lo que se requirió de una tercer pipa para incorporar el agua.

Una vez incorporado el cemento, el proceso es irreversible, por lo cual es necesario hacer una revisión del equipo de construcción antes de iniciar el proceso del día para evitar al máximo los riesgos de falla que perjudicarán la integridad del trabajo.

Cuando la capa subyacente se encuentre en condición saturada, es necesario tratar el material dañado, luego de lo cual se estuvo en condiciones de empezar el proceso. Este debe posponerse ante la inminencia de lluvia.

Las diferencias entre un procedimiento constructivo de mezcla en planta y el del elaborado en el lugar son notorias como se describió en el inciso 3.4. En primer lugar, la mezcla de CCR elaborada en plantas es difícil de proceder luego a su colocación, tendido y compactación con maquinaria; aquí la fabricación del concreto es en el lugar de la obra y empleando motoconformadoras y compactadores vibratorios.

En segundo lugar, se especifica un espesor de capa de unos 20 cm para iniciar la compactación del material; aquí ese dato no se considera y pareciera que se deja a criterio del personal responsable.

Ambos procedimientos coinciden en cuanto a la secuencia de la compactación, más aquí este no especifica las características de las juntas de construcción, salvo que el recorte debe ser a plomo en el tramo anterior y el nuevo debe estar empalmado con aquel.

En tercer lugar, el procedimiento de mezcla en planta de CCR, indica cuantos días debe durar el riego del pavimento para lograr un mejor curado de la mezcla (7 días), el segundo no lo hace y nuevamente pareciera que lo deja a criterio del personal responsable.

En cuanto a la textura, el primero tiende a considerar para algunos casos una capa de concreto asfáltico para facilitar el rodamiento de los vehículos, en tanto que el segundo permite el tránsito directamente sobre la capa de CCR, cuya textura dependerá de las características de la lechada que cubra su superficie.

Estas diferencias parecieran no tener una gran importancia, ya que, al final de cuentas, el camino presta en la actualidad un excelente servicio. Conforme a lo anterior basta para indicar que cualquier procedimiento, independiente de su origen, debe revisarse para asegurar que su aplicación corresponda a las necesidades y posibilidades reales de la zona u obra donde se pretenda emplear, adaptándolo en su caso.

Es importante destacar la ventaja que en este caso se obtuvo sobre el pavimento de concreto asfáltico y la cual consiste en la mejor resistencia del material frente a las inclemencias del tiempo: La velocidad de fraguado fue suficiente para evitar la pérdida del material por lluvia.

5.2 Análisis de factibilidad económica.

5.2.1 Generalidades.

Se expondrán los criterios bajo los cuales se llega a la conclusión de que el CCR es una técnica económicamente viable y competitiva frente al concreto asfáltico, el cual es utilizado preponderantemente en México para la construcción de carreteras, y en general, para toda vía de comunicación terrestre.

Para ello, se realizará un análisis de factibilidad económica, con base en datos proporcionados por la S.C.T., los precios unitarios corresponden a 2003, y forman parte de una investigación que recientemente realizó la S.C.T. En las tablas se presenta el cálculo de los costos por construcción y mantenimiento.

5.2.2 Análisis comparativo de costos de pavimento CCR y pavimento de concreto asfáltico de la SCT.

En las tablas siguientes se muestran las alternativas de costo entre pavimentos flexibles y rígidos, siendo éstos últimos de CCR.

La conclusión es muy interesante, ya que, se puede observar un ahorro de hasta el 35% en favor de la aplicación de CCR.

Todos los pavimentos propuestos consisten básicamente de carpeta asfáltica, base y sub-base hidráulica. La diferencia entre los tres tipos mostrados se da especialmente en la clase de tratamiento que recibe la base. Así, en primer lugar se tiene un pavimento flexible típico compuesto de una base asfáltica, una sub-base hidráulica y una carpeta de concreto asfáltico. En segundo término, se tiene una estructura similar pero donde la base ha sido estabilizada con cemento Portland. En tercer lugar aparece un pavimento cuya base y sub-base es enteramente de CCR.

Además, se puede observar que la capa de concreto asfáltico se reduce significativamente, pasando de 10 cm en el pavimento típico a 5 cm en el de CCR, lo cual, necesariamente influye en los costos.

5.2.2.1 Metodología.

Los costos por construcción se calcularon como se indican en la tabla 5.7. Los gastos por mantenimiento se obtuvieron siguiendo los criterios de Costo Capitalizado y

Costo Anual Uniforme Equivalente, cuyos conceptos (como se describió en el capítulo anterior). Para determinar el valor del Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE), se usó la expresión siguiente:

$$(A/F, i, n) = \frac{F \times i}{[(1+i)^n - 1]}$$

donde:

F = es el valor futuro de una cierta cantidad.

A = es el valor anualizado de **F** en un periodo determinado.

I = es la tasa de interés bancario o de inflación, anualizada

n = es el número de años para el cual se desea la anualización de **F**.

El Costo Capitalizado se obtiene como la sumatoria de los costos de construcción, a valor presente, más los costos por mantenimiento, expresados en la relación que resulta de dividir el CAUE entre la tasa de interés anual, como se explica más adelante. Así:

[15]
$$CC = VP + Ai$$

La tasa de interés bancario para el periodo posterior al año 2003 se tomó igual a 6.5% anual previniendo los posibles efectos inflacionarios y emergencias financieras que puedan surgir.

Los costos por mantenimiento se toman en cuenta considerando que éstos son equivalentes a tres reencarpetamientos de concreto asfáltico, en un periodo de 30 años, para pavimentos flexibles típicos; y de un reencarpetamiento, en el mismo periodo, para pavimentos de CCR.

Para el caso del pavimento flexible con base estabilizada con cemento se aplica el primer criterio.

* 15.- Tarquín, Anthony. Ingeniería Económica. Ed. Mc Graw-Hill, México, 1989. 2a Edic. Págs. 121- 130.

5.2.2.2 Ejemplo de cálculo comparativo de costos de financiamiento de pavimento flexible y pavimento rígido (CCR). [15]

En la tabla 5.7 se tiene un precio de \$ 4'943,646.13/km. para un pavimento flexible típico, a precios de enero del 2003. La tasa de interés bancario para los años posteriores a 2003 es el 6.5% anual. El costo por encarpentamiento (que en este caso representa los costos totales por mantenimiento), es de \$ 988,301.39/km. Esta última erogación deberá hacerse cada 10 años, promedio, en un periodo de treinta años. Esto da como resultado:

1.- **Costo de la construcción = \$ 4'943,646.13**

Según fórmula del inciso 5.2.2.1:

2.- **$A_{10} = 988,301.39 \times 0.065 / (1+0.065)^{10} - 1 = \$ 73,237.77$**

La cantidad anterior es el costo anualizado del encarpentamiento para un periodo de diez años. Esto es, el desembolso que deberá realizarse dentro de diez años para reencarpentar todo el pavimento; es anualizado para el periodo con el fin de conocer cuales serían los gastos anuales por mantenimiento por kilómetro de pavimento.

El Costo de mantenimiento:

3.- **$= \$ 73,237.77 / 0.065 = \$ 1'126,734.90$**

Este valor representa la cantidad que sería necesario conservar en el banco para que, a una tasa del 6.5% anual, cubra los costos por mantenimiento que deberán realizarse.

Como es una cantidad fija en el banco, resulta imposible para otros propósitos, por el cual se considera como una erogación, sumándola al costo de construcción.

4.- **$C_f = \$ 4'943,646.13 + \$ 1'126,734.90 = \$ 6'070,381.03$**

Esta cantidad es el costo final del pavimento, donde se integran los gastos por construcción y por mantenimiento, para un periodo calculado de 30 años.

* 15.- Tarquin, Anthony. Ingeniería Económica. Ed. Mc Graw-Hill, México, 1989. 2a Edic. Págs. 121- 130.

Siguiendo un procedimiento similar, se actualizan los costos para los otros pavimentos, con la salvedad de que en el caso de CCR, el periodo considerado para anualizar los costos de mantenimiento no es de diez años sino de treinta, puesto que se realiza una sola vez cada treinta años.

5.- Según tabla 5.7:

Pavimento de CCR a costo de Enero del 2003.

Costo de mantenimiento para una sola vez en el periodo de 30 años, considerando una tasa de interés de 6.5 % anual:

Costo de construcción = \$ 3'434169.10/km.

Costo de mantenimiento: \$ 3'034,008.60/km.

$A_{30} = 3'034,008.60 \times 0.065 / (1+0.065)^{30} - 1 = \$ 35,126.06 / \text{km}$

luego:

$= \$ 35,126.06 / 0.065 = \$ 540,400.91$

Entonces, el costo total erogado será:

$Cf = \$3'434,169.10 + \$ 540,400.91 = \$ 3'974,570.01$

5.2.2.3 Análisis de resultados.

De la información contenida en la tabla se desprende lo siguiente:

- 1) El espesor de la carpeta de concreto asfáltico disminuye conforme la base del pavimento se vuelve más rígida.
- 2) La carpeta de concreto asfáltico es el concepto más caro de los enlistados, debido a su procedimiento constructivo y continuo mantenimiento.
- 3) Debe tomarse en cuenta que los gastos de mantenimiento también se encuentran directamente relacionados con la carpeta, ya que es el elemento que más rápidamente se desgasta al estar sometido a un tránsito vehicular continuo ocasionando deterioro general de las otras capas del pavimento, las cuales, al quedar descubiertas, sufren daños cada vez más severos, hasta provocar la reconstrucción total del camino. Con respecto de la base de CCR, resiste mucho mejor la acción del tránsito vehicular, sirviendo la carpeta de asfalto únicamente para mejorar su textura al rodamiento. Un desgaste de ésta no genera más consecuencias que la

necesidad de un adecuado reencarpetamiento, evitando con esto alternativas de soluciones costosas para recuperar y reforzar las capas internas del pavimento.

- 4) El costo de la base y sub-base para el caso del CCR, resulta mucho más caro que la base estabilizada con cemento portland al 5%, pero sigue siendo muy económica por su bajo costo en mantenimiento.
- 5) El costo total del pavimento de CCR, tiende a reducirse conforme la mezcla es más resistente.

5.2.3 Cálculo de los análisis de precios unitarios en los conceptos de carpeta de concreto asfáltico y CCR (para determinar un cuadro comparativo de costos por km y mantenimiento anual).

Insumos de materiales, mano de obra y equipo (actualizados hasta el mes de enero del 2003).

1.- Insumos de materiales:

Materiales	Unidad	Costo (\$)
• Emulsión asfáltica RR-2K (para liga).	lt	2.30
• Señalamiento de protección de obra.	Lote	25,000.00
• Material de base de 1 1/2" (Lab)	m ³	80.00
• Acarreo de los materiales pétreos	m ³ - km	4.70
• Agua para compactación y acarreo a 5 km.	m ³	24.50
• Material pétreo de 1 1/2" p. en obra	m ³	80.00
• Material pétreo 3A puesto en obra	m ³	100.00
• Cemento asfáltico AC- 20	kg	1.80
• Flete de asfalto	kg	0.30
• Llantas para motoconformadora	jgo	22,188.00
• Llantas para cargador CAT	jgo	23,480.00
• Llantas para camión de volteo	jgo	11,180.00
• Llantas para compactador de rodillo	jgo	5,880.00
• Gasolina	lt	6.80
• Diesel	lt	3.60
• Aceite o lubricante	lt	22.00
• Básico de concreto asfáltico	m ³	504.49
• Polvo sub-producto de trituración para concreto hidráulico.	m ³	22.50
• Aditivo Master Filders para concreto	lt	37.00
• Material Pétreo de 5/8 de pulg (16 mm)	m ³	80.00
• Material Pétreo de 3/4 de pulg (19 mm)	m ³	80.00

2.- Insumos de mano de obra

Mano de obra	Unidad	Costo (\$)
• Peón	t	120.00
• Rastrillero	t	120.00
• Banderero	t	120.00
• Cabo	t	250.00
• Ayudante general	t	120.00
• Operador de motoconformadora	t	280.00
• Operador de rodillo vibratorio	t	260.00
• Operador de compactador neumático	t	260.00
• Operador de camión de volteo	t	225.00
• Operador de petrolizadora	t	225.00
• Operador de cargador frontal	t	260.00
• Operador de compactador vibroplus dinapack ca-25	t	260.00
• Operador para pipa de agua	t	225.00
• Operador para cortadora de concreto	t	110.00
• Operador para planta dosificadora y Mezcladora de concreto Mod. ASR-250-A	t	450.00
• Operador de pavimentadora de concreto abg mod. titan-511	t	280.00
• Operador de barredora	t	225.00

3.- Insumos de maquinaria y equipo

Maquinaria y equipo	Unidad	Costo Hora	
		Activo	Inactivo
• Motoconformadora-cat-120g	Hr	548.61	152.97
• Compactador de rodillo Vibratorio- ca-25	Hr	414.10	113.43
• Compactador neumático	Hr	252.41	56.94
• Barredora mecánica cumins-483	Hr	150.39	31.81
• Camión de volteo f- 700 ford	Hr	221.96	47.21
• Camión de volteo de 20 Tons.	Hr	325.50	97.65
• Petrolizadora	Hr	212.63	53.16
• Cargador cat 966-d	Hr	328.48	82.23
• Pipa de agua – dina	Hr	212.63	38.25
• Planta de concreto asf. asr-250-a	Hr	2223.56	808.37
• Pavimentadora de concreto abg mod. titan-511	Hr	1405.77	510.88
• Cortadora de concreto	Hr	73.29	22.91
• Planta de trituración	Hr	2120.25	742.10

Cálculo de los Análisis de los Precios Unitarios actualizados hasta enero del 2003.

Concepto:

Carpeta de concreto asfáltico de 10 cm de espesor compactada al 95%, mezcla en caliente.

I.- Materiales	Unidad	Cant	P.U. (\$)	Importe
• Básico de concreto asf.	M ³	1.300	504.49	\$ 655.84
• Emulsión asfáltica rr-2k (para liga).	LT	10.00	2.30	\$ 23.00
• Señalamiento de protección de obra.	LOTE	0.00034	25,000.00	<u>\$ 8.50</u>
			Suma materiales =	\$ 687.34

II.- Mano de obra

• 1 Peón	t	0.1428	120.00	\$ 17.14
• 1 Rastrillero	t	0.1428	120.00	\$ 17.14
• 1 Banderero	t	0.1428	120.00	\$ 17.14
• 1 Cabo	t	0.0428	250.00	<u>\$ 10.70</u>
			Suma mano de obra =	\$ 62.12

III.- Maquinaria y equipo

• Motoconformadora	hr	0.0111	548.61	\$ 6.09
• Compactador de rodillo	hr	0.0111	414.10	\$ 4.60
• Compactador neumático	hr	0.0111	160.20	\$ 1.78
• Barredora mecánica	hr	0.0111	150.39	\$ 1.67
• Camión de volteo	hr	0.0111	221.96	\$ 2.46
• Petrolizadora	hr	0.0111	212.63	<u>\$ 2.36</u>

Suma de maquinaria y equipo = \$ 18.96

Costo Directo = \$ 768.42

20% Indirecto= \$ 153.68

Suma = \$ 922.10

10 % Utilidad = \$ 92.21

Suma = \$ 1014.31

2 % Finan. = \$ 20.29

Suma = \$ 1034.60

0.50 % Secodam = \$ 5.17

Precio Unitario = \$ 1039.77

Concepto:

Sub-base o base compactada al 95% con material pétreo de banco con diámetro de 1 1/2" (38 mm).

Unidad: m³

I.- Materiales

	Unidad	Cant	P.U. (\$)	Importe
• Material de base de 1 1/2" (lab)	m ³	1.30	80.00	\$ 104.00
• Acarreo de los materiales pétreos	m ³	23.72	4.70	\$ 111.48
• Agua para compactación y acarreo a 5 km.	m ³	0.25	24.50	\$ <u>6.13</u>
			Suma materiales =	\$ 221.61

II.- Maquinaria y Equipo

• Operación de acamellonado. motoconformadora.	hr	0.0111	548.61	\$ 6.09
• Operación de mezclado y tendido. motoconformadora.	hr	0.0111	548.61	\$ 6.09
• Compactación. compactador vibratorio.	hr	0.0111	414.10	\$ 4.60
• Carga de los y materiales. cargador cat.	hr	0.0144	328.48	\$ <u>4.73</u>

Suma de maquinaria y equipo = \$ 21.51

Costo directo = \$ 243.12

20% Indirecto= \$ 48.62

Suma = \$ 291.74

10 % Utilidad = \$ 29.17

Suma = \$ 320.92

2 % Finan. = \$ 6.42

Suma = \$ 327.34

0.50 % Secodam = \$ 1.64

Precio Unitario = \$ 328.98

Concepto:

Básico de concreto asfáltico con grava de 1 ½" a finos (38 mm), mezcla en caliente.

I.- Materiales	Unidad	Cant	P.U. (\$)	Unidad: m³ Importe
• Material pétreo de 1 ½" p. en obra	m ³	1.00	165.75	\$ 165.75
• Cemento asfáltico AC- 20	kg	130.00	1.80	\$ 234.00
• Flete de asfalto	kg	130.00	0.30	\$ 39.00
		Suma materiales =		\$ 438.75

II.- Maquinaria y equipo

• Planta de asfalto	hr	0.0260	2200.00	\$ 57.20
• Cargador frontal (carga)	hr	0.0260	328.48	\$ 8.54
		Suma de maquinaria y equipo =		\$ 65.74
		Costo Directo =		\$ 504.49

Concepto:**Concreto hidráulico rodillado de 30 cm de espesor (CCR) (sin considerar arena)
de $f_c = 300 \text{ kg/cm}^2$** Unidad: m^3

I. Materiales	Unidad	Cant.	P.U.(\$)	Importe (\$)
• Carga y des. de cemento	ton	0.60	22.40	13.44
• Vaciado de cemento	ton	0.60	22.40	13.44
• Agua y acarreo a 5 km	m^3	0.20	24.50	4.90
• Cemento portland	ton	0.30	2000.00	600.00
• Material de base de 38 mm. o 1 ½" (lab)	m^3	1.30	80.00	<u>104.00</u>
			Suma:	\$ 735.78
II.- Equipo				
• Carga de material. traxcavo	hr	0.0111	328.48	3.65
• Compactacion del material. vibrocompactador ca-25	hr	0.0111	414.10	4.60
• Tendido, mezclado y bandeado del material. motoconformadora cat- 120 b	hr	0.0111	548.61	6.09
• Barrido. barredora	hr	0.0111	150.39	<u>1.67</u>
			Suma:	\$ 16.01
III.- Acarreo de materiales pétreos a 36.5 kms.				
	km	23.72	4.70	<u>111.48</u>
			Suma:	\$ 111.48
Total Costo Directo= \$ 863.27				
Indirectos 20%= <u>172.65</u>				
Suma= \$ 1035.92				
Utilidad 10%= <u>103.59</u>				
Suma= \$ 1139.51				
Financ. 2%= <u>22.79</u>				
Suma = \$ 1162.30				
Secodam 0.5%= <u>5.81</u>				
Precio Unitario = \$ 1168.11				

Concepto:**Concreto hidráulico rodillado de 30 cm de espesor (CCR) de $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$**

	Unidad	Cant.	P.U. (\$)	Unidad: m^3 Importe (\$)
I. Materiales				
• Carga y des. de cemento	ton	0.60	22.40	13.44
• Vaciado de cemento	ton	0.60	22.40	13.44
• Agua y acarreo a 5 km	m^3	0.20	24.50	4.90
• Cemento portland	ton	0.30	2000.00	600.00
• Material de base de 38 mm. o 1 1/2" (lab)	m^3	1.30	80.00	104.00
• Arena de banco	m^3	1.30	45.00	58.50
			Suma:	\$ 794.28
II.- Equipo				
• Carga de material.traxcavo	hr	0.0111	328.48	3.65
• Compactacion del material.				
• Vibrocompactador ca-25	hr	0.0111	414.10	4.60
• Tendido, mezclado y bandeado del material.				
• motoconformadora cat- 120 b	hr	0.0111	548.61	6.09
• Barrido. barredora	hr	0.0111	150.39	1.67
			Suma:	\$ 16.01
III.- Acarreo de materiales pétreos a 36.5 kms.				
	km	23.72	4.70	111.48
			Suma:	\$ 111.48
Total Costo Directo= \$ 921.76				
Indirectos 20% = 184.35				
Suma = \$ 1106.11				
Utilidad 10% = 110.61				
Suma = \$ 1216.73				
Financ. 2% = 24.33				
Suma = \$ 1241.06				
Secodam 0.5% = 6.21				
Precio Unitario= \$ 1247.27				

Cálculo de Costo Horario.

MAQUINA: COMPACTADOR VIBRATORIO MODELO: CA 25 SERIE		OBRA: FECHA: VIGENCIA ENERO – 2003. REFERENCIA:		
PRECIO DE ADQUI (VA) \$ 1'350,000.00 EQUIPO ADICIONAL VALOR LLANTAS (VII) \$ 5880.00 VALOR INICIAL \$ 1'344,120.00 VALOR RESCATE (VR) 10% VALOR A DEPRECIAR \$ 134,412.00 T. INTERES ANUAL (I) 12% PRIMA SEGUROS (S) 2.5% GASOLINA DIESEL \$ 3.60 ACEITE M. DIESEL \$ 22.00 ACEITE M. GASOLINA	VIDA ECONOMICA (VE). 10000 Hrs. HORAS AÑO (HO) 2000 Hrs. FAC. OPERACION. (FO) 0.85 VIDA ECO. LLANTAS (Hv) 2000 Hrs. MOTOR (P) DIESEL 140 HP FAC. MANTENI. (Q) 0.90 ACEITE HIDRAULICO LTS LLANTAS \$5,880.00 JGO			
CARGOS FIJOS DEPREC. $D=(Va-Vr)/Ve = (1'344,120.00-134,412)/10,000 =$ INVERSION $F=(Va+Vr) / 2HO = ((1'344,120.00+134,412)*0.12)/(2*2000) =$ SEGUROS $S=(Va+Vr)S/2HO = ((1'344,120.00+134,412)*0.025)/(2*2000) =$ MANTENIM. $T=Q\%*D = 0.90*120.97=$		ACTIVO	%	INACTIVO
		120.97	20%	24.19
		44.36	100%	44.36
		9.24	100%	9.24
		108.87	20%	21.77
SUMA CARGOS FIJOS POR HORA		\$283.44		\$99.57
COMBUSTIBLES- CONSUMO FAC.COMBUSTIBLES GASOLINA $G=P*0.202*\$Lt.$ DIESEL $D=P*0.158*\$L = 140 \times 0.158 \times 3.6 =$		79.63	15%	11.94
LUBRICANTES ACEITE M. DIESEL $Ad=P*0.0032*\$Ll. = 140 \times 0.0032 \times 22.00 =$ LLANTAS $Ll=VII / Hv = \$ 5,880/2,000 =$		9.86	15%	1.48
		2.94	15%	0.44
SUMA CONSUMOS POR HORA		\$92.43		\$13.86
OPERACION. SALARIO \$260.00 OPERADOR 1 No. s/H \$0.00 AYUDANTE 0 Hrs. = 8 x 0.85 = 6.80				
SUMA OPERACION. \$260.00 / 6.80		\$38.24	0%	\$0.00
COSTO DIRECTO POR HORA- MAQUINARIA		\$414.10		\$113.43

Cálculo de Costo Horario.

MAQUINA: CARGADOR CAT SOBRE LLANTAS PAYLODER		OBRA:		
MODELO: CAT 966-D		FECHA: VIGENCIA ENERO - 2003.		
SERIE		REFERENCIA:		
PRECIO DE ADQUI (VA) \$	935,000.00	VIDA ECONOMICA (VE)	10000 Hrs.	
EQUIPO ADICIONAL		HORAS AÑO (HO)	2000 Hrs.	
VALOR LLANTAS (VII) \$	23,480.00	FAC. OPERACION. (FO)	0.85	
VALOR INICIAL \$	911,520.00	VIDA ECO. LLANTAS (Hv)	2000 Hrs.	
VALOR RESCATE (VR)	10%	MOTOR (P) DIESEL	135 HP	
VALOR A DEPRECIAR \$	91,152.00	FAC. MANTENI. (Q)	0.90	
T. INTERES ANUAL (I)	12%	ACEITE HIDRAULICO	LTS	
PRIMA SEGUROS (S)	2.5%	LLANTAS	\$23,480.00 JGO	
GASOLINA				
DIESEL \$	3.60			
ACEITE M. DIESEL \$	22.00			
ACEITE M. GASOLINA				
CARGOS FIJOS		ACTIVO	%	INACTIVO
DEPREC. $D=(Va-Vr)/Ve =$	$(911,520.00-91,152.00)/10,000 =$	82.04	20%	16.41
INVERSION $F=(Va+Vr) / 2HO =$	$((911,520.00+91,152.00)X0.12)/(2X2000) =$	30.08	100%	30.08
SEGUROS $S=(Va+Vr)S/2HO =$	$((911,520.00+91,152.00)X0.025)/(2X2000) =$	6.27	100%	6.27
MANTENIM. $T=Q\%*D =$	$0.90*82.04 =$	73.83	20%	14.77
SUMA CARGOS FIJOS POR HORA		\$192.22		\$67.52
COMBUSTIBLES- CONSUMO				
FAC.COMBUSTIBLES				
GASOLINA $G=P*0.202*\$Lt.$				
DIESEL $D=P*0.158*\$/l =$	$135 \times 0.158 \times 3.60 =$	76.79	15%	11.52
LUBRICANTES				
ACEITE M. DIESEL $Ad= P*0.0032*\$/Lt. =$	$135 \times 0.0032 \times 22.00 =$	9.50	15%	1.43
LLANTAS $Li=VII / Hv =$	$\$ 23,480/2,000 =$	11.74	15%	1.76
SUMA CONSUMOS POR HORA		\$98.03		\$14.70
OPERACION.				
SALARIO \$260.00	OPERADOR 1			
No. s/H \$0.00	AYUDANTE 0			
	Hrs. = 8 x 0.85 = 6.80			
SUMA OPERACION.	\$260.00 / 6.80	\$38.24	0%	\$0.00
COSTO DIRECTO POR HORA- MAQUINARIA		\$328.48		\$82.23

Cálculo de Costo Horario

MAQUINA: MOTOCONFORMADORA MODELO: 120 G SERIE	OBRA: FECHA: VIGENCIA ENERO - 2003. REFERENCIA:		
PRECIO DE ADQUI (VA) \$ 1'890,000.00 EQUIPO ADICIONAL VALOR LLANTAS (VII) \$ 22,188.00 VALOR INICIAL \$ 1'867,812.00 VALOR RESCATE (VR) 10% VALOR A DEPRECIAR \$ 186,781.20 T. INTERES ANUAL (I) 12% PRIMA SEGUROS (S) 2.5% GASOLINA DIESEL \$ 3.60 ACEITE M. DIESEL \$ 22.00 ACEITE M. GASOLINA	VIDA ECONOMICA (VE) 10000 Hrs. HORAS AÑO (HO) 2000 Hrs. FAC. OPERACION. (FO) 0.85 VIDA ECO. LLANTAS (Hv) 2000 Hrs. MOTOR (P) DIESEL 135 HP FAC. MANTENI. (Q) 0.90 ACEITE HIDRAULICO LTS LLANTAS \$22,188.00 JGO		
CARGOS FIJOS	ACTIVO	%	INACTIVO
DEPREC. $D=(Va-Vr)/Ve = (1'867,812.00-186,781.20)/10,000 =$	168.10	20%	33.62
INVERSION $F=(Va+Vr) / 2HO = ((1'867,812.00+186,781.20) \times 0.12) / (2 \times 2000) =$	61.64	100%	61.64
SEGUROS $S=(Va+Vr)S/2HO = ((1'867,812.00+186,781.20) \times 0.025) / (2 \times 2000) =$	12.84	100%	12.84
MANTENIM. $T=Q\% \cdot D = 0.90 \cdot 168.10 =$	151.29	20%	30.26
SUMA CARGOS FIJOS POR HORA	\$393.87		\$138.36
COMBUSTIBLES- CONSUMO	FAC.COMBUSTIBLES		
GASOLINA $G=P \cdot 0.202 \cdot \$Lt.$			
DIESEL $D=P \cdot 0.158 \cdot \$/ = 135 \times 0.158 \times 3.60 =$	76.79	15%	11.52
LUBRICANTES			
ACEITE M. DIESEL $Ad = P \cdot 0.0032 \cdot \$/Lt. = 135 \times 0.0032 \times 22.00 =$	9.50	15%	1.43
LLANTAS $LI = VII / Hv = \$ 22,188 / 2,000 =$	11.09	15%	1.66
SUMA CONSUMOS POR HORA	\$97.39		\$14.61
OPERACION.			
SALARIO \$280.00 OPERADOR 1			
No. s/H \$110.00 AYUDANTE 1			
\$390.00 Hrs. = 8 x 0.85 = 6.80			
SUMA OPERACION.	\$390.00	/	6.80
	\$57.35	0%	\$0.00
COSTO DIRECTO POR HORA- MAQUINARIA	\$548.61		\$152.97

Cálculo de Costo Horario

MAQUINA: CAMION DE VOLTEO MODELO: FORD F700- 7 M3 SERIE		OBRA: FECHA: VIGENCIA ENERO 2003. REFERENCIA:		
PRECIO DE ADQUI (VA) \$ 455,950.00 EQUIPO ADICIONAL VALOR LLANTAS (VII) \$ 11,180.00 VALOR INICIAL \$ 444,770.00 VALOR RESCATE (VR) 10% VALOR A DEPRECIAR \$ 44,477.00 T. INTERES ANUAL (I) 12% PRIMA SEGUROS (S) 2.5% GASOLINA DIESEL \$ 3.60 ACEITE M. DIESEL \$ 22.00 ACEITE M. GASOLINA	VIDA ECONOMICA (VE). 10000 Hrs. HORAS AÑO (HO) 2000 Hrs. FAC. OPERACION. (FO) 0.85 VIDA ECO. LLANTAS (Hv) 2000 Hrs. MOTOR (P) DIESEL 140 HP FAC. MANTENI. (Q) 0.90 ACEITE HIDRAULICO LTS LLANTAS \$11,180.00 JGO			
CARGOS FIJOS		ACTIVO	%	INACTIVO
DEPREC. $D=(Va-Vr)/Ve = (444,770.00-44,477.00)/10,000 =$		40.03	20%	8.01
INVERSION $F=(Va+Vr) I/2HO = ((444,770.00+44,477.00) \times 0.12) / (2 \times 2000) =$		14.68	100%	14.68
SEGUROS $S=(Va+Vr)S/2HO = ((444,770.00+44,477.00) \times 0.025) / (2 \times 2000) =$		3.06	100%	3.06
MANTENIM. $T=Q\% \times D = 0.90 \times 40.03 =$		36.03	20%	7.21
SUMA CARGOS FIJOS POR HORA		\$93.79		\$32.95
COMBUSTIBLES- CONSUMO FAC.COMBUSTIBLES GASOLINA $G=P \times 0.202 \times \$Lt.$ DIESEL $D=P \times 0.158 \times \$/Lt = 140 \times 0.158 \times 3.60 =$		79.63	15%	11.94
LUBRICANTES ACEITE M. DIESEL $Ad = P \times 0.0032 \times \$/Lt. = 140 \times 0.0032 \times 22.00 =$ LLANTAS $LI = VII / Hv = \$ 11,180 / 2,000 =$		9.86	15%	1.48
		5.59	15%	0.84
SUMA CONSUMOS POR HORA		\$95.08		\$14.26
OPERACION. SALARIO \$225.00 OPERADOR 1 No. s/H \$0.00 AYUDANTE 0 \$225.00 Hrs. = 8 x 0.85 = 6.80				
SUMA OPERACION.		\$225.00	0%	\$0.00
COSTO DIRECTO POR HORA- MAQUINARIA		\$221.96		\$47.21

Cálculo de Costo Horario

MAQUINA: PIPA DE AGUA MODELO: CAMION DINA SERIE	OBRA: FECHA: VIGENCIA ENERO – 2003. REFERENCIA:
PRECIO DE ADQUI (VA) \$ 355,000.00 EQUIPO ADICIONAL VALOR LLANTAS (VII) \$ 11,180.00 VALOR INICIAL \$ 323,820.00 VALOR RESCATE (VR) 10% VALOR A DEPRECIAR \$ 32,382.00 T. INTERES ANUAL (I) 12% PRIMA SEGUROS (S) 2.5% GASOLINA DIESEL \$ 3.60 ACEITE M. DIESEL \$ 22.00 ACEITE M. GASOLINA	VIDA ECONOMICA (VE). 10000 Hrs. HORAS AÑO (HO) 2000 Hrs. FAC. OPERACION. (FO) 0.85 VIDA ECO. LLANTAS (Hv) 2000 Hrs. MOTOR (P) DIESEL 140 HP FAC. MANTENI. (Q) 0.90 ACEITE HIDRAULICO LTS LLANTAS \$11,180.00 JGO
CARGOS FIJOS	ACTIVO % INACTIVO
DEPREC. $D=(Va-Vr)/Ve = (323,820.00-32,382.00)/10,000 =$	29.14 20% 5.83
INVERSION $F=(Va+Vr) I/2HO = ((323,820.00+32,382.00) \times 0.12) / (2 \times 2000) =$	10.69 100% 10.69
SEGUROS $S=(Va+Vr) S/2HO = ((323,820.00+32,382.00) \times 0.025) / (2 \times 2000) =$	2.23 100% 2.23
MANTENIM. $T=Q\% \times D = 0.90 \times 29.14 =$	26.23 20% 5.25
SUMA CARGOS FIJOS POR HORA	\$68.29 \$23.99
COMBUSTIBLES- CONSUMO FAC.COMBUSTIBLES	
GASOLINA $G=P \times 0.202 \times \$Lt.$	
DIESEL $D=P \times 0.158 \times \$/Lt = 140 \times 0.158 \times 3.60 =$	79.63 15% 11.94
LUBRICANTES	
ACEITE M. DIESEL $Ad= P \times 0.0032 \times \$/Lt = 140 \times 0.0032 \times 22.00 =$	9.86 15% 1.48
LLANTAS $Li=VII / Hv = \$ 11,180/2,000 =$	5.59 15% 0.84
SUMA CONSUMOS POR HORA	\$95.08 \$14.26
OPERACION.	
SALARIO \$225.00 OPERADOR 1	
No. s/H \$110.00 AYUDANTE 1	
\$335.00 Hrs. = 8 x 0.85 = 6.80	
SUMA OPERACION. \$335.00 / 6.80	\$49.26 0% \$0.00
COSTO DIRECTO POR HORA- MAQUINARIA	\$212.63 \$38.25

Cálculo de Costo Horario

MAQUINA: BARREDORA SWEEP MODELO: CUMINS - 4B3 AUTOPROPULSADA SERIE	OBRA: FECHA: VIGENCIA ENERO - 2003. REFERENCIA:
PRECIO DE ADQUI (VA) \$ 335,000.00 EQUIPO ADICIONAL VALOR LLANTAS (VII) VALOR INICIAL \$ 335,000.00 VALOR RESCATE (VR) 10% VALOR A DEPRECIAR \$ 33,500.00 T. INTERES ANUAL (I) 12% PRIMA SEGUROS (S) 2.5% GASOLINA DIESEL \$ 3.60 ACEITE M. DIESEL \$ 22.00 ACEITE M. GASOLINA	VIDA ECONOMICA (VE) 10000 Hrs. HORAS AÑO (HO) 2000 Hrs. FAC. OPERACION. (FO) 0.85 VIDA ECO. LLANTAS (HV) Hrs. MOTOR (P) DIESEL 73 HP FAC. MANTENI. (Q) 0.90 ACEITE HIDRAULICO LTS LLANTAS JGO
CARGOS FIJOS	ACTIVO % INACTIVO
DEPREC. $D=(Va-Vr)/Ve = (335,000.00-33,500.00)/10,000 =$	30.15 20% 6.03
INVERSION $F=(Va+Vr) / 2HO = ((335,000.00+33,500.00) \times 0.12) / (2 \times 2000) =$	11.06 100% 11.06
SEGUROS $S=(Va+Vr)S/2HO = ((335,000.00+33,500.00) \times 0.025) / (2 \times 2000) =$	2.30 100% 2.3
MANTENIM. $T=Q \times D = 0.90 \times 30.15 =$	27.14 20% 5.43
SUMA CARGOS FIJOS POR HORA	\$70.64 \$24.82
COMBUSTIBLES- CONSUMO FAC.COMBUSTIBLES	
GASOLINA $G=P \times 0.202 \times \$Lt.$	
DIESEL $D=P \times 0.158 \times \$/Lt = 73 \times 0.158 \times 3.60 =$	41.52 15% 6.23
LUBRICANTES	
ACEITE M. DIESEL $Ad= P \times 0.0032 \times \$/Lt. = 73 \times 0.0032 \times 22.00 =$	5.14 15% 0.77
LLANTAS $LI=VII / Hv = 0$	0.00 15% 0.00
SUMA CONSUMOS POR HORA	\$46.66 \$7.00
OPERACION.	
SALARIO \$225.00 OPERADOR 1	
No. s/H \$0.00 AYUDANTE 0	
\$225.00 Hrs. = 8 x 0.85 = 6.80	
SUMA OPERACION. \$225.00 / 6.80	\$33.09 0% \$0.00
COSTO DIRECTO POR HORA- MAQUINARIA	\$150.39 \$31.81

Cálculo de Costo Horario

MAQUINA: PLANTA DOSIFICADORA DE MEZCLA.	OBRA:	
MODELO: ASR- 250EA	FECHA: VIGENCIA ENERO – 2003.	
SERIE	REFERENCIA:	
PRECIO DE ADQUI (VA) \$ 5,065,000.00	VIDA ECONOMICA (VE). 6000 Hrs.	
EQUIPO ADICIONAL	HORAS AÑO (HO) 833 Hrs.	
VALOR LLANTAS (VII) \$	FAC. OPERACION. (FO) 1	
VALOR INICIAL \$ 5,065,000.00	VIDA ECO. LLANTAS (Hv) Hrs.	
VALOR RESCATE (VR) 10%	MOTOR (P) DIESEL 204 HP	
VALOR A DEPRECIAR \$ 506,500.00	FAC. MANTENI. (Q) 1.00	
T. INTERES ANUAL (I) 12%	ACEITE HIDRAULICO LTS	
PRIMA SEGUROS (S) 2.5%	LLANTAS JGO	
GASOLINA		
DIESEL \$ 3.60		
ACEITE M. DIESEL \$ 22.00		
ACEITE M. GASOLINA		
	ACTIVO % INACTIVO	
CARGOS FIJOS		
DEPREC. $D=(Va-Vr)/Ve = (5'065,000-506,500)/6000=$	759.75 20% 151.95	
INVERSION $F=(Va+Vr) I/2HO= ((5'065,000+506,500) \times 0.12)/(2 \times 833)=$	401.31 100% 401.31	
SEGUROS $S=(Va+Vr)S/2HO ((5'065,000+506,500) \times 0.025)/(2 \times 833)=$	83.61 100% 83.61	
MANTENIM. $T=Q \times D = 1 \times 759.75$	759.75 20% 151.95	
SUMA CARGOS FIJOS POR HORA	\$2,004.41	\$788.81
COMBUSTIBLES- CONSUMO FAC. COMBUSTIBLES		
GASOLINA $G=P \times 0.202 \times \$Lt =$		
DIESEL $D=P \times 0.158 \times \$Lt = 204 \times 0.158 \times 3.60$	116.04 15% 17.41	
LUBRICANTES		
ACEITE M. DIESEL $Ad= P \times 0.0032 \times \$Lt = 204 \times 0.0032 \times 22.00=$	14.36 15% 2.15	
LLANTAS $Lt=VII / Hv$	0 15% 0.00	
SUMA CONSUMOS POR HORA	\$130.40	\$19.66
OPERACION.		
SALARIO \$450.00 OPERADOR 1		
No. s/H \$260.00 AYUDANTE 1		
Hrs. = 8x1=8		
SUMA OPERACION. \$710.00 / 8.00	\$88.75	\$0.00
COSTO DIRECTO POR HORA- MAQUINARIA	\$2,223.66	\$808.37

Cálculo de Costo Horario

MAQUINA: PAVIMENTADORA DE CONCRETO ABG MODELO: TITAN 511 SERIE	OBRA: FECHA: VIGENCIA ENERO - 2003. REFERENCIA:		
PRECIO DE ADQUI (VA) \$ 3'200,000 EQUIPO ADICIONAL VALOR LLANTAS (VII) \$ 11,180.00 VALOR INICIAL \$ 3'188,820 VALOR RESCATE (VR) 10% VALOR A DEPRECIAR \$ 318882 T. INTERES ANUAL (I) 12% PRIMA SEGUROS (S) 2.5% GASOLINA DIESEL \$ 3.60 ACEITE M. DIESEL \$ 22.00 ACEITE M. GASOLINA	VIDA ECONOMICA (VE) 6000 Hrs. HORAS AÑO (HO) 833 Hrs. FAC. OPERACION. (FO) 1 VIDA ECO. LLANTAS (Hv) 2000 Hrs. MOTOR (P) DIESEL 140 HP FAC. MANTENI. (Q) 1 ACEITE HIDRAULICO LTS LLANTAS \$11,180.00 JGO		
CARGOS FIJOS	ACTIVO	%	INACTIVO
DEPREC. $D=(Va-Vr)/Ve = (3'188,820-318,882)/6000=$	478.32	20%	95.66
INVERSION $F=(Va+Vr) / 2HO = ((3'188,820+318,882) \times 0.12 / (2 \times 833)) =$	252.66	100%	252.66
SEGUROS $S=(Va+Vr)S/2HO = ((3'188,820+318,882) \times 0.025 / (2 \times 833)) =$	52.64	100%	52.64
MANTENIM. $T=Q\% \times D = 1 \times 478.32 =$	478.32	20%	95.66
SUMA CARGOS FIJOS POR HORA	\$1,261.94		\$496.62
COMBUSTIBLES- CONSUMO	FAC.COMBUSTIBLES		
GASOLINA $G=P \times 0.202 \times \$Lt. =$			
DIESEL $D=P \times 0.158 \times \$/Lt = 140 \times 0.158 \times 3.60 =$	79.63	15%	11.94
LUBRICANTES			
ACEITE M. DIESEL $Ad= P \times 0.0032 \times \$/Lt. = 140 \times 0.0032 \times 22.00 =$	9.86	15%	1.48
LLANTAS $LI=VII / Hv = 11,180/2,000 =$	5.59	15%	0.84
SUMA CONSUMOS POR HORA	\$96.08		\$14.26
OPERACION.			
SALARIO \$280.00 OPERADOR 1			
No. s/H \$110.00 AYUDANTE 1			
Hrs. = 8x1=8			
SUMA OPERACION.	\$390.00	/	8
	\$48.76	0%	\$0.00
COSTO DIRECTO POR HORA- MAQUINARIA	\$1,406.77		\$510.88

Cálculo de Costo Horario

MAQUINA: COMPACTADOR NEUMATICO		OBRA:		
MODELO:		FECHA: VIGENCIA ENERO -2003.		
SERIE		REFERENCIA:		
PRECIO DE ADQUI (VA) \$	600,000.00	VIDA ECONOMICA (VE).	10000 Hrs.	
EQUIPO ADICIONAL		HORAS AÑO (HO)	2000 Hrs.	
VALOR LLANTAS (VII) \$	33,540.00	FAC. OPERACION. (FO)	0.85	
VALOR INICIAL \$	566,460.00	VIDA ECO. LLANTAS (Hv)	2000 Hrs.	
VALOR RESCATE (VR)	10%	MOTOR (P) DIESEL	130 HP	
VALOR A DEPRECIAR \$	56,646.00	FAC. MANTENI. (Q)	0.90	
T. INTERES ANUAL (I)	12%	ACEITE HIDRAULICO	22.00 LTS	
PRIMA SEGUROS (S)	2.5%	LLANTAS	\$33,540.00 JGO	
GASOLINA				
DIESEL \$	3.60			
ACEITE M. DIESEL \$	22.00			
ACEITE M. GASOLINA				
CARGOS FIJOS		ACTIVO	%	INACTIVO
DEPREC. $D=(Va-Vr)/Ve =$	$(566,460-56646)/10000 =$	50.98	20%	10.2
INVERSION $F=(Va+Vr) / 2HO =$	$(566,460+56646) \times 0.12 / (2 \times 2000) =$	18.69	100%	18.69
SEGUROS $S=(Va+Vr)S/2HO =$	$(566,460+56646) \times 0.025 / (2 \times 2000) =$	3.89	100%	3.89
MANTENIM. $T=Q\% \times D =$	$0.90 \times 50.98 =$	45.88	20%	9.18
SUMA CARGOS FIJOS POR HORA		\$119.45		\$41.96
COMBUSTIBLES- CONSUMO				
FAC.COMBUSTIBLES				
GASOLINA $G=P \times 0.202 \times \$Lt. =$				
DIESEL $D=P \times 0.158 \times \$/Lt =$	$130 \times 0.158 \times 3.60 =$	73.94	15%	11.09
LUBRICANTES				
ACEITE M. DIESEL $Ad= P \times 0.0032 \times \$/Lt. =$	$130 \times 0.0032 \times 22.00 =$	9.15	15%	1.37
LLANTAS $LI=VII / Hv =$	$33,540 / 2,000 =$	16.77	15%	2.52
SUMA CONSUMOS POR HORA		\$99.87		\$14.98
OPERACION.				
SALARIO \$225.00	OPERADOR 1			
No. s/H \$0.00	AYUDANTE 0			
	Hrs. = 8×0.85			
SUMA OPERACION.		\$225.00	0%	\$0.00
COSTO DIRECTO POR HORA- MAQUINARIA		\$262.41		\$56.94

Cálculo de Costo Horario

MAQUINA: CORTADORA MODELO: SERIE	OBRA: FECHA: VIGENCIA ENERO – 2003. REFERENCIA:
PRECIO DE ADQUI (VA) \$ 150,000.00 EQUIPO ADICIONAL VALOR LLANTAS (VII) \$ VALOR INICIAL \$ 150,000.00 VALOR RESCATE (VR) 10% VALOR A DEPRECIAR \$ 15,000.00 T. INTERES ANUAL (I) 12% PRIMA SEGUROS (S) 2.5% GASOLINA DIESEL \$ ACEITE M. DIESEL \$ ACEITE M. GASOLINA	VIDA ECONOMICA (VE) 6000 Hrs. HORAS AÑO (HO) 833 Hrs. FAC. OPERACION. (FO) 0.85 VIDA ECO. LLANTAS (Hv) Hrs. MOTOR (P) DIESEL 75 HP FAC. MANTENI. (Q) 0.90 ACEITE HIDRAULICO LTS LLANTAS JGO
CARGOS FIJOS	ACTIVO % INACTIVO
DEPREC. $D=(Va-Vr)/Ve = (150,000-15,000)/6000 =$	22.5 20% 4.5
INVERSION $F=(Va+Vr) / 2HO = (150,000+15,000) \times 0.12 / (2 \times 833) =$	11.88 100% 11.88
SEGUROS $S=(Va+Vr)S/2HO = (150,000+15,000) \times 0.025 / (2 \times 833) =$	2.48 100% 2.48
MANTENIM. $T=Q\% \cdot D = 0.90 \times 22.50 =$	20.25 20% 4.05
SUMA CARGOS FIJOS POR HORA	\$57.11 \$22.91
COMBUSTIBLES- CONSUMO FAC.COMBUSTIBLES	
GASOLINA $G=P \cdot 0.202 \cdot \$Lt.$	
DIESEL $D=P \cdot 0.158 \cdot \$/Lt$	0 15% 0.00
LUBRICANTES	
ACEITE M. DIESEL $Ad= P \cdot 0.0032 \cdot \$/Lt.$	0 15% 0.00
LLANTAS $LI=VII / Hv$	0 15% 0.00
SUMA CONSUMOS POR HORA	\$0.00 \$0.00
OPERACION.	
SALARIO \$0.00 OPERADOR 0	
No. s/H \$110.00 AYUDANTE 1	
Hrs. = $8 \times 0.85 = 6.80$	
SUMA OPERACION. \$110.00 / 6.80	\$16.18 0% \$0.00
COSTO DIRECTO POR HORA- MAQUINARIA	\$73.29 \$22.91

Tabla 5.7 Cuadro comparativo de costos de financiamiento de pavimento flexible y pavimento de CCR con $f_c = 300 \text{ kg/cm}^2$.

Tipo de pavimento	Concepto	Unidad m ³	Espesor m	P.U. \$/m ³	Cantidad m ³ /km	Importe/Km (\$)
Flexible	-Carpeta de concr. Asf.	m ³	0.10	1039.77	950.50	988,301.39
	-Base hidra. Estab. al 5% cem. Portland.	m ³	0.20	980.00	1901.00	1'862,980.00
	-Sub-base hidráulica	m ³	0.20	623.64	1991.00	1'241,667.24
	-Riego de sello premezclado	m ³	0.10	895.00	950.50	<u>850,697.50</u>
	-Costo por km de construcción					\$ 4'943,646.13
	-Costo de mantto.					\$ <u>1'126,734.90</u>
	Total					\$6'070,381.03
Flexible	-Carpeta de concr. Asf.	m ³	0.05	842.00	475.25	400,160.50
Rígido	-CCR	m ³	0.25	1247.28	2432.50	<u>3'034,008.60</u>
	-Costo por km de constr.					\$ 3'434,169.10
	-Costo de mantto.					\$ <u>540,400.91</u>
	Total					\$ 3'974,570.01

La reducción en costos construyendo con pavimento flexible típico de asfalto es mayor en costos que construir con (CCR), ya que, éste tiene una reducción económica menor al 35 %.

5.2.4 Análisis de costos para el tramo de acceso al proyecto hidroeléctrico de Aguamilpa.

Se analizan los costos correspondientes a la colocación de base y sub-base elaboradas con CCR. La importancia de este análisis radica en que puede conocerse el impacto que representa el costo total de un pavimento de CCR. Los datos fueron proporcionados por el Departamento de Precios Unitarios de la Dirección General de Conservación de carreteras de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Costo total global promedio, obtenido con volúmenes calculados -según fig.5.1 del cap. y para la construcción de base y sub-base rigidizada con cemento portland, con agregados pétreos de tamaño máximo de 38 mm (1 ½"). El suministro del agregado de arena fue por cuenta de la comisión federal de electricidad (CFE).

Costo para 1 km de sub-base: $\$ 1168.11/\text{m}^3 \times 1.493 \times 1000 = \$ 1'743,988.23 /\text{km}.$

Costo para 1 km base: $\$ 1168.11/\text{m}^3 \times 1.426 \times 1000 = \$ 1'665,724.86 /\text{km}.$
Suma: $\$ 3'409,713.09/\text{km}.$

Costo total por km de construcción con (CCR) = $\$ 3'409,713.09/\text{km}.$

Costo total por los 36.5 km de longitud del tramo, = $\$ 3'409,713.09/\text{km} \times 36.5 =$
 $= \$ 124'454,527.79$

5.2.5 Comentarios al análisis obtenido.

Como se observa en el análisis calculado, la construcción de pavimentos con CCR es muy conveniente desde el punto de vista económico, ya que, no solo se abaten costos directamente en la elaboración del producto, sino que a largo plazo se tienen ahorros significativos en cuanto a su mantenimiento, debido a su elevada resistencia frente a cambios bruscos de temperatura, abrasiones, poca permeabilidad, esfuerzos flexionantes, de compresión y de tensión; lo cual le asegura una larga vida útil y una rápida recuperación de la inversión.

Considerando en los tiempos futuros de vida económica de los caminos en México, ésta sería la opción más viable para las empresas constructoras que se dedican al área de construcción de carreteras; así mismo en el apéndice II, se presenta una alternativa más para poder construir pavimentos de CCR con equipo y maquinaria integrado.

CAPITULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

El concreto compactado con rodillos (CCR), es un concreto hidráulico de revenimiento cero cuya colocación se realiza por medio del equipo de compactación de tierras con la finalidad de lograr la máxima capacidad entre las partículas que lo componen. El tamaño máximo del agregado suele ser de $\frac{3}{4}$ de pulg., aunque puede llegarse a un máximo de 3 pulg. Al endurecer adquiere un aspecto y propiedades semejantes a las del concreto convencional (CC), pero usando menor cantidad de cemento.

Las principales diferencias (y semejanzas) del CCR con el CC, son las siguientes:

- 1.- Revenimiento cero.
- 2.- Compactado mediante procedimientos propios de la compactación de tierras.
- 3.- Limitación del tamaño máximo de agregado de $\frac{3}{4}$ " a $1\frac{1}{2}$ ".
- 4.- Para resistencias similares con respecto del concreto convencional, el CCR consume una menor cantidad de cemento y presenta una una relación agua- cemento más baja.
- 5.- La cantidad de finos en el CCR, suele ser un poco mayor que en el concreto convencional.

Asimismo, la cantidad de arena suele ser un poco mayor, en tanto que los agregados gruesos tienden a disminuir. Esto es debido seguramente a la necesidad de tener una mezcla con trabajabilidad y consistencia tales que faciliten la labor de compactación.

- 6.- El CCR presenta una mayor densidad. Su peso unitario oscila entre 2400 y 2600 kg/m³, en cambio el concreto convencional tiene un peso de 2000 y 2200 kg/m³. Esto es debido tanto al procedimiento de compactación como a los índices de humedad empleados en el CCR.

Como se vio en el capítulo II, existe una relación entre los índices de humedad y la resistencia del concreto compactado, alcanzándose el máximo valor en el nivel de humedad óptima, como ocurre en la compactación de los suelos.

- 7.- La relación entre el esfuerzo a compresión y el de tensión es de un 5%, contra el 10% que se da en el concreto convencional.
- 8.- Los módulos de elasticidad son semejantes entre ambos concretos.

- 9.- Los valores k de permeabilidad para el CCR son ligeramente mayores a los del concreto convencional.
- 10.- Las propiedades térmicas son similares en ambos concretos.
- 11.- La trabajabilidad del concreto convencional se determina a través del concepto de revenimiento.
En el CCR ésta viene dada por el denominado tiempo $VeBe$, relacionado con ciertos periodos de vibrado a que se ve sometido el elemento.
- 12.- El diseño de mezclas para CCR no depende directamente de la relación agua-cemento ni de las relaciones grava-arena, como ocurre en el concreto convencional, sino más bien del tipo y tamaño máximo del agregado, con el fin de lograr una adecuada compactación.

Con respecto a los valores teóricos de proporcionamiento, el CCR presenta en el laboratorio valores mucho más elevados. Como se mencionó en el capítulo II, el contenido de cemento varía entre 60 y 248 kg/m^3 . Aunque los valores obtenidos en el laboratorio fueron de aproximadamente 300 kg/m^3 . También se mencionó que la cantidad de agua requerida oscilaba entre 89 y 119 lt/m^3 , más en el laboratorio se obtuvo un requerimiento de unos 160 lt/m^3 . Esto indica la necesidad de considerar los valores teóricos como requerimientos mínimos antes que como límites máximos en la dosificación de las mezclas.

Con respecto a los índices de resistencia, compresión y tensión alcanzados por el CCR, puede decirse que en general son aceptables, llegando generalmente, arriba del valor nominal en un 10% aproximadamente. Además se tiene una ventaja de obtenerlos en un rango similar al del concreto convencional con menor consumo de cemento y de agregado grueso, lo cual representa un ahorro en costos significativo, aún cuando los requerimientos de agregado fino se incrementan en un 10%.

El análisis de factibilidad económica señala, que en los pavimentos, la viabilidad del CCR frente a las opciones típicas como son: el pavimento flexible de concreto asfáltico, el ahorro en costos es del 30 al 35% en promedio, considerando tanto los gastos por construcción como por mantenimiento.

Todas estas ideas nos dan la pauta para sugerir que la aplicación del CCR en México es una técnica económicamente viable.

En caminos de acceso, entronques de tramos carreteros y zonas en áreas urbanas, son ejemplos de que existe la capacidad técnica y profesional necesaria para llevar a un buen término, proyectos donde el CCR sea el material principal. Sin embargo, la información que en el medio se tiene respecto del CCR en México, está poco difundida y a pesar de que en otros países esta técnica lleva varios años aplicándose, tal es el caso de las carreteras españolas; en México parece una novedad. No es sino hasta 1992, que se tiene la primera aplicación del CCR en caminos del país como lo son:

El Estado de Durango y Nayarit, en 1993 en el Estado de Veracruz, así como en zonas urbanas de calles y avenidas del estado de Chihuahua.

Con respecto a lo mencionado en el Apéndice II, relativo a la utilización de la maquinaria moderna integrada con tecnología de punta para construir CCR, se observa un ahorro considerablemente bueno en la ejecución de la obra, como son: tiempo de construcción (se adelanta el programa de obra), sistema económico (costos proyectados menores), sistema de financiamiento (mínimo financiamiento), también se observa que el agregado máximo aplicado es de menor diámetro, resultando con esto mayores rendimientos en la elaboración, colocación y compactado de la mezcla; por último, considero la existencia de un mayor control de calidad, ya que, éste procedimiento permite dar paso al tránsito después de la compactación de la última capa proyectada, debido a la aplicación de aditivo Master fluidificante para CCR; así mismo poder realizar un análisis de planeación técnico-económico de las obras y determinar las decisiones adecuadas y tratar de aplicar la técnica de construir CCR con equipo moderno integrado con tecnología de punta.

Espero que este trabajo contribuya a la difusión de esta técnica en México y promueva en gran escala su creciente aplicación en las obras de infraestructura y en especial al sistema carretero.

Por necesidades de una mayor comprensión del trabajo desarrollado, se tuvo que traducir a Lenguaje Español lo correspondiente a la Prueba de Laboratorio llamada VeBe.

Así mismo se presenta un ejemplo práctico de aplicaciones de pavimento de CCR en México del Camino de Acceso (Proyecto Hidroeléctrico Aguamilpa), Estado de Nayarit.

A través de la Gerencia de Enseñanza del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), se consideró un comentario muy importante que corresponde a una propuesta más de poder construir CCR con equipo y maquinaria moderna, integrada con Tecnología de punta, así como de fotografías obtenidas de obra real en proceso de ejecución.

APENDICE I.

MÉTODO DE PRUEBA (VeBe).

Esta norma fue publicada bajo la designación C 1176 ; el número inmediato siguiente de la designación indica el año de su creación original o, en su caso de revisión, el año de la última revisión.

El número entre paréntesis indica el año de la última reaprobación.

ASTM Designación: C 1176-92 (Reaprobada en 1998).

Practica normalizada para realizar concreto compactado con rodillo en moldes cilíndricos utilizando la mesa vibratoria. [22]

1.- OBJETIVO

1.1 Esta norma reúne los procedimientos para realizar pruebas a muestras cilíndricas del concreto mientras que normalmente se procede a rodillar y aplicar vibración interna como se describe en la norma C-31, no es practicable. Esta norma es aplicable para el concreto mezclado en estado fresco, preparado en laboratorio o en obra, teniendo un tamaño máximo nominal de agregado de 50 mm (2pulg.) o menos. Si el agregado mide más de 2 pulg., entonces la norma es aplicable solo cuando el desarrollo de la fracción sobrepasa los 50 mm (2 pulg) del cedazo con el agregado mayor siendo removidos de acuerdo con la norma C-172. Esta norma fue diseñada para usarse en pruebas de concreto compactado con rodillos, que puede aplicarse para la realización de pruebas de otros tipos de concreto tales como los agregados de cemento tratado y mezclas similares para suelo-cemento.

1.2 Dos métodos son proporcionados para hacer cilindros de concreto usando una mesa vibratoria:

1.2.1 El método A es un procedimiento para realizarle pruebas a muestras en moldes reutilizables de acero sobre una mesa vibratoria.

1.2.2 El método B es un procedimiento para realizarle pruebas a muestras en moldes de plástico corriente que han sido insertados dentro de un mango metálico sobre una mesa vibratoria.

1.3 Los valores expresados en unidades de libras por pulgada son para considerarse como estándar. Los valores entre paréntesis son solo información equivalente.

1.4 Estos estándares no son equivalentes para dirigir todo lo relacionado a la seguridad, si hubiese alguno asociado con el uso. Lo es de la responsabilidad del usuario de esta norma para establecer la apropiada especificación sana y segura, además determina la aplicabilidad de las limitaciones regulatorias antes de usarse.

Esta norma se encuentra bajo la jurisdicción de ASTM comité C-9 en concreto y agregados de concreto y es directa responsabilidad del subcomité C09.45 en concreto compactado con rodillo.

La actual edición fue aprobada el 15 de Septiembre de 1992, publicada en Noviembre de 1992.

Originalmente publicada como C-1176-91. Última edición previa C- 1176-91.

3.- RESUMEN DE LA NORMA.

3.1 Esta norma describe los métodos para la realización de las pruebas para las muestras de cilindros de concreto usando la mesa vibratoria. Las pruebas para las muestras son hechas en moldes cilíndricos que son conectados a la mesa vibratoria abajo de 20 lb (9.1 kg) de sobrecarga para facilitar su consolidación.

4.- SIGNIFICADO Y USO.

4.1 Esta norma fue diseñada para usarse en la rigidez y sequedad extremas de mezclas de concreto comúnmente usadas en la construcción de concreto compactado con rodillos. La norma en uso está basada en el rodillamiento o vibración interna, la cual el concreto no puede fijar su consistencia (**nota 1**).

Nota 1. Además la descripción de la consistencia del concreto está dada en ACI 207.5R-88 y 211.3-75 (R 1988). La consistencia del concreto puede determinarse de acuerdo con el método de prueba C 1170.

5.- EQUIPO

5.1 Moldes:

5.1.1 Molde tipo A. Un molde cilíndrico conformado para los requerimientos de la especificación C-470 de 6 pulgadas (152 mm) de diámetro por 12 pulgadas (305 mm) de

altura para los moldes reutilizables. Los moldes deberán hacerse de acero o algún otro metal resistente que no sea fácilmente atacado por la pasta del cemento. No deben usarse moldes de aluminio. Los moldes se colocarán permanentemente sobre la ranura de metal en la placa de la base, también los moldes pueden ser rígidamente sujetos a la mesa vibratoria. El borde superior del molde debe ser liso, plano y paralelo a la parte inferior del molde. La parte inferior del molde debe estar sellada herméticamente.

5.1.2 Molde tipo B. Un plástico de uso sencillo, un molde cilíndrico de 6 pulg. (152 mm) de diámetro por 12 pulg (305 mm) de altura. Las características del molde deben ser conforme a la especificación C- 470, moldes de plástico de uso corriente.

5.1.2.1 Molde de mango. Un molde cilíndrico tipo B, debe ser insertado dentro de un mango cilíndrico rígido con una placa como base en la parte inferior que se debe sujetar a la mesa vibratoria. El mango del molde debe estar hecho de acero o de algún otro metal duro que no reaccione con el contenido del cemento Portland u otro cemento hidráulico.

El mango debe ser capaz de sostener firme y verticalmente el molde de plástico manteniéndolo sin deformación y debe ranurarse verticalmente con las abrazaderas ajustables que aprieten alrededor del molde. El mango debe conformarse de tal manera que pueda abrirse para quitar el molde (fig. 2.1) y también debe estar permanentemente puesto entre la ranura metálica de tal forma que el mango pueda estar rígidamente sujetado a la mesa vibratoria. El mango del molde debe tener un espesor mínimo de pared de 1/8 de pulg (3.2 mm) y un mínimo espesor de 1/4 de pulg (6.4 mm) en la placa de la base. El diámetro interno el mango del molde debe estar entre $1/8 \pm 1/16$ de pulg (3.2 ± 1.6 mm) que el diámetro exterior del molde tipo B y teniendo una altura de $1/2$ a $1/4$ de pulg (12.8 ± 6.4 mm) menos que la altura del molde tipo B.

5.2 Mesa vibratoria del VeBe. Una mesa vibratoria es una base de acero con 3/4 de pulg (19 mm) de grueso con dimensiones de aproximadamente 15 pulg (381 mm) de largo, 10 ¼ pulg (260 mm) de grueso y 12 pulg (305 mm) de altura. La mesa vibratoria deberá ser construida de tal manera que pueda prevenir flexiones durante la operación en la mesa. La plataforma de la mesa debe ser activada mediante un vibrador electromecánico.

La masa total del vibrador y la mesa son aproximadamente de 210 lb (95 kg). La mesa debe ser nivelada y asegurada al piso de concreto o alguna base de losa que tenga suficiente masa para prevenir desplazamientos del equipo durante la preparación de las muestras.

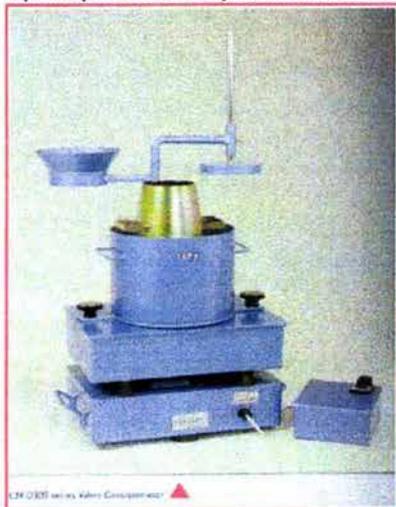
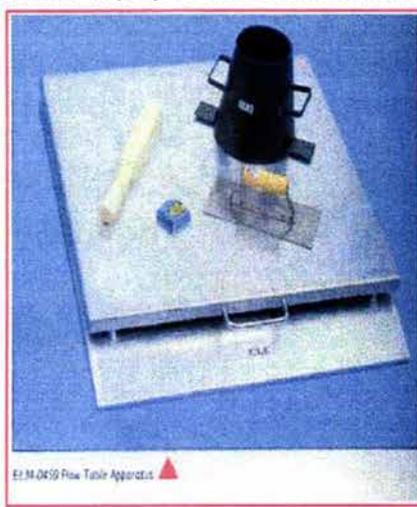


Fig 2.1 Mesa vibratoria, recipiente para CCR y accesorios.



Accesorios para mesa vibratoria, como para revenimiento y pisón.

5.3 Columna armable y guía del mango. Un mango de guía metálico con una abrazadera ensamblable o cualquier otro aparato montado a la columna armable. La columna armable y la guía del mango deben ser capaz de mantener el tubo metálico sostenido a unas 20 lb (9.1 kg) a la masa cilíndrica en una posición perpendicular a la superficie de vibrado y permita al tubo deslizarse libremente cuando la abrazadera está asegurada.

La columna armable debe mantener la guía del mango en una posición cerrada directamente sobre el centro de las muestras para ser vibradas. La columna armable también debe ser capaz de girarse desde el centro de la mesa.

5.4 Sobrepeso. Una masa de acero cilíndrica con un tubo metálico de 18 pulg (457 mm) de largo y $5/8 \pm 1/16$ de pulg (16 ± 2 mm) de diámetro conectado perpendicularmente y empotrado al centro del cuerpo. El tubo debe deslizarse a través de la guía del mango sin

obstrucción. El sobrepeso tiene un diámetro de $5 \frac{3}{4} \pm 1/8$ de pulg (146 \pm 3 mm). El ensamble del sobrepeso tiene una masa de 20 ± 0.5 lb (9.1 \pm 0.25 kg) incluyendo el peso del tubo (fig 2.1). El sobrepeso debe manejarse manualmente, la longitud del tubo puede reducirse a cerca de 12 pulg (305 mm) y construido con una "T" o una "D" manuable para sostener el tubo del sobrepeso y evitar que resbale.

5.5Cernidor. Un cernidor de 50 mm (2 pulg) conforme a la especificación E.11.

5.6 Herramientas pequeñas. Llana de madera, pala removedora para acabado manual, llana de acero, madera ligera, llave inglesa, apisonador de rodillo y una linterna como requerimiento.

6.- REALIZACION DE LAS PRUEBAS.

6.1 Las pruebas del concreto fresco se obtienen de acuerdo a la norma C-172.

6.2 Las pruebas del concreto tienen un tamaño de agregado nominal máximo de 50 mm (2 pulg) o menos. Si el concreto tiene agregados mayores a 50 mm (2 pulg), las pruebas deben obtenerse mojando el cedazo por encima de los 50 mm (2 pulg), el cedazo de acuerdo con la norma C-172.

6.3 Las muestras para pruebas de concreto deben hacerse dentro de los 45 minutos después de completar la mezcla del concreto a menos que esté estipulado de otra forma.

7.- CALIBRACION Y ESTANDARIZACION.

7.1 La mesa vibratoria produce un movimiento de vibración sinusoidal con una frecuencia por encima de los 3600 ± 100 vibraciones por minuto (60 ± 1.67 hz.) y una doble amplitud de vibración de 0.0170 ± 0.0030 pulgadas (0.43 ± 0.08 mm), cuando 60.0 ± 2.5 lb (27.2 ± 1.1 kg) de sobrepeso está aplicándose rigidamente hacia la mesa.

7.1.1 Determina la frecuencia y la doble amplitud de la mesa vibratoria bajo condiciones de prueba de simulación antes de iniciar su uso y después de cada año. La

vibración excesiva en el tacómetro debe tomarse en cuenta para verificar la frecuencia de la vibración.

7.2 Recalibrar la mesa vibratoria después de cualquier evento (incluyendo reparaciones) que pudiesen afectar la operación, o siempre y cuando los resultados de las pruebas sean cuestionables.

8.- PRECAUCIONES TECNICAS.

8.1 Cuando se obtienen los ensayos, se debe asegurar que las pruebas sean representativas de que el material ha sido probado.

8.2 El concreto con la rigidez a la consistencia extremadamente seca son sumamente susceptibles para la segregación durante el mezclado. Para minimizar la segregación, tener cuidado en la obtención de las pruebas y durante el transporte, remezclado y pruebas del concreto.

8.3 Después de tres meses de uso continuo, siempre se debe revisar y limpiar la parte de abajo de la mesa vibratoria libre de cualquier dureza de concreto o pasta de cemento que pudiese interferir con el libre movimiento de la parte superior de la mesa.

9.- PROCEDIMIENTO.

9.1 Método A- Moldes tipo A:

9.1.1 Humedecer los moldes tipo A con un lubricante adecuado antes de hacer la mezcla de las muestras de prueba para facilitar la separación del molde.

9.1.2 Colocar el molde de la mesa vibratoria y centrar el sobrepeso para que los bordes de la hoja de plástico no sigan en las paredes del molde. Abajo del sobrepeso dentro del molde, verificar dentro de su espacio apropiado. Conectar el molde a la mesa vibratoria y apretar firmemente la tuerca de mariposa. Mover el sobrepeso hacia el molde.

9.1.3 Vaciar el concreto en el molde hasta que se llene la tercera parte del volumen después de la solidificación [aproximadamente 9.5 lb (4.3 kg)]. El apisonado con barra

puede usarse para distribuir las irregularidades del concreto conforme es adicionado. Durante el llenado, use una pala cuadrada de acabado para obtener pruebas representativas y maneje el concreto de tal manera que las partículas de tamaño grande de los agregados toscos no se separen del mortero.

9.1.4 Mover el sobrepeso sobre el centro del molde, colocando la guía del mango de la abrazadera y poner el sobrepeso suavemente sobre el concreto. El sobrepeso debe ser capaz de deslizarse verticalmente libre de obstrucciones en la guía del mango.

9.1.5 Si el sobrepeso no puede ser centrado en el molde sin obstrucciones dentro de la pared del molde, colocar la sobrecarga directamente sobre la muestra en el molde sin el uso de la guía del mango; el sobrepeso tiene un tubo perpendicular a la superficie de la mesa. El tubo del sobrepeso tiene que manejarse manualmente cuando la muestra esta vibrando.

No aplicar alguna presión adicional con la mano al sobrepeso cuando manualmente se esté operando el sobrepeso.

9.1.6 Activar la mesa vibratoria y permita que el concreto solidifique bajo el sobrepeso. Usando una lámpara, observe el concreto, en el espacio anular entre los bordes del sobrepeso y dentro de la pared del molde. Observe el mortero hasta que se forme un aro alrededor del perímetro total del sobrepeso. Cuando en el mortero se forma completamente el aro alrededor del sobrepeso, detener el vibrador. Si las tuercas de mariposa se aflojan cuando se mezcla la muestra, reapretarlas, entonces, continuar con el vibrado para asegurar la completa solidificación del espécimen.

9.1.7 Si la cavidad hecha por la vibración previene que el aro del mortero de forma a un pequeño espacio, siempre que se ha formado en todos los demás lugares, el vibrador puede ser detenido y agregar otro poco de concreto. Si una cantidad considerable del aro del mortero no se ha formado, estas indicaciones de concreto pueden tener insuficiente mortero debido a cualquier prueba impropia, segregación, o mezclas mal proporcionadas.

En esas instancias, la muestra de concreto debería visualmente revisarse después de desnudar el molde y poder tomar una decisión para aceptar o rechazar la muestra.

9.1.8 Repetir el procedimiento desde 9.1.3 hasta 9.1.7 para la segunda capa de concreto, llenando el molde, hasta aproximadamente dos terceras partes del volumen. Para la tercera capa, sobrellenar el molde para amontonar el concreto encima del rebosadero del molde. Otra vez, aplicar el sobrepeso en las irregularidades del concreto y solidificar. Si el sobrepeso solidifica al concreto abajo del nivel alto del molde, entonces apagar la mesa vibratoria. Aplique concreto adicional en el molde, ya que, cuando solidifica, el concreto crece $1/8$ de pulgada (3 mm) por encima del rebosadero del molde.

Continúe con la vibración y deslice el sobrepeso hacia abajo y con fuerza sobre lo alto del molde hasta que el concreto compactado esté a nivel con el rebosadero del molde. Esta reaplicación de golpes con un suavizador desde la rigidez del concreto no puede flotar fácilmente. El sobrepeso no debe permanecer en una sola posición cuando el concreto está siendo terminado porque esto puede causar que los agregados sean forzados hacia abajo y el mortero sea forzado hacia afuera del molde resultando una muestra de prueba no representativa. Después de que la superficie ha sido habilitada con el sobrepeso, vibrar la muestra a 4 ± 1 s, sin el sobrepeso hasta llenar en menor superficie a menos que se dañe la muestra por oscilaciones de larga amplitud del vibrador que está anticipado.

9.1.8.1 Cuando se realizan las pruebas a las muestras usando una mesa vibratoria alternativa, no es posible un vibrador para la muestra sin un sobrepeso. Esto es debido a los disturbios del espécimen compactado cuando la amplitud es grande y las oscilaciones de baja frecuencia ocurren después de que el vibrador ha sido apagado. Si esto ocurre, mantener el sobrepeso aplicado hasta que la mesa vibratoria este completamente apagada.

9.1.9 Remover el molde con la muestra solidificada de la mesa vibratoria y acabar la parte superior de la superficie de la muestra con un desplantador de acero o de madera ligera.

Sacar las partículas de agregado de la superficie cuando se utilice una llana de madera.

9.2 Método B. Moldes tipo B:

Realizar muestras de prueba de concreto en moldes tipo B de acuerdo con el punto 9.1. Antes de realizar las muestras de prueba, insertar un molde tipo B dentro del mango metálico asegurándose de cerrar de modo conveniente pero sin deformar el molde de plástico. El ensamble del mango está hecho de un molde cilíndrico de acero, rígidamente abrazado el ensamble completo para la mesa vibratoria y realizar la prueba al espécimen de acuerdo con los procedimientos desde 9.1.2 hasta 9.1.9.

10.- CURADO.

10.1 A menos que de otra manera esté especificado, todas las muestras tendrán que curarse de acuerdo con las secciones de curado de la norma C- 192 o norma C- 31, siempre y cuando sea aplicable. Las muestras probadas para comprender su resistencia y la resistencia a la tensión se aplicarán de acuerdo con los métodos C- 39 y método de prueba C- 496, respectivamente. Este tipo de procedimiento se usa especialmente en mezclas cuya densidad debe ser alta.

Los moldes (cilindros de acero de 152 x 304 mm.), se fijan rígidamente a la mesa de vibrado empleada en la prueba VeBe y llenados en tres capas iguales. Un peso de 9.1 kg se coloca en la cabeza de cada capa y el cilindro es vibrado hasta que la pasta sobresale. La última capa es enrasada.

Este procedimiento es el que más extensamente se ha empleado en España y otras regiones donde el CCR tiene gran aplicación, debido a la proximidad de los resultados de laboratorio con los obtenidos en campo. En México, la Dirección de Servicios Técnicos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), los cilindros de CCR para laboratorio se han elaborado también con este método.

APENDICE-II

ALTERNATIVA PARA PODER CONSTRUIR PAVIMENTOS DE CCR, UTILIZANDO MAQUINARIA Y EQUIPO INTEGRADO CON TECNOLOGIA DE PUNTA.

Como se mencionó en el capítulo V, inciso 5.2, todos los pavimentos flexibles construidos en México, se componen básicamente de una base, sub-base y carpeta de concreto asfáltico, con lo cual necesariamente influyen en la determinación del factor costos.

El objetivo principal de poder proponer una alternativa más para construir pavimentos de concreto hidráulico compactados con rodillo (CCR); es con la finalidad de formular un panorama de mucha visión y ventajas en el abatimiento económico, ya que, hoy en día se utiliza equipo y maquinaria de punta sofisticada de alto nivel, debido al desarrollo tecnológico de países industrializados, permitiendo con esto mayores rendimientos en ejecución de obras de infraestructura carretera, así mismo grandes avances en ahorros de financiamiento y por ende reducción en costos proyectados.

En este apéndice se propone el equipo y maquinaria sofisticada para producción de mezcla en planta estacionaria, es decir, que se tendrá que trabajar con un tren de equipo integrado con todos los aditamentos y elementos auxiliares de acarreo, mezclado de los agregados y materiales pétreos, así como su tendido y posterior compactación, aplicando los procedimientos que se describieron en los capítulos anteriores.

Estos equipos y maquinaria se muestran en las figuras 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10:

Si analizamos la producción y rendimientos de éstos equipos, estoy considerando que producen más de 350 ton/ hr de mezcla y en igual forma rendimientos en colocación, tendido y compactación del material de hasta 350 m³/ hr.

La observación principal, es que esta maquinaria desarrolla su máxima capacidad de producción de mezcla, en condiciones especiales para caminos rectos, sin pendientes pronunciadas; así mismo, se desarrolla altos rendimientos en la colocación y tendido del material, también es de observar que ésta maquinaria trabaja mucho mejor en áreas y zonas urbanas de avenidas y calles, plataformas portuarias y en zonas de superficies planas en la construcción de grandes industrias.

En los proyectos de carreteras y ejecución de obras en México, ésta sería una opción más, pero para construcción de carreteras solamente en terreno plano con pendientes

suaves; en México se cuenta con 42.5 mil kilómetros de carreteras y aproximadamente el 70% está construido en sistema montañoso con pendientes pronunciadas y lomas de baja elevación, también de agregar que predominan en zonas lluviosas por lo que la opción antes descrita en este apéndice queda como una opinión de criterio su implementación y aplicación, e importación y renta de ésta maquinaria.

En la tabla 5.8, se presenta un cuadro comparativo de análisis de costos y factibilidad económica, en el que se observa que construir con CCR, utilizando equipo integrado con tecnología de punta, resulta ser del 10 al 15% la reducción en costos del CCR construido con equipo tradicional y de aproximadamente un 40% menor en costo de construir un pavimento flexible (concreto asfáltico); como se observa existe un ahorro considerablemente bueno pero tiene sus diferencias marcadas.



Fig. 5.7 Planta dosificadora de mezcla para concreto marca ARAM Mod. ASR-250 AE.



Fig. 5.8 Pavimentadora de concreto ABG Mod. TITAN-511, con equipo de compactación.



Fig.9.



Fig. 10.

Fig. 5.9 y 5.10 Equipos elementales integrados con tecnología de punta para utilizarse en pavimentación.

II.1 Tabla 5.8 Cuadro comparativo de factibilidad económica y de costos de financiamiento de pavimento flexible, pavimento de ccr con equipo tradicional y CCR con equipo integrado con tecnología de punta.

Tipo de pavimento	Concepto	Unidad m ³	Espesor m	P.U. \$/m ³	Cantidad m ³ /km	Importe/Km (\$)
Flexible	-Carpeta de concr. Asf.	m ³	0.10	1039.77	950.50	988,301.39
	-Base hidra. Estab. al 5% cem. Portland.	m ³	0.20	980.00	1901.00	1'862,980.00
	-Sub-base hidráulica	m ³	0.20	623.64	1991.00	1'241,667.24
	-Riego de sello premezclado	m ³	0.10	895.00	950.50	<u>\$ 850,697.50</u>
	-Costo por km de construcción					\$ 4'943,646.13
	-Costo de mantto.					\$ 1'126,734.90
Total						\$ 6'070,381.03
Flexible Rígido	-Carpeta de concr. Asf.	m ³	0.05	842.00	475.25	400,160.50
	-CCR	m ³	0.25	1247.28	2432.50	<u>3'034,008.60</u>
	-Costo por km de constr.					\$ 3'434,169.10
	-Costo de mantto.					\$ 540,400.91
Total						\$ 3'974,570.01
Flexible Rígido	-Carpeta de concreto Asfáltico	m ³	0.05	842.00	475.25	\$ 400,160.50
	-CCR utilizando equipo integrado con tecnología de punta.	m ³	0.25	1088.88	2432.50	<u>\$ 2'648,700.60</u>
	-Costo por km de constr.					\$ 3'048,861.10
	-Costo de mantto total.					\$ 471,771.97
Total						\$ 3'520,663.07

Construir con pavimento flexible típico de asfalto el costo es mayor que construir con (CCR), al utilizar maquinaria y equipo de punta sofisticado, ya que, éste resulta ser de aproximadamente un 40% de reducción en costos y del 10 al 15% construyendo CCR con equipo tradicional.

II.2.- Análisis del precio unitario actualizado hasta Enero del 2003 del concepto concreto hidráulico rodillado de 25 cm de espesor (CCR).

Se analizan los costos correspondientes a la colocación de base y sub-base elaboradas con CCR utilizando maquinaria y equipo integrado, la importancia de este análisis radica en que puede conocerse el impacto que representa el costo total de un pavimento con estas características. Los datos fueron proporcionados por el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC).

Concepto: Losa de concreto hidráulico compactado con rodillo ccr p.u.o.t. espesor 25 cm compactado como min. al 97 % ag. max. 5/8" f'c= 300 kg/cm² inc. perm. explot. de bco., extracc. o adquisición de los ag. finos gruesos y agua, acarrees necesarios; trit. y/o cribado y/o lavado; adq. y transporte del cemento portland y aditivos al lugar de la obra; cargas, descarga, y mov. en la obra, elab.y vaciado del conc.,transp. mezclado, colocación y compactación.

unidad: m³

Descripción	Cantidad	Unidad	P.U.	Importe
Materiales				
Cemento portland (a granel).	0.3284	ton	2000.00	\$ 656.80
Producción material pétreo 5/8".	0.5500	m ³	80.00	\$ 44.00
Polvo subproducto de trituración para concreto hidráulico.	0.5800	m ³	22.50	\$ 13.05
Básico del agua puesto en obra	0.1200	m ³	24.50	\$ 2.94
Aditivo master filders fluidificante p/concreto.	0.0500	lt	37.00	\$ 1.85
Cargo de materiales				\$718.64

Cuadrilla	Cantidad	Unidad	P.U.	Importe
Mano de obra: cuadrilla (1 oficial + 4 peones) 250.00 + 4 x 110.00 = \$ 690.00	0.0056	jorn	690.00	3.86
subtotal				3.86
herramienta menor 2%				0.08
cargo mano de obra				\$ 3.94

Descripción	Cantidad	Unidad	P.U.	Importe
Equipo				
-Camión volteo 20 ton 1er. km (mat.trit.5/8").	0.0067	hr	325.50	2.18
-Camión volteo 20 ton 21 kms subsecuentes.	0.1020	hr	325.50	33.20
-Camión volteo 20 ton 1er. km (polvo p/concreto).	0.0065	hr	325.50	2.11
-Camión volteo 20 ton 21 kms subsecuentes.	0.1000	hr	325.50	32.55
-Cargador frontal cat. 966.	0.0143	hr	328.48	4.70
-Planta dosif. y mezcladora mca. "aram" mod. asr 250 A.	0.0030	hr	2223.56	6.67
-Camión volteo 20 ton 1er. km (mezcla).	0.0150	hr	325.50	4.88
-Pavimentadora de concreto mca. "abg" mod. titán 511	0.0030	hr	1405.77	4.21
-Compactador vibroplus dynapac CA-25	0.0050	hr	414.10	2.07
-Compactador neumático	0.0050	hr	262.41	1.31
-Pipa de agua 8,000 lts	0.0100	hr	212.63	2.12
-Cortadora	0.0300	hr	73.29	2.20
Cargo equipo:				\$98.22

Costo directo: \$ 820.80

20 % costo indirecto: 164.16

Subtotal: 984.96

10 % Utilidad: 98.50

Subtotal: 1083.47

0.50 % Secodam: 5.42

Precio Unitario = \$ 1088.88

II.3 Ejemplo de cálculo de costos de financiamiento de pavimento rígido (CCR) construido con equipo integrado con tecnología de punta.

Según tabla 5.8:

Pavimento de CCR construido con equipo integrado, a costo de Enero de 2003.

Costo de mantenimiento para una sola vez en el periodo de 30 años, considerando una tasa de interés de 6.5 % anual:

Costo de construcción = \$ 3'048,861.10/km.

Costo de mantenimiento: \$ 2'648,700.60/km.

$$A_{30} = 2'648,700.60 \times 0.065 / (1+0.065)^{30} - 1) = \$ 30,665.18 / \text{km}$$

luego:

$$= \$ 30,665.18 / 0.065 = \$ 471,771.97$$

Entonces, el costo total erogado será:

$$C_f = \$3'048,861.10 + \$ 471,771.97 = \$ 3'520,663.07$$

II.4 Análisis de resultados.

De la información contenida en las tablas se desprende lo siguiente:

- 1) El costo de la base y sub-base para el caso del CCR, construido utilizando equipo tradicional, resulta ser de mucho mayor costo que la base asfáltica estabilizada con cemento Portland al 5%, esto debido a su economía y bajo costo de mantenimiento.
- 2) Pero el costo total del pavimento de CCR, construido utilizando equipo integrado, sigue siendo mucho más económico en comparación con el CCR tradicional.
- 3) El costo total del pavimento del CCR utilizando equipo integrado tiende a reducirse aún más, conforme la mezcla adquiere mayor resistencia.
- 4) Con respecto al pavimento flexible de concreto asfáltico su reducción es excesiva, siendo este costo de aproximadamente un 40% menor.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- 1.- Saad, Miguel. Tratado de construcción vol. 1 (de. CECSA, México, 1964. 3a reimp. Págs. 204- 205, 207, 226.
- 2.- Norma Mexicana NMX-C – 414 - ONNCCE – 1999. "Industria de la Construcción – Cementos Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Prueba". Publicada en el Diario Oficial de la Federación el día 6 de Julio de 1999.
- 3.- Herubin, Charles A. Basic Construcción Materials. Reston Publishing Company inc., Virginia, U.S.A. , 1977. Págs. 166- 157.
- 4.- Apuntes de Construcción I Facultad de Ingeniería de la UNAM.
- 5.- P. Kumar, Mehta. Concrete Structure, Properties and Materials, Prentice- Hall Inc. USA 1986. Págs. 347- 404.
- 6.- Gómez Domínguez, Jorge. Construcción de caminos de bajo volumen con CCR. Concreto Compactado con Rodillos. Curso IMCYC. Octubre, 1988. Págs. 23-28.
- 7.- Treviño S. , José. Construcción y Tecnología. IMCYC. Octubre, 1988.
- 8.- Hansen, Kenneth D. Roller- Compacted Concrete Dams. Ed. Mc Graw-Hill. Págs. 1-28, 47-63.
- 9.- Corro, Santiago. Estudio del concreto compactado con rodillo, para su aplicación en carreteras. Primera y Segunda partes. SCT- Instituto de Ingeniería, UNAM. México, Noviembre, 1991 Págs. 65-74.
- 10.- Pittman, White. Concreto Compactado con Rodillo. Curso IMCYC. Octubre, 1988. Págs. 44 -46.
- 11.- Nieto Juan José A. La Tecnología del Concreto Compactado con Rodillos. Construcción y Tecnología. Octubre, 1988. Pág. 15.
- 12.- Structural Design of Roller- Compacted Concrete for Industrial Pavements. Concreto Compactado con Rodillo. Curso IMCYC. Octubre, 1988. Págs. 57-58
- 13.- Hansen, Kenneth, D. Roller Compacted Concrete for Dams. Mc Graw-Hill , USA, Págs. 14- 30.
- 14.- Waddell, Joseph J. Concrete Construction Handbook. Mc Graw- Hill, USA, 1974. Págs. 1-23.
- 15.- Tarquin, Anthony. Ingeniería Económica. Ed. Mc Graw- Hill, México, 1989. 2a Edic. Págs. 121- 130.

- 16.- Figueroa Gallo, Donato. Carreteras de CCR. La mejor solución. Construcción y Tecnología. IMCYC. Octubre, 1989. Págs. 8-9.
- 17.- Nieto R., Juan José A. La Tecnología del CCR. Construcción y Tecnología. IMCYC. Octubre, 1988. Págs. 45-46.
- 18.- Gómez Domínguez, Jorge. Diseño de Pavimentos Rígidos. Construcción y Tecnología. IMCYC. Abril, 1991. Págs. 29-34.
- 19.- Structural design of roller- compacted concrete for industrial pavements. Concrete Information. Portland Cement Association (PCA), USA, 1987 Págs. 30-31.
- 20.- Tayabji, Shiraz Dr. Diseño de Espesores de Pavimentos de Concreto Compactado con Rodillos. Artículo del mes. Centro de Documentación Técnica. Dirección General de Servicios Técnicos. S.C.T., México, Agosto, 1991. Págs. 16-21, 23-31.
- 21.- Gómez Domínguez, Jorge. Pavimentos de concreto sobre asfalto. Construcción y Tecnología, febrero 1992. Págs. 16-17.
- 22.- Construcción de sub- base y base rígidas con concreto hidráulico en camino de acceso al proyecto hidroeléctrico Aguamilpa. Comisión Federal de Electricidad, Tepic, Nayarit, 1991.
- 23.- Norma ASTM C-1176 "Práctica Estándar para hacer Concreto Compactado con Rodillo en Moldes Cilíndricos Usando una Mesa Vibratoria" (Reaprobada en 1998).