



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**LA UTILIZACIÓN DE PAVIMENTOS DE CONCRETO RODILLADO (PCR)
PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CALLES Y CARRETERAS EN GUATEMALA**

EDGAR ROLANDO RÍOS GALLARDO
ASESORADO POR EL ING. JACK DOUGLAS IBARRA S.

Guatemala, marzo de 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

LA UTILIZACIÓN DE PAVIMENTOS DE CONCRETO RODILLADO (PCR)
PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CALLES Y CARRETERAS EN GUATEMALA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

EDGAR ROLANDO RIOS GALLARDO

ASESORADO POR EL ING. JACK DOUGLAS IBARRA S.

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

Guatemala, marzo de 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	ING. SYDNEY ALEXANDER SAMUELS MILSON
VOCAL I	ING. MURPHY OLYMPO PAIZ RECINOS
VOCAL II	LIC. AMAHÁN SÁNCHEZ ALVAREZ
VOCAL III	ING. JULIO DAVID GALICIA CELADA
VOCAL IV	BR. KENNETH ISSUR ESTRADA RUIZ
VOCAL V	BR. ELISA YAZMINDA VIDES LEIVA
SECRETARIO	ING. PEDRO ANTONIO AGUILAR POLANCO

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENRAL PRIVADO

DECANO	ING. SYDNEY ALEXANDER SAMUELS MILSON
EXAMINADOR	ING. JOSÉ GABRIEL ORDÓÑEZ MORALES
EXAMINADORA	ING. CARMEN MARINA MÉRIDA ALVA
EXAMINADOR	ING. CÉSAR AUGUSTO CASTILLO MORALES
SECRETARIO	ING. PEDRO ANTONIO AGUILAR POLANCO

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

LA UTILIZACIÓN DE PAVIMENTOS DE CONCRETO RODILLADO (PCR)
PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CALLES Y CARRETERAS EN GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil con fecha 03 de noviembre del 2003.

Edgar Rolando Rios Gallardo

ACTO QUE DEDICO

- 1 Dios nuestro padre eterno, por la sabiduría que me otorgo para poder realizar este trabajo.
- 2 Mis padres, Edgar Rolando y Aracely, gracias a ellos, y por los cuidados y vida, que hacen que hoy este aquí.
- 3 Mis hermanos, Wendy, Paola y Werner, que me apoyaron y confiaron en mí.

AGRADECIMIENTOS

- 1 Al ingeniero, Jack Douglas Ibarra, por su valiosa asesoría en la elaboración de este trabajo.
- 2 A los ingenieros Carlos Alfredo Mendoza G. y Ricardo Francisco Pérez S. Por sus buenos consejos y compartir sus conocimientos.
- 3 A mis amigos Carlos Aldana, Jorge González, Carlos Pinto, por su amistad, y el grupo que formamos en las aulas de esta Alma Mater.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXI
1. HISTORIA DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO RODILLADO.....	1
1.1. Definición y origen.....	1
1.2. Usos y aplicaciones en construcción de carreteras.....	2
2. PROPIEDADES Y REQUERIMIENTOS DE LOS MATERIALES A SER UTILIZADOS.....	5
2.1. Propiedades de los agregados.....	5
2.1.1. Agregado grueso.....	8
2.1.2. Agregado fino.....	9
2.2. Propiedades del cemento.....	9
2.2.1. Resistencia necesaria.....	11
2.3. Agua.....	11
3. DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO RODILLADO.....	13
3.1. Definición.....	13
3.2. Diseño según cargas de servicio.....	19
3.2.1. Cargas longitudinales.....	20
3.2.2. Cargas transversales.....	20

3.2.3.	Otros tipos de cargas a tomar en cuenta. . . . .	.20
3.3.	Dosificación según las propiedades de los materiales. . . . .	.21
3.3.1.	Porcentajes de agregado grueso. . . . .	.21
3.3.2.	Porcentajes de agregado fino. . . . .	.21
3.3.3.	Porcentajes de cemento. . . . .	.22
3.3.4.	Relación agua/cemento. . . . .	.23
3.4.	Mezclas utilizando cal. . . . .	.23
3.5.	Mezclas utilizando cenizas o puzolanas. . . . .	.23
4.	PREPARACIÓN DE LOS SUELOS PREVIO A PAVIMENTAR. . . . .	.25
4.1.	Estabilización de la sub-rasante. . . . .	.25
4.2.	Estabilización de la sub-base. . . . .	.25
4.3.	Estabilización de la base. . . . .	.26
4.4.	Estabilización utilizando suelo-cemento. . . . .	.26
4.5.	Preparación de la rasante. . . . .	.27
4.5.1.	Rasantes de pavimentos flexibles. . . . .	.27
4.5.2.	Rasantes de pavimentos rígidos . . . . .	.28
4.6.	Uso de riegos de imprimación. . . . .	.28
4.6.1.	Tipos de asfaltos que se pueden utilizar previo a pavimentar. . . . .	.29
5.	PROPIEDADES DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO RODILLADO. . . . .	.33
5.1.	Resistencia a la compresión. . . . .	.34
5.2.	Módulo de rotura. . . . .	.35
5.3.	Resistencia a la fatiga. . . . .	.36
5.4.	Propiedades elásticas. . . . .	.36
5.5.	Retracción. . . . .	.37

6.	PAVIMENTACIÓN CON CONCRETO RODILLADO.	39
6.1.	Plantas de mezclado.	39
6.1.1.	Diferentes tipos de plantas de mezclado.	40
6.2.	Pruebas que se le realizan a la mezcla.	44
6.2.1.	Proctor modificado.	45
6.2.2.	Consistómetro VeBe.	45
6.2.3.	Revenimiento.	45
6.2.4.	Determinación de humedad.	46
6.3.	Transporte de la mezcla.	48
6.3.1.	Tipos de transporte.	49
6.3.2.	Tiempos de llegada al lugar a pavimentar.	50
7.	METODOLOGÍA DE PAVIMENTACIÓN.	51
7.1.	Colocación de la mezcla.	51
7.1.1.	Diferentes métodos de colocación.	51
7.1.2.	Maquinaria a utilizar para el tendido de la mezcla.	52
7.1.3.	Recomendaciones para el tendido de la mezcla.	55
7.2.	Vibrado de la mezcla colocada.	55
7.2.1.	Métodos para el vibrado.	56
7.2.2.	Maquinaria que se puede usar para el vibrado de la mezcla.	56
7.3.	Compactación.	57
7.3.1.	Métodos para la compactación de la mezcla colocada.	58
7.3.2.	Equipos para compactación de la mezcla colocada.	58
7.4.	Juntas.	63
7.4.1.	Juntas transversales.	63
7.4.2.	Juntas longitudinales.	63

7.4.3.	Juntas frías.	66
7.4.4.	Otras.	69
7.5.	Curado de la mezcla colocada.	70
7.5.1.	Aplicación de agua pulverizada.	70
7.5.2.	Riegos de agua periódicos.	71
7.5.3.	Aditivos que se pueden emplear para curado.. .	71
CONCLUSIONES.		73
RECOMENDACIONES.		74
BIBLIOGRAFÍA.		75
ANEXO 1.		76
ANEXO 2.		85

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Gráfica relación entre la densidad y el contenido de humedad del concreto compactado con rodillo	15
2	Gráfica relación entre la resistencia a la flexión y la densidad del concreto compactado con rodillo	16
3	Gráfica curva típica del ensayo de compactación para diferentes relaciones entre agregados	18
4	Fotografía de preparación de la base utilizando moto niveladora	31
5	Gráfica Ley de Abrams	34
6	Gráfica de correlación entre el módulo de rotura a veintiocho días y el ensayo de tracción indirecta a siete días	35
7	Gráfica de comportamiento del concreto compactado con rodillo ante la fatiga	36
8	Gráfica de influencia de la relación agua/cemento y el contenido de agregado en la contracción	38
9	Fotografía de planta de concreto	43
10	Fotografía control de calidad, chequeo de compactación por método no destructivo, usando sonda radioactiva	47
11	Fotografía del uso de camiones de volteo para la transportación de la mezcla de concreto	49
12	Fotografía de colocación de la mezcla de concreto usando terminadora	54

13	Fotografía del proceso de colocación y vibrado de la mezcla de concreto por medio de la máquina terminadora	57
14	Esquema de rodo vibratorio de tambores lisos tipo <i>tándem</i> para acomodamiento del concreto y vibrado de la mezcla	59
15	Esquema de rodo neumático, con serie de llantas lisas que permiten el sellado de la mezcla ya vibrada y compactada	60
16	Fotografía del proceso de compactación usando un rodo doble tipo <i>tándem</i>	62
17	Esquema que indica que la compactación se debe hacer hasta 30 centímetros del borde dando dos pasadas con el rodillo	64
18	Esquema donde el rodillo debe compactar la junta fresca dando dos pasadas y de igual manera no compactar de 30 a 45 centímetros del borde	65
19	Esquema donde se repite la secuencia con la otra franja o media sección	65
20	Esquema de compactación del borde en la ultima franja o sección	66
21	Esquema del corte del borde del pavimento de concreto rodillado, usando la cuchilla de una motoniveladora	67
22	Esquema del traslape del pavimento de mezcla endurecida y de mezcla fresca en la cual se debe humedecer el borde y colocar	67
23	Esquema del uso de arrastres para mejor acabado en las juntas	68
24	Esquema de compactación de junta de concreto fresco con concreto endurecido haciendo dos pasadas de rodo estático	68
25	Fotografía del curado del pavimento de concreto rodillado usando riegos de emulsión	71
26	Esquema de un consistómetro VeBe	83

TABLAS

I	Límites granulométricos para mezclas de concreto según prescripción española	7
II	Límites granulométricos para mezclas de concreto según prescripción cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos	8
III	Influencia del contenido de cemento con adiciones en la resistencia a tracción indirecta y su evolución con la edad.	10
IV	Rangos aproximados de la presencia del cemento, los agregados y el agua en el concreto compactado con rodillo	17
V	Temperatura de aplicación para diferentes tipos de asfaltos líquidos	30
VI	Número de pasadas en la primera etapa y espesores máximos para diferentes equipos	61
VII	Concentración de pasta para resistencia y tamaño de agregado en mezclas de concreto hidráulico	85
VIII	Cantidad de agua según asentamiento para resistencia y tamaño de agregado en mezclas de concreto hidráulico	86
IX	Porcentaje de agregado fino según módulo de finura para resistencia y tamaño de agregado en mezclas de concreto hidráulico	87
X	Porcentaje de aire en la mezcla para la resistencia y tamaño de agregado en mezclas de concreto hidráulico	88

LISTA DE SÍMBOLOS

A/C	=	Relación agua/cemento, en peso
cm	=	Centímetro
D	=	Diámetro
Kg.	=	Kilogramo
Kgf.	=	Kilogramo – Fuerza
kN	=	Kilonewton
Kg/m ³	=	Kilogramo / metro cúbico
m	=	Metro
mm	=	Milímetro
P	=	Carga aplicada
Plg.	=	Pulgada
PU	=	Peso unitario del concreto fresco; se da en Kg/m ³
seg.	=	Segundo
VeBe	=	Tiempo VeBe o medida de consistencia; se da en segundos

GLOSARIO

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials.</i>
Absorción	Capacidad de los materiales inertes que componen el concreto, para fijar cierto número de moléculas de agua en la superficie de sus partículas.
ACI	<i>American Concrete Institute.</i>
Análisis granulométrico	Es la determinación de la graduación del tamaño de las partículas de un agregado. Se realiza haciendo pasar por varios tamices de diferente tamaño de abertura, una determinada cantidad de material y luego, determinando los porcentajes de material retenido en cada tamiz.
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials.</i>
Áridos	Otro de los nombres con que se denomina a los agregados para el concreto.

Banco	Depósito relativamente grande de material de construcción en su forma natural.
Cemento <i>Portland</i>	Tipo I PM es un cemento hidráulico que consiste en una mezcla íntima y uniforme de cemento <i>Portland</i> y puzolana fina, dosificados en tal forma que los componentes puzolánicos no exceden el 15 por ciento de la masa total del cemento <i>Portland</i> modificado con puzolana.
Compactación	El proceso de compactación del concreto consiste esencialmente en la eliminación del aire atrapado para formar una masa compacta, ya sea por apisonado o por vibración.
Compresión simple	Estado de una pieza o muestra sometida a ensayo consistente en dos cargas opuestas que producen un esfuerzo axial de compresión.
Cono de Abrahms	Dispositivo que se utiliza en el ensayo de asentamiento de mezclas de concreto.
Consistencia	Es la habilidad que tiene el concreto para fluir.

Consistencia seca	Consistencia de un concreto que ensayado en el cono de Abrahms se obtiene un asentamiento menos que 1 pulgada (ACI 211. 3 – 75).
Curado	Es el nombre que se le da a los procesos para promover la hidratación del cemento y consiste en controlar la temperatura y los movimientos de humedad hacia dentro y afuera del concreto.
Encofrado	Recipiente de madera, metálico o de otro material, destinado a servir de molde, para la fabricación de un elemento de concreto mortero o similar.
Ensayos normalizados	Son las pruebas realizadas en el laboratorio a los materiales de construcción que en este caso están reguladas por una institución que goza de prestigio y confiabilidad de la generalidad.
Espécimen de prueba	Se llama así a las probetas representativas de un material sujeto de ensayo.
Flexión	Sistema combinado de esfuerzos de compresión, tensión y corte a que se somete un elemento estructural y que produce pandeo o deflexión en el mismo.
Fraguado	Es la acción de endurecimiento progresivo tanto del concreto como de las mezclas de cal y yeso.

Material inerte	En construcción, es todo material que no reacciona químicamente con el cemento o el agua de mezclado.
Mortero	Es la mezcla de un agregado fino, agua y uno o varios materiales aglomerantes tales como la cal y el cemento.
Normas	Es el conjunto de disposiciones que regula las pruebas y ensayos de los materiales y que son de un reconocimiento general.
PCR	Pavimento de Concreto Rodillado
Peso Específico	Es el peso de la cantidad de masa que ocupa un cuerpo en un centímetro cúbico de material.
Probeta	Nombre que se le da a la muestra de material, preparada especialmente para la determinación de las propiedades mecánicas o características físicas de interés.

Puzolana	Material silicoso o silicoaluminoso que no siendo cemento por sí mismo o siéndolo en muy baja proporción, en forma finamente dividida reacciona químicamente con la cal hidratada en presencia de agua y temperaturas ordinarias, formando compuestos que poseen propiedades propias del cemento.
Relación A/C	Es el cociente de dividir el peso del agua entre el peso del cemento, que integra una mezcla de concreto dada.
Tamiz	Es una malla, generalmente, de metal de abertura uniforme que sirve para la clasificación de agregados o suelos, haciendo que éstos pasen a través de dicha malla.
Trabajabilidad	La acepción general, dentro de la terminología del concreto, se refiere al conjunto de propiedades del concreto, que permiten manejarlo sin que se produzca segregación, colocarlos en los moldes y compactarlo, adecuadamente.
Viga	Pieza o elemento sobre dos o más apoyos, destinado a trabajar, principalmente, en flexión.

RESUMEN

Los Pavimentos de Concreto Rodillado (PCR) son un sistema aparentemente nuevo para quienes escuchan su nombre por primera vez, pero hay que tomar en cuenta que esta es una técnica que viene utilizándose desde años atrás por países con grandes proyectos en los que corresponde a construcciones de carreteras y que mantienen una constante investigación de este sistema.

En esta investigación se reunieron las partes más elementales del método constructivo con este tipo de pavimentos, dando a conocer los procedimientos del diseño de mezclas, tomando en cuenta la experiencia de otros proyectos en Latinoamérica, como la preparación de los materiales a utilizar, la preparación del suelo que se desea pavimentar. Ilustrando los métodos de control de calidad, fabricación, transporte, colocación, curado y terminado de este tipo de mezclas de concreto que van a ser utilizados para la pavimentación de calles y carreteras de nuestro país.

El incursionar en nuevos sistemas constructivos para carreteras en Guatemala, ha generado que se busquen las formas y guías para la construcción. Aquí se muestran también de una manera sencilla como construir pavimentos de concreto rodillado, dando a conocer los alcances y limitaciones que se pueden presentar al iniciar un proyecto con este tipo de pavimentos.

OBJETIVOS

- **Generales**

1. Exponer el conocimiento del sistema de pavimentación utilizando concreto compactado con rodillo.
2. Mostrar las características de las mezclas de concreto para la pavimentación convencional y las utilizadas para compactar con rodillo.
3. Determinar la metodología de pavimentación, tipos de plantas y maquinaria para este sistema constructivo.

- **Específicos**

1. Implementar el sistema constructivo de Pavimentos de Concreto Rodillado (PCR) en calles y carreteras de la república de Guatemala.
2. Determinar la durabilidad y la funcionalidad de los Pavimentos de Concreto Rodillado (PCR), además de cálculos de vida útil de un proyecto de pavimentación en un tramo carretero usando este método.

3. Crear interés a empresas que se encuentren dentro de la construcción de carreteras a iniciarse o incursionar en un nuevo método de pavimentación de calles y carreteras de prueba y ver las diferencias en la construcción con métodos tradicionales.

4. Dar a conocer este tipo de pavimento su comportamiento, sus propiedades y sus ventajas dentro del pónsum de estudios de la Escuela de Ingeniería Civil, el cual podrá ser el curso de pavimentos así los estudiantes podrán tener un contacto más directo con este tipo de pavimentos y al mismo tiempo se fomentará un interés en este sistema.

INTRODUCCION

La necesidad de construcción de carreteras en Guatemala cada día se hace más relevante, para poder comunicar a todas las poblaciones del país, lo cual refleja el desarrollo de toda la nación. Se conocen como métodos tradicionales, la construcción de carreteras utilizando comúnmente pavimentos flexibles de asfalto, que no es más que derivados del petróleo mezclados con materiales pétreos. Este sistema que se ha venido utilizando desde hace muchos años atrás ha sido en algunos casos sustituido por los pavimentos rígidos, como los construidos por concretos hidráulicos de fraguado rápido, mientras que las mezclas en caliente que pertenecen a los pavimentos flexibles son de fraguado más lento.

Tomando como base el proyecto anteriormente mencionado se pretende implementar este sistema constructivo a nuestro país, proporcionando así dentro del trabajo de investigación los procedimientos, normas, especificaciones y controles para que se tome en cuenta este método al momento de construir un tramo carretero en Guatemala.

La investigación presenta una parte teórica de conceptos y definiciones de los pavimentos de concreto rodillado así como diseños, control de calidad y metodología para construcción de carreteras.

El Concreto Compactado con Rodillo o (CCR) es un método constructivo que está siendo aplicado en diversos países de Europa y Latinoamérica desde ya hace algunos años atrás, dando resultados favorables en la construcción de obras civiles tales como hidroeléctricas, represas o embalses y carreteras.

Este método es un sistema nuevo para nuestro medio, se plantea la construcción de calles y carreteras de Guatemala usando concreto compactado con rodillo, como un pavimento rígido, evaluando así el periodo de vida útil y el análisis de métodos constructivos en comparación a un pavimento flexible.

En el año de 1976 se inició el trabajo con este método, y a través de los años se ha ido tecnificando, en los métodos y la construcción se han mostrado mejoras para la construcción de carreteras, razón por la cual será necesario evaluar y continuar con la investigación de la resistencia al ser aplicadas cargas de tráfico en las condiciones reales. Se invita a programar la construcción de una calle o tramo carretero para principiar un nuevo plan vial en el que se pueda aplicar esta técnica.

Lo que se pretende con este trabajo de tesis es demostrar la importancia de la construcción de carreteras de pavimento de concreto rodillado (PCR) y plantear una metodología de construcción a partir de una comparación con el método tradicional de pavimentos flexibles, hacer un análisis de las propiedades en el cual se denoten las diferencias en lo que implica los métodos de construcción tradicionales, para la construcción de calles y carreteras en nuestro país.

1. HISTORIA DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO RODILLADO

1.1. Definición y origen

Este es un sistema basado en dos principios fundamentales de la construcción de carreteras: la estabilización de las bases granulares con la aplicación de cemento Portland, y la resistencia y durabilidad de la pavimentación con concreto convencional, la unificación de estos dos métodos crea el sistema que a partir de 1976 se conoció como concreto compactado con rodillo, el cual ofrece lo mejor de ambos, la pavimentación con concreto rodillado presenta las ventajas de ser una mezcla seca, con baja cantidad de cemento, pero que requiere de un control de graduación de los materiales granulares y que éstos sean de buena calidad.

No requiere de uso de formaletas para su colocación, ya que la trabajabilidad de la mezcla permite que se omita este sistema como se hace en el concreto convencional. Este tipo de pavimentos precedió a la construcción de presas y otros tipos de construcciones civiles, en países europeos, Estados Unidos y Japón.

En América, la primera experiencia de pavimentación con este método fue en Caycuse, Vancouver (Canadá) en 1976, para patios terminales de áreas de taxis en aeropuertos.

Los pavimentos de concreto compactado con rodillo, es un material que se consolida, por vibración externa utilizando rodillos vibratorios y difiere del concreto clásico, principalmente por su apariencia y consistencia inicial.

Para su consolidación efectiva debe ser lo suficientemente seco como para soportar el peso del equipo vibratorio, pero a la vez con su humedad adecuada para permitir la correcta distribución de la pasta cementante en toda la masa durante las etapas de mezcla y vibración.

El esfuerzo vibratorio requerido para consolidar plenamente a la máxima densidad alcanzable a estos materiales es mucho mayor que el requerido para las mezclas de concreto clásicas, y si bien en una mayor proporción de agua, en la dosificación de la mezcla disminuirá significativamente el esfuerzo de vibración para una consolidación efectiva, simultáneamente podríamos incrementar la falta de rigidez necesaria para soportar el peso del rodillo vibratorio y afectar la resistencia final del material.

1.2. Usos y aplicaciones en construcción de carreteras

Muchas y muy variadas soluciones, se han generado en los últimos años con relación al diseño de pavimentos rígidos, como en lo referente a las técnicas de rehabilitación, especialmente en aquellos países donde el pavimento de concreto tiene un uso común no sólo en carreteras, sino en áreas urbanas.

Uno de los usos más importantes del concreto compactado con rodillo es, para la estabilización de bases y construcción de calles y carreteras, por su durabilidad y resistencia a la fatiga, así como la capacidad de soportar cargas producidas por el tráfico vehicular.

Tal es el caso de los proyectos de pavimentación en diversos países, donde el pavimento era sujeto a tráfico vehicular ligero, ubicados en caminos rurales y zonas urbanas, las primeras experiencias en el uso de estos pavimentos fue en Barcelona en los años setenta.

Desde esta década hasta ahora se han escrito un buen número de artículos acerca del uso y diseño de pavimentos rígidos, con base en la teoría del elemento finito. En esta teoría se sigue considerando las losas de concreto como elementos finitos, como homogéneas atrópicas y elásticas en sus propiedades, asumiendo que la subrasante de apoyo se comporta como un líquido denso.

El objetivo de este método es resolver una serie de ecuaciones que se plantean en las cuales se relacionan los desplazamientos, nodales desconocidos de cada elemento finito del pavimento y las relaciones fuerza – desplazamiento, para todos los nodos en el sistema propuesto.

2. PROPIEDADES Y REQUERIMIENTOS DE LOS MATERIALES A SER UTILIZADOS

2.1. Propiedades de los agregados

Parte importante en la preparación del concreto depende de la selección y la buena calidad de los agregados; que éstos posean la humedad, peso unitario y graduación necesarias para que la mezcla sea uniforme y dé resultados aceptables, ya que éstos constituyen del 70 al 80% del volumen de la mezcla, los agregados triturados deben estar libres de impurezas, para que no afecte la absorción del agua en la relación agua–cemento de la cual depende la resistencia del concreto.

Las características pueden identificarse con las adoptadas normalmente para el agregado grueso y el agregado fino tratadas con ligantes hidráulicos, utilizadas en capas de base para iguales condiciones de tráfico.

En otros países como España se recomienda que el tamaño máximo del agregado grueso sea de 20 mm aun cuando en otras partes se haya usado agregado con un tamaño de hasta 38 mm. Sin presentar mayores problemas.

Es preciso mencionar que el uso en agregados de tamaños relativamente grandes, se puede correr el riesgo de que exista segregación, lo que es importante evitar en las mezclas de PCR.

Para ello, los diseños tomando en cuenta los agregados que se poseen, muestra una curva homogénea al momento de realizar la granulometría en laboratorio, de ello depende la cantidad de agregados gruesos y que el tamaño de sus partículas sea el más conveniente.

En cuanto a la procedencia de los agregados, se prefieren los obtenidos por trituración a los extraídos en explotaciones aluviales, debido a su menor tendencia a segregarse, aun cuando son más difíciles de compactar. Se recomienda que al menos $2/3$ partes del volumen de agregados sean triturados mecánicamente para lograr una capacidad de soporte alta, suficiente para que los equipos de compactación inicien su labor e inmediatamente se descargue el concreto en el piso. Esta capacidad portante se puede evaluar sometiendo probetas, cuya densidad sea como mínimo el 97% del ensayo Proctor, al ensayo del CBR sin sobrecarga ni saturar; el resultado debe ser superior a 65%.

La granulometría de los agregados debe ser continua, estable, densa y tal que dé unidad al cemento, presente en una cantidad de finos suficientes para lograr una buena compactación. Las granulometrías recomendadas en el pliego de prescripciones técnicas Españolas, se indican en la tabla I y por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, se indican en la tabla II. Para lograr una curva granulométrica ajustada a las condiciones de cada proyecto, se recomienda almacenar los agregados en dos pilas, separadas por el tamaño 5.00 mm.

Tabla I **Límites granulométricos para mezclas de concreto según prescripción española**

Prescripción Española		
Tamiz	Porcentaje que pasa	
25 mm		100
20 mm	100	85 - 100
16 mm	88 - 100	75 - 100
10 mm	70 - 87	60 - 83
5 mm	50 - 70	42 - 63
2 mm	35 - 50	30 - 47
0.4 mm	18 - 30	16 - 27
0.08 mm	10 - 20	9 - 19

Fuente: **Instituto Colombiano de Productores de Cemento.** Notas técnicas. Pág. 3

Tabla II **Límites granulométricos para mezclas de concreto según prescripción Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos**

Cuerpo de Ingenieros	
Tamiz	Porcentaje que pasa
25.4 mm	100
19.1 mm	83 - 100
12.7 mm	72 - 93
9.5 mm	66 - 85
4.76 mm	51 - 69
2.38 mm	38 - 56
1.19 mm	28 - 46
0.595 mm	18 - 36
0.297 mm	11 - 27
0.149 mm	8 - 20

Fuente: **Instituto Colombiano de Productores de Cemento.** Notas técnicas. Pág. 3

2.1.1. Agregado grueso

Éste depende del espesor de la capa de concreto a colocar. El tamaño máximo que se usa para las mezclas de concreto es de 1" y debe estar bien graduado para que exista una uniformidad en sus partículas, y además, que éstas puedan ser acomodadas y compactadas sin necesidad de excesivo uso de energía de compactación para reducir el porcentaje de vacíos.

Es conveniente el uso de piedra triturada para conseguir una capacidad de soporte inmediata, lo suficientemente alta para poder abrir el tráfico, en cuanto se terminen las operaciones de curado y protección.

2.1.2. Agregado fino

Deberá ser limpio, sin contenidos de material orgánico, además de poseer la humedad, el peso unitario y módulo de finura, así pueda llenar todos los espacios y vacíos de la mezcla al momento de ésta ser compactada, que el material que pasa el tamiz No. 200 no sea significativo o mayor del 10% ya que un incremento de este material permitiría que la absorción del agua en la elaboración de la mezcla.

La pasta formada en la mezcla del cemento con el agregado fino que en la mayoría de los casos son las arenas, debe ser controlada por la cantidad de limos y polvo de roca que como se mencionó con anterioridad pasan el tamiz número 200, la finura afecta en el rápido endurecimiento de este tipo de mezcla que se caracterizan por su bajo contenido de agua. Para este control se debe tener resultados granulométricos de este tipo de agregado, para conocer su finura y de preferencia que no exista material arcilloso en la mezcla.

2.2. Propiedades del cemento

El cemento a utilizar debe cumplir con los requerimientos de buena calidad y de preferencia que sea Portland para su mezclado. El tipo de resistencia se deberá a lo que se pueda, según las cargas que vaya a soportar el concreto y los espesores de pista que se requieran. Los cementos tipo I o tipo II son adecuados para producir concreto compactado con rodillo.

Por razones técnicas y económicas cada día se utilizan más las mezclas de cementos y cenizas volantes, llegando hasta proporciones del 50%, algunas de ellas realizadas en la obra, prefiriéndose que las mezclas sean hechas en la fábrica de cemento para garantizar la uniformidad y homogeneidad.

Tabla III **Influencia del contenido de cemento con adiciones en la resistencia a tracción indirecta y su evolución con la edad**

Contenido de cemento adicionado	Resistencia en el Ensayo Brasileiro (Kgf/cm ²)		
	a 7 días	a 28 días	a 90 días
Porcentaje en peso			
10	11.2	18.4	22.4
11	13.3	24.5	30.6
12	19.4	29.6	35.7
13	23.5	35.7	46.9
14	26.5	36.7	50.0
15	27.5	36.7	53.0

Fuente: **Instituto Colombiano de Productores de Cemento.** Notas técnicas. Pág. 4

La tabla III es un resumen de las resistencias logradas en España en un concreto compactado con rodillo con un cemento adicionado elaborado con las siguientes proporciones: 47.5% de *clínker Portland*; 2.5% de yeso y 50% de ceniza volante.

Aunque la tabla III es el resumen de una investigación particular sirve como índice de las resistencias que se pueden alcanzar usando cemento producido con adiciones.

2.2.1. Resistencia necesaria

La resistencia requerida será de acuerdo a las cargas de servicio, éstas se rigen por el tráfico promedio diario, así se determina el espesor de la capa de concreto rodillado a colocar y diseño de la mezcla de concreto, cabe mencionar que la relación agua cemento en estos diseños de mezclas de concreto es baja, ya que su apariencia es seca y la aplicación del agua se realiza al momento de compactar.

La mezcla que soportará el pavimento a utilizar se obtendrá de los cilindros de laboratorio que serán sometidos a carga axial para conocer su resistencia, para la resistencia se puede utilizar cementos de 2000 y 2500 PSI.

2.3. Agua

El agua que se utiliza en la elaboración del concreto compactado con rodillo no debe contener material orgánico, sólidos en suspensión, ni aparecer contaminada por desechos industriales; la manera de determinar si un agua específica se puede utilizar, consiste en elaborar probetas con ella y con otra de reconocida calidad, para fallarlas a compresión y si las resistencias obtenidas no varían en más del 10%, se puede aceptar la fuente de agua en estudio.

3. DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO RODILLADO

3.1 Definición

La técnica de construir Pavimentos de Concreto Rodillado (PCR) cobró fuerza a principios de los setenta, a pesar de no existir la suficiente información teórica del comportamiento de este material y mucho menos del diseño. Lo anterior arrojó como resultado una gran cantidad de secciones de pavimentos de prueba iniciativos de la inquietud por construir de forma práctica. Tomando en cuenta tales circunstancias, es quizás el trabajo desarrollado en la Universidad de Purdue uno de los primeros que considera inicialmente estudios de laboratorio, que cubren proporcionamientos de mezclas, características de resistencia al congelamiento y deshielo, fatiga y aspectos constructivos en campo.

El PCR es un concreto muy seco que se compacta en campo por medio de rodillos vibratorios (10 toneladas), con el objeto de lograr una alta densidad para relaciones de agua cemento muy bajas. En laboratorio se han reportado densidades de hasta 2560 Kg./m³.

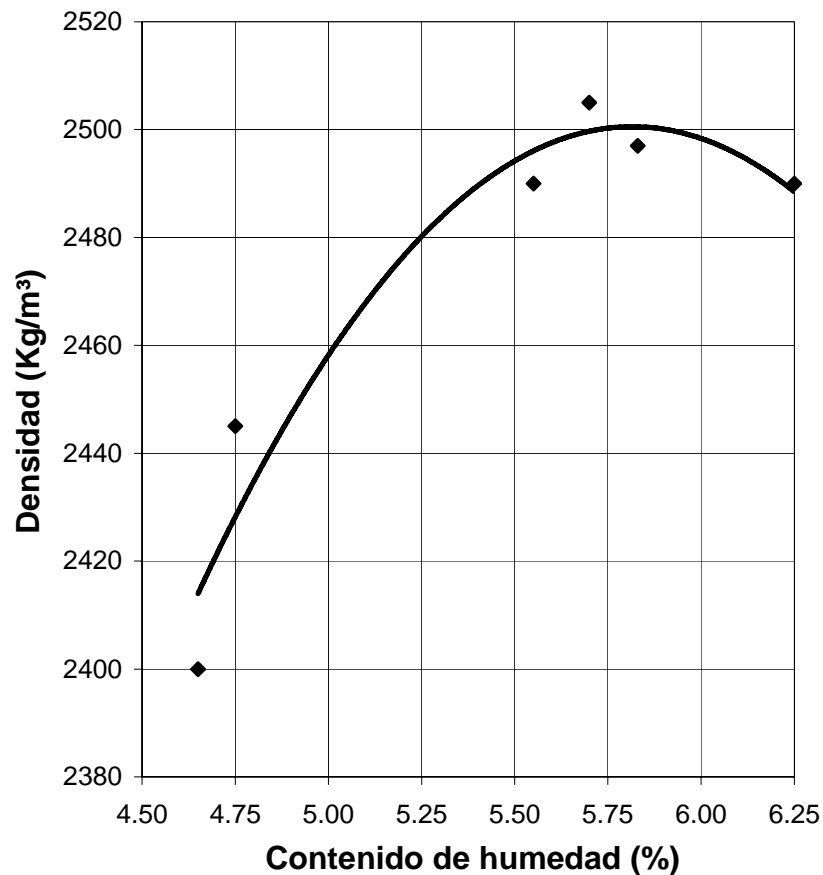
Son precisamente las características anteriores, las que permiten lograr un concreto con un ahorro significativo en el consumo de cemento. Las características elásticas del concreto compactado con rodillo corresponden a las de concretos convencionales de muy alta resistencia, y las propiedades de fatiga estudiadas, en laboratorio bajo compactación controlada señalan que el concreto compactado con rodillo puede proporcionar una vida más larga a la fatiga que el concreto convencional (igual consumo de cemento), bajo los mismos niveles de esfuerzo.

Si consideramos lo anterior y el hecho de que el concreto compactado con rodillo, puede ser colocado con equipo convencional para pavimentación asfáltica, debería pensarse que el PCR, es una buena opción para construir pavimentos carreteros.

El concreto compactado con rodillo es un concreto con bajo contenido de agua, lo cual implica que para su colocación y compactación no sea suficiente la energía que transmiten los vibradores de aguja ni las reglas vibratorias convencionales y que por lo tanto, se requiera de la que transmiten los rodillos vibratorios para la compactación de bases granulares o concreto asfálticos. Esta exigencia constructiva obliga a realizar ajustes en los métodos tradicionales de diseño de mezclas de concretos, especialmente en lo referente al contenido de agua y en la relación entre los agregados gruesos y finos, con el fin de obtener una estructura granular capaz de soportar los equipos de construcción y máxima densidad posible.

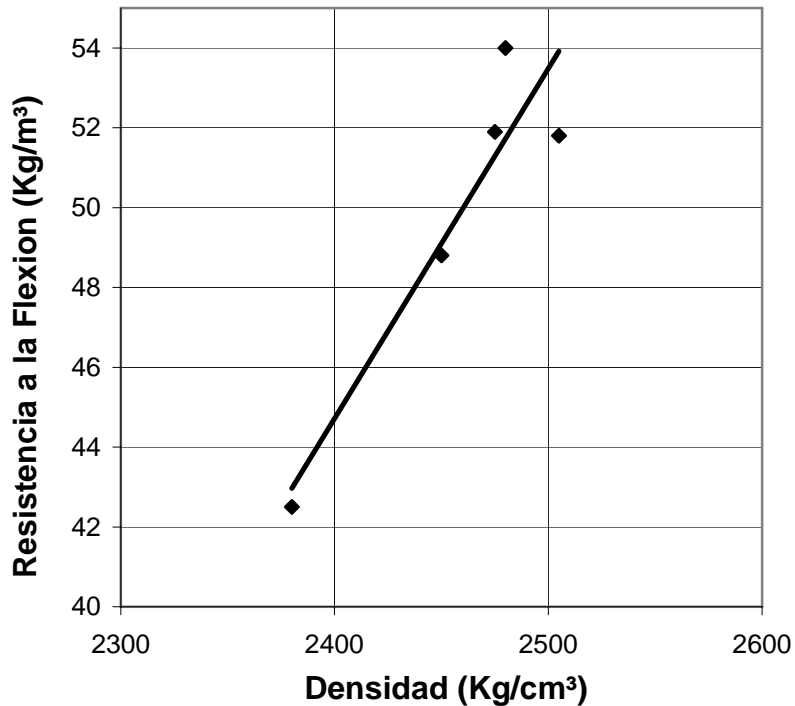
Los ajustes en el diseño de mezclas se deben orientar hacia la búsqueda del contenido de agua que permita obtener la máxima densidad, pues se ha demostrado que tal como sucede con las mezclas de suelo – cemento existe un porcentaje de humedad para el cual se obtiene la máxima densidad con una energía de compactación dada, (ver la figura 1), y además, la resistencia a la flexión aumenta linealmente con la densidad, tal como se indica en la figura 2.

Figura 1. **Relación entre la densidad y el contenido de humedad del concreto compactado con rodillo**



Fuente: **Instituto Colombiano de Productores de Cemento**. Notas técnicas. Pág. 2

Figura 2. **Relación entre la resistencia a la flexión y la densidad del concreto compactado con rodillo**



Fuente: **Instituto Colombiano de Productores de Cemento**. Notas técnicas. Pág. 2

En la figura 1 el contenido de humedad está definido como el cociente entre el peso del agua y el peso de cemento más el de los agregados saturados y superficialmente secos.

En cuanto al contenido de cemento éste fija con base en los requisitos de resistencia a alcanzar.

Debería explicarse que un diseño en el sentido estricto de la palabra no es posible. Los materiales usados son esencialmente variables y muchas de sus propiedades no pueden ser tasadas con exactitud en forma cuantitativa. Así pues, nosotros hacemos únicamente una suposición racional de las combinaciones óptimas de los ingredientes. No es sorprendente, por lo tanto, que para obtener una mezcla satisfactoria, no solamente tengamos que calcular o estimar las proporciones del material disponible, sino que debemos hacer mezclas de prueba, revisar las propiedades de esas mezclas y ajustar sus proporciones, hasta obtener una mezcla satisfactoria.

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones, los contenidos iniciales de los materiales para las mezclas de concreto compactado con rodillo están en los rangos indicados en la tabla IV.

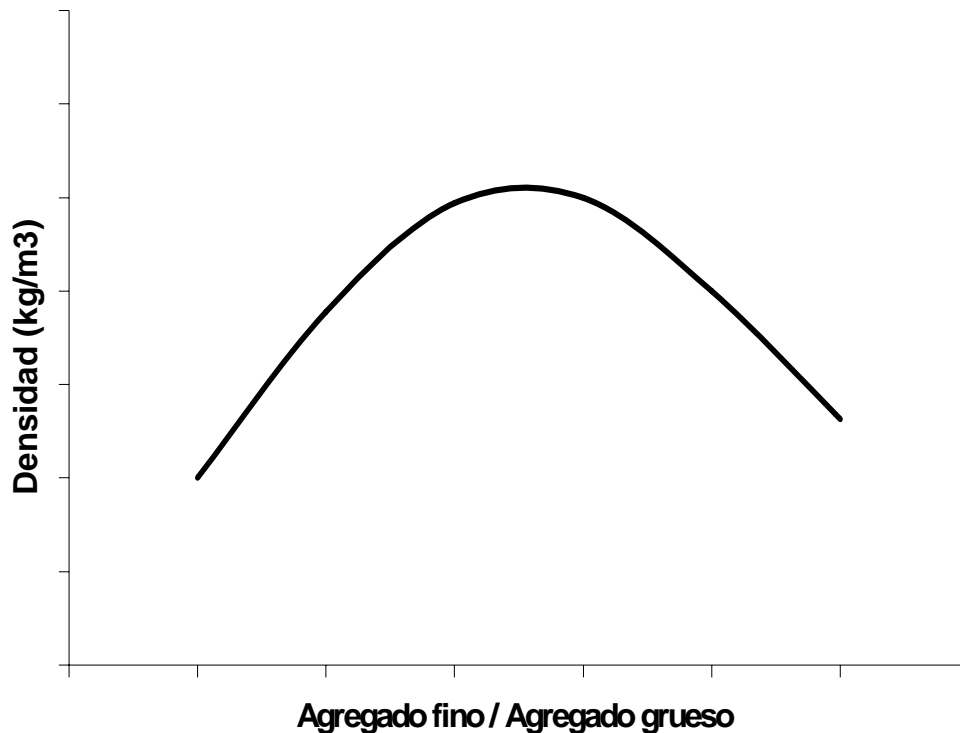
Tabla IV. **Rangos aproximados de la presencia del cemento, los agregados y el agua en el concreto compactado con rodillo**

Material	Rango en porcentaje del peso total de los materiales
Cemento	12 - 15
Agua	4 - 6
Agregado grueso	46 - 52
Agregado fino	38 - 42
Relación agua/cemento	0.30 - 0.35

Fuente: **Instituto Colombiano de Productores de Cemento**. Notas técnicas. Pág. 2

El diseño de la mezcla se inicia compactando con una energía constante, normalmente igual a la del ensayo Proctor modificado, diferentes relaciones entre los volúmenes de agregado fino y grueso, y al graficar los resultados del ensayo, se obtiene una curva similar a la que se muestra en la figura 3. Este procedimiento permite determinar la relación de agregados que se va a emplear durante la mezcla, que es aquella para la que se obtiene la máxima densidad.

Figura 3. **Curva típica del ensayo de compactación, para diferentes relaciones entre agregados**



Fuente: **Instituto Colombiano de Productores de Cemento.** Notas técnicas. Pág. 2

El contenido de agua se encuentra realizando nuevamente ensayos de humedad contra densidad, pero esta vez, con una energía de compactación similar a la que se tendrá en el campo, con la relación de agregados encontrada y variando el contenido de humedad hasta hallar la que permite obtener la máxima densidad posible.

Luego, se elaboran probetas cilíndricas con concretos producidos con los contenidos de agregados y de agua determinados como se explicó y con diferentes contenidos de cemento, para fallarlas a tracción indirecta o a compresión y así definir el contenido de cemento para el cual se alcanzan los requisitos de resistencia deseados. Hay que advertir que los resultados obtenidos con los ensayos descritos se deben entender como una aproximación a la dosificación de campo, ya que ella debe ajustarse a las condiciones específicas de trabajo, en especial en lo referente a la energía de compactación.

3.2 Diseño, según cargas de servicio

Parte fundamental del diseño de una carretera es conocer los valores de tráfico promedio diario y el valor soporte California, del suelo para la determinación de las cargas a las cuales estará sometida una carretera.

Se les conoce como las cargas de servicio, al paso de vehículos, transporte público o bien transporte de carga o comercial, a éstas las normas de la AASHTO las define por el número de ejes.

Los esfuerzos a los cuales será sometida la carretera a construir, se deben por cargas axiales producidas por los ejes de los vehículos.

3.2.1 Cargas longitudinales

Son aquellas que actúan a lo largo de toda la carretera, por el paso de los vehículos que la transitan en estos casos se puede hacer mención de las cargas de impacto y las de frenado.

El tráfico de los vehículos genera fricción sobre la superficie de rodadura, además de la fricción se generan vibraciones por el peso de los vehículos y éste aumenta según el número de ejes de los camiones o trailer que circulan por el tramo de concreto compactado con rodillo que se coloque.

3.2.2 Cargas transversales

Son las que actúan a lo ancho de la carretera o sección transversal y se debe a la concentración de esfuerzos que genera el concreto, estas cargas producen desplazamientos en la capa de rodadura, de manera que se incrementan en las curvas horizontales.

3.2.3 Otros tipos de cargas a tomar en cuenta

Cabe mencionar que las cargas de sismo y las cargas de impacto se deben tomar en cuenta para este tipo de pavimentos, ya que la energía producida por un sismo genera movimientos que harían fracturar el pavimento lo que ayuda a las juntas de dilatación que se le hacen al concreto.

3.3 Dosificación según las propiedades de los materiales

3.3.1 Porcentajes de agregado grueso

El agregado grueso o partículas de material que pasa el tamiz de 1" y son retenidas en el tamiz No. 4 dependerá del diseño del concreto, así como del espesor de la capa de pavimento a colocar ya que este tipo de agregado tiende a formar la mayor cantidad de vacíos de aire por la difícil manera de acomodar las partículas.

Según el tamaño máximo que se proponga para la mezcla de concreto, y así lo indiquen las especificaciones para el tipo de estructura de carretera que se desea construir, por la experiencia en otros países donde esta tecnología se utiliza frecuentemente, proponen porcentajes para el agregado grueso, según el que se vaya a utilizar.

3.3.2 Porcentajes de agregado fino

El agregado fino o las partículas de material que pasan por el tamiz No. 4 y son retenidas en el tamiz No. 200, el porcentaje obtenido dependerá en el diseño, de la mezcla de concreto.

Existen tablas que se han propuesto para los contenidos de agregado fino en la mezcla de concreto que están relacionadas al módulo de finura que posee, según la granulometría de los agregados a utilizar, así como la resistencia requerida en la mezcla ya compactada.

Otro factor que determina los porcentajes a utilizar de agregado fino es la concentración de la pasta, que no es más que la relación agua/cemento.

Otra forma para determinar el porcentaje de agregado fino en la mezcla es plotear una gráfica de resistencia-porcentaje de arena, donde al encontrar el punto más alto de la curva, se encuentran los valores de agregado fino.

3.3.3 Porcentajes de cemento

Éste será, según el porcentaje de diseño de la mezcla y en la proporción para la resistencia que se requiere.

Para el diseño de mezclas de concreto se toma como patrón el cemento, y a partir de éste, se calculan los porcentajes de agregados a utilizar.

Para los pavimentos de concreto rodillado hay que tomar en cuenta que los contenidos de cemento en la mezcla son un poco menor a las mezclas de concreto convencional, así permitirá la mejor compactación del concreto, al momento de colocarlo, sin existir una alta concentración de cemento en la mezcla.

3.3.4 Relación agua/cemento

Dependerá de la resistencia que se busca para el espesor y tipo de pavimento a construir, además del revenimiento que se desea en la mezcla. Generalmente esta relación es baja por la consistencia que debe tener este tipo de mezclas de concreto, se puede observar que la concentración de la pasta es casi sólida, para que ésta pueda ser compactada al terminar su colocación.

3.4 Mezclas utilizando cal

La utilización de cal en las mezclas de concreto es muy común y depende de la cantidad de cemento que se va a utilizar para alcanzar la resistencia requerida y así soportar las cargas que se le aplicarán por el paso de vehículos.

La tendencia al uso de la cal en las mezclas de concreto será para que ésta absorba la humedad excesiva que pueda existir en la mezcla de concreto, para balancear el contenido de agua.

3.5 Mezclas utilizando cenizas o puzolanas

Existen diferentes tipos de puzolanas para mezclar con el cemento en la fabricación de mezclas de concreto. La determinación de las cenizas o puzolanas, se hará en las proporciones que mejores resultados de resistencia que se obtengan al momento de ensayar probetas de cemento.

La función principal de las cenizas o puzolanas será adicionar finos para llenar los vacíos que de otra forma serán llenados por cemento o bien por el agua contenida en la mezcla, haciendo una mezcla más uniforme, de fácil consolidación y compactación al momento de ser colocada.

El uso de las cenizas o puzolanas en la mezcla de concreto será en una proporción que permita que no exista una cantidad excesiva de finos.

4. PREPARACIÓN DE LOS SUELOS PREVIO A PAVIMENTAR

4.1 Estabilización de la sub-rasante

Es la operación que consiste en escarificar, homogeneizar, mezclar, uniformizar, conformar y compactar la sub-rasante de una carretera previamente construida para adecuar su superficie, efectuando cortes y rellenos con un espesor no mayor de 200 milímetros, con el objeto de regularizar y mejorar, mediante estas operaciones, las condiciones de la sub-rasante como cimiento de la estructura del pavimento.

Incorporar materiales estabilizadores, homogeneizar, mezclar, uniformizar, conformar y compactar la mezcla de la sub-rasante con materiales estabilizadores para mejorar sus características mecánicas y su función como cimiento de la estructura del pavimento.

4.2 Estabilización de la sub-base

Este trabajo consiste en la obtención y explotación de canteras y bancos; la trituración, de la piedra o grava, combinándolas con material de relleno para formar un agregado clasificado; el apilamiento y almacenamiento, transporte, colocación, tendido, mezcla, humedecimiento, conformación y compactación del material de sub-base o base triturada; la regulación del tránsito; así como el control de laboratorio de todas las operaciones necesarias para construir la sub-base o base triturada en una o varias capas.

4.3 Estabilización de la base

Este trabajo consiste en la obtención y explotación de canteras y bancos; la trituración, cuando sea requerida, de piedra o grava, combinándolas con material de relleno para formar un material clasificado; el transporte, apilamiento y almacenamiento del material a estabilizar; el aprovisionamiento, transporte, almacenamiento y aplicación de los materiales o productos estabilizadores; la mezcla en planta o en la carretera, según se indique en las disposiciones especiales; el transporte, colocación, tendido, conformación y compactación de la mezcla; el curado y la regulación del tránsito, así como el control de laboratorio durante todas las operaciones necesarias para construir la sub-base o base estabilizada en una o varias capas.

4.4 Estabilización utilizando suelo-cemento

Este trabajo consiste en la obtención y explotación de bancos; el cribado de piedra o grava, cuando sea necesario, para formar un material clasificado; el transporte, apilamiento y almacenamiento del suelo a estabilizar; el aprovisionamiento, transporte, almacenamiento y aplicación del cemento; la mezcla en planta o en la carretera, según se indique en las disposiciones especiales; el transporte, colocación, tendido, conformación y compactación de la mezcla; el curado y la regulación del tránsito, así como el control de laboratorio durante todas las operaciones necesarias para construir base de suelo cemento en una o varias capas.

4.5 Preparación de la rasante

Este trabajo consistirá en llegar a condiciones favorables y óptimas, para que se pueda colocar la mezcla de concreto, según las experiencias en otros países con la estabilización de la capa de sub-base, alcanzando una compactación en campo del 98%, respecto al proctor modificado elaborado en laboratorio. Se puede colocar el pavimento de concreto rodillado, tomando en cuenta que el valor soporte California del suelo que recibirá la mezcla de concreto, debe tener un valor no menor de 30% con el 95% del proctor modificado.

Las condiciones de humedad, también están restringidas por el mismo ensayo de proctor modificado, pero se recomienda que se realice un riego de agua para incrementar la humedad en un 1 a 2% del valor del proctor para evitar que la humedad de la mezcla de concreto sea absorbida por la capa estabilizada.

4.5.1 Rasantes de pavimentos flexibles

Se puede colocar mezclas de concreto sobre una rasante de pavimento flexible, siempre y cuando éste cumpla con los requisitos de deflexión y compactación, así como la uniformidad y que esta pueda soportar la carga propia de la colocación del concreto y que éste sea compactado, sin que se deforme, ya que de lo contrario, se corre el riesgo de que el concreto ya endurecido presente fracturas por las cargas de tráfico.

4.5.2 Rasantes de pavimentos rígidos

La colocación de las mezclas de concreto y su compactación se puede realizar sobre rasantes de pavimentos rígido o hidráulico, tomando en cuenta que esta superficie se encuentre en condiciones óptimas o favorables para su colocación. Se realizan riegos de imprimación sobre rasantes de concreto hidráulico, debido a que éste servirá como aglomerante o superficie de unión entre las dos capas de concreto.

Dicha adherencia tiene buenos resultados, dado que la mezcla de concreto rodillado, es baja en su proporción de agua, por lo que impide el deslizamiento y adherencia entre capas

4.6 Uso de riegos de imprimación

Es la aplicación de un asfalto líquido por medio de riego a presión, sobre la superficie de la sub-base o sobre la base y hombros de una carretera, para protegerla, impermeabilizarla, unir entre sí las partículas minerales existentes en la superficie y endurecer la misma, favoreciendo la adherencia entre la superficie imprimada y la capa inmediata superior.

Este trabajo consiste en la delimitación y preparación de la superficie a imprimir, barriéndola y humedeciéndola previamente; el suministro, transporte, almacenamiento, calentamiento cuando sea requerido de acuerdo con el tipo de asfalto líquido utilizado, y su riego por medio de tanque distribuidor a presión; el control de tránsito, protección y señalización del área imprimada; el suministro, transporte, esparcimiento y distribución del material secante; el mantenimiento de la superficie imprimada y el barrido del exceso de material secante, previo al riego o a la colocación de la capa inmediata superior que corresponda.

Sobre una superficie o bien una rasante imprimada se puede colocar mezclas de concreto rodillado, así también el uso de estos riegos, ayuda a impermeabilizar la capa que estará lista para recibir la mezcla de concreto.

4.6.1 Tipos de asfaltos que se pueden utilizar previo a pavimentar

Los asfaltos a utilizar para la preparación de la superficie a colocar el concreto rodillado, pueden ser emulsiones de los cuales las especificaciones de la dirección general de caminos hace mención, y los puntos de riego indicados para las superficies que estén listas para pavimentar.

El tipo, grado, especificación y temperatura de aplicación para el asfalto líquido, debe ser uno de los establecidos en la tabla V.

Tabla V **Temperatura de aplicación para diferentes tipos de asfaltos líquidos**

Tipo y grado del asfalto líquido	Especificación	Temperatura de aplicación ° C
<ul style="list-style-type: none"> • MC-30 • MC-70 • MC-250 	AASHTO M 82	<p style="text-align: center;">> 30</p> <p style="text-align: center;">> 50</p> <p style="text-align: center;">> 75</p>

Fuente: **Dirección General de Caminos.** Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes. Pág. 407-1.

En la tabla anterior se indican las temperaturas mínimas para proporcionar la viscosidad adecuada para el riego de los asfaltos líquidos. Debido a que las temperaturas de aplicación pueden estar arriba del punto de llama para los asfaltos líquidos, deben tomarse precauciones de seguridad, adecuadas todo el tiempo cuando se trabaje con los mismos. Estas precauciones de seguridad incluyen, pero no están limitadas a lo siguiente:

- No se debe permitir la existencia de llamas o chispas cerca de estos materiales. El control de temperatura debe efectuarse en mezcladoras, distribuidoras u otro equipo diseñado y aprobado para este propósito.
- Nunca deben usarse llamas para examinar los tambores, tanques de asfalto u otros contenedores en los que se hayan almacenado estos materiales.
- Todos los vehículos que transporten estos materiales deben ser ventilados adecuadamente.

- Únicamente el personal con experiencia podrá supervisar y manipular estos materiales.

Figura 4. **Preparación de la base utilizando moto niveladora**



Fuente: **Instituto Costarricense del Cemento y el Concreto.** Proyecto de pavimentación a planta el colorado en Guanacaste.

5. PROPIEDADES DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO RODILLADO

Las propiedades más significativas en el concreto compactado con rodillo son las mismas que para el concreto convencional y si bien se reconoce que la resistencia a la compresión es la característica más representativa del concreto, hay otras muy importantes como el módulo de elasticidad, la resistencia a tracción y al corte, los cambios de volumen, la permeabilidad, la durabilidad, etc.

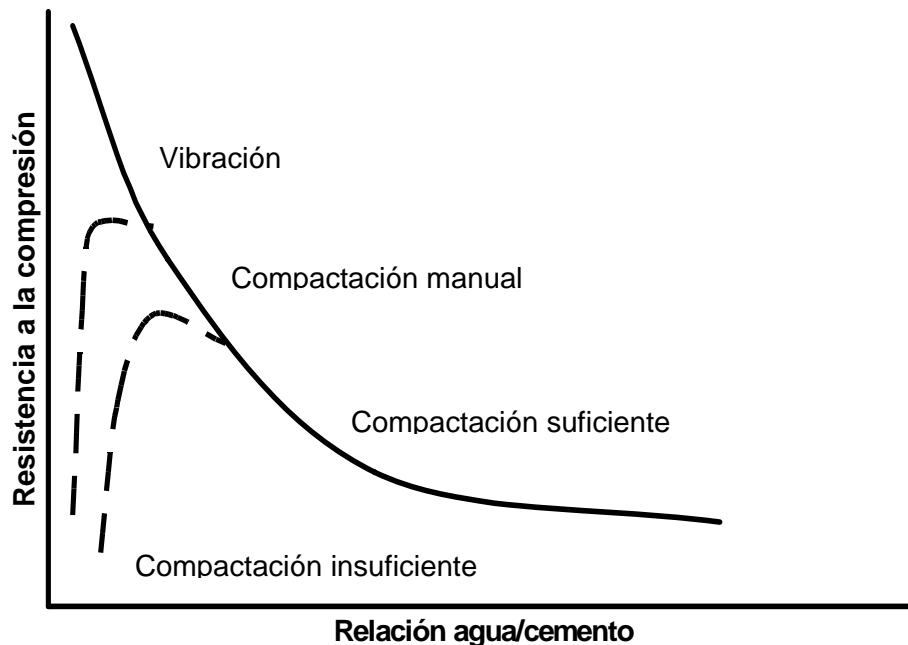
Los menores contenidos de agua y de pasta en el concreto compactado con rodillo, respecto al concreto convencional, son los responsables de las diferencias en el comportamiento entre ambos concretos. Por fortuna, para el desarrollo de esta técnica los efectos de las variaciones de las proporciones de agua, pasta y agregados ya han sido estudiados ampliamente.

Por el concreto compactado con rodillo aplicado en la pavimentación, existen dos propiedades que son preponderantes; la resistencia a los esfuerzos por flexión y la resistencia a la fatiga, debido a su incidencia en el espesor del pavimento.

5.1 Resistencia a la compresión

Cuando el concreto está totalmente compactado, la resistencia a la compresión es inversamente proporcional a la relación agua/cemento tal como lo indica en Ley de Abrams, cuya representación esquemática se muestra en la figura 4.

Figura 5. Ley de Abrams



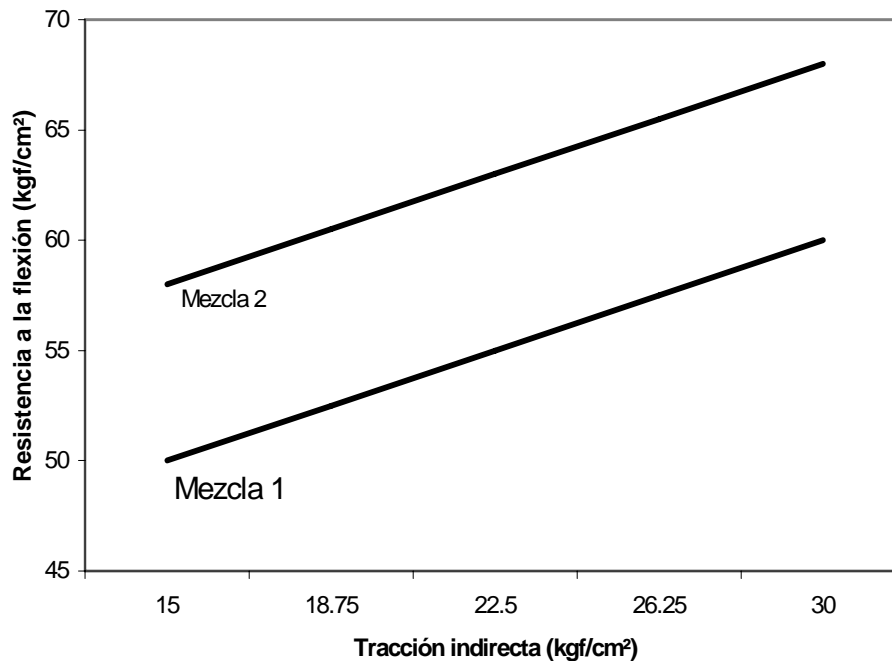
Fuente: **Instituto Colombiano de Productores de Cemento.** Notas técnicas. Pág. 5.

Debido a las bajas relaciones agua/cemento de los concretos compactados con rodillo, se alcanzan altas resistencias a la compresión, cuando se logra la compactación adecuada.

5.2 Módulo de rotura

Al igual que en el concreto convencional, en el compactado con rodillo existe una buena correlación entre la resistencia a tracción indirecta y el módulo de rotura, tal como lo indica la figura 6 en la cual se pueden apreciar las correlaciones para dos casos investigados; puede apreciarse que ambas son lineales. El desfase entre las líneas se debe a las condiciones específicas de cada proyecto. Lo cierto es que, para unas condiciones y materiales fijados con anterioridad, existe una excelente correlación entre el módulo de rotura y la resistencia a la compresión.

Figura 6. **Correlación entre el módulo de rotura a veintiocho días y el ensayo de tracción indirecta a siete días**

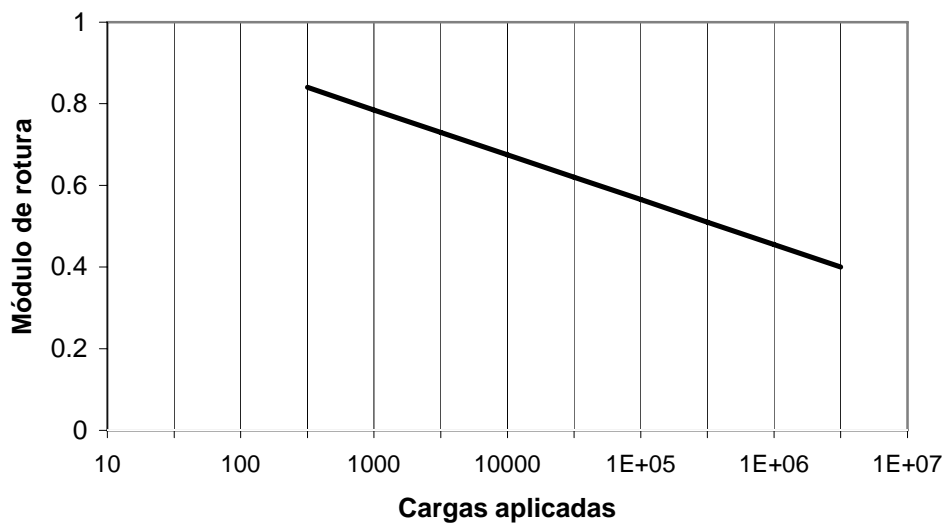


Fuente: **Instituto Colombiano de Productores de Cemento.** Notas técnicas. Pág. 5.

5.3 Resistencia a la fatiga

El concreto compactado con rodillo presenta un comportamiento a la falla por fatiga similar a la que presenta el concreto convencional, tal como lo indican la figura 7, en la cual se observan que la falla es función de la relación de los esfuerzos aplicados.

Figura 7. **Comportamiento del concreto compactado con rodillo ante la fatiga**



Fuente: **Instituto Colombiano de Productores de Cemento.** Notas técnicas. Pág. 5.

5.4 Propiedades elásticas

Los principales factores que afectan las propiedades elásticas del concreto son: la edad, las características del agregado, la relación agua/cemento y la calidad de la pasta.

Un concreto compactado con rodillo, producido y colocado adecuadamente debe tener el mismo, o un poco más elevado, módulo de elasticidad que el de un concreto convencional producido con el mismo agregado.

El cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos ha asumido en sus estudios que el módulo de elasticidad del concreto compactado con rodillo es de 280.000 kgf/cm² y el módulo de *poisson* de 0,15.

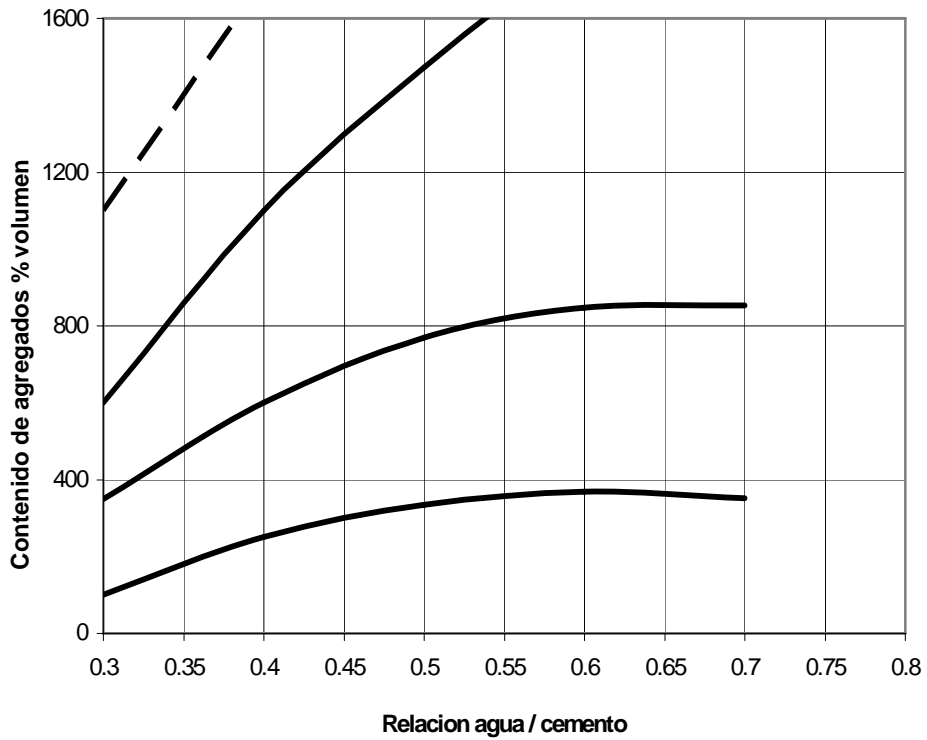
5.5 Retracción

La retracción en el concreto compactado con rodillo es inferior a la que se presenta en el concreto convencional, debido al menor contenido de agua y a un mayor acomodo de los agregados que restringe el movimiento de retracción.

Para una resistencia dada, un concreto de baja trabajabilidad contiene más agregados que una mezcla de alta trabajabilidad (la primera asociada con el concreto compactado con rodillo, la segunda con el concreto convencional) para un tamaño máximo dado y por lo tanto menos retracción.

La incidencia de la relación agua/cemento y del contenido de agregados se indica en la figura 8. Se puede apreciar como, para una relación agua/cemento de 0,35, al pasar del 70 al 80% de contenido de agregado por volumen, la retracción se reduce a casi la mitad.

Figura 8. **Influencia de la relación agua/cemento y el contenido de agregado en la contracción**



Fuente: **Instituto Colombiano de Productores de Cemento**. Notas técnicas. Pág. 5.

6. PAVIMENTACION CON CONCRETO RODILLADO

El tipo de equipo usado para la construcción de pavimentos de concreto rodillado, es básicamente el mismo que se utiliza para el mezclado, transporte, colocación y compactación de pavimentos de concreto asfáltico. Como es de notar que por tratarse de un material distinto al usado para el que se diseñaron los equipos, deben tenerse en cuenta ciertas consideraciones para el uso de estos, los cuales se detallaran en los siguientes enunciados.

6.1 Plantas de mezclado

Dadas unas condiciones específicas, es factible el uso de plantas estacionarias convencionales de mezclado.

Una de estas condiciones puede ser la existencia de una planta mezcladora cerca al sitio de la obra, que garantice un buen sistema de control y que pueda mantener una calidad aceptable en todo momento.

Debido a que el concreto compactado con rodillo es un material extremadamente seco y de baja densidad cuando no esta compactado, las mezcladoras convencionales sólo con tres cuartas partes del peso normal para el cual están diseñadas, aseguran una mezcla más homogénea. Además, los tiempos de mezclado y de descarga deben ser más largos. Todo esto resulta en una disminución de una tercera parte de la capacidad normal que se tiene para la producción de concreto convencional.

Dado que cualquier cambio en la cantidad de agua en la mezcla de concreto compactado con rodillo, produce cambios drásticos en sus propiedades no se debe alternar la fabricación de éste con concretos de otro tipo.

En las plantas de mezclado y preparación de la mezcla de concreto, los materiales, que la alimentarán deberán entrar de preferencia secos para que la mezcla con el cemento sea la mejor, y así evitar que la planta mezcle ella mezcla fragüe por el contenido de humedad que puedan tener los agregados. Éstas serán ubicadas estratégicamente según la conveniencia del proyecto para su pavimentación, y evitar costos elevados, de preferencia deben estar cerca del lugar de la descarga, pero eso quedará a criterio del contratista.

Hay que tomar en cuenta que por ser una mezcla seca no hay problema en la distancia de transporte.

6.1.1 Diferentes tipos de plantas de mezclado

El concreto compactado con rodillo se puede producir en mezcladoras continuas destinadas para concreto pobre o muy seco. Estas mezcladoras se caracterizan por tener ejes horizontales que rotan dentro de un tambor fijo y tienen adheridas a ellos unas aspas o paletas que agitan la mezcla; éstas se conocen con el nombre de *“pugmills”*. En este tipo de plantas mezcladoras, los agregados gruesos y finos se incorporan al recipiente principal, por medio de compuertas controladas, que dosifican las cantidades dependiendo del diseño de la mezcla.

El cemento a su vez, se descarga desde el silo de almacenamiento sobre los agregados por medio de un mecanismo que incorpora la cantidad precisa, de acuerdo con el diseño de la mezcla. Para controlar en forma adecuada la cantidad de cemento necesaria en la mezcla, se colocan unos tanques entre el silo de almacenamiento y el mecanismo de alimentación del cemento, los cuales tienen una capacidad de 200 a 350 Kg. para mantener una presión de cemento constante que asegure un flujo de descarga uniforme.

Estas plantas se consideran portátiles debido a que todos sus componentes pueden ser montados y transportados en una sola unidad de remolque y ensamblarse para su traslado en menos de cuatro horas. En la actualidad existen diversos y muy sofisticados tipos de plantas de mezclado y preparación de mezclas de concreto. Se hace mención de dos tipos principales de plantas de mezclas de concreto.

- **Continuas:** son las que los materiales agregado grueso y fino entran a la planta, y allí por la cantidad de material que entra, se mezclan con el cemento. La entrada del material es continuo y el tiempo de llenado del silo dependerá de la rapidez para la planta de secar el material.
- **Bachadas:** son las que los materiales se pesan haciendo una bachada de peso determinado junto con el cemento, la entrada del agregado grueso y fino es similar a las plantas continuas; a diferencia que al llegar al peso que se requiere esta mezcla el cemento para formar la bachada.

Para ambos tipos de plantas, el agua no se aplica a la mezcla, ésta se aplica en obra.

Dadas unas condiciones específicas, es factible el uso de plantas estacionarias convencionales de mezclado.

Una de estas condiciones puede ser la existencia de una planta mezcladora de concreto cerca al sitio de la obra, que garantice un buen sistema de control y que pueda mantener una calidad aceptable en todo momento.

Debido a que el concreto compactado con rodillo es un material extremadamente seco y de baja densidad cuando no está compactado, las mezcladoras convencionales sólo pueden llenarse con tres cuartas partes del peso normal para el cual están diseñadas, asegurando así una mezcla más homogénea; además los tiempos de mezclado y de descarga deben ser más largos. Todo esto resulta en una disminución de una tercera parte de la capacidad normal que se tiene para la producción de concreto convencional.

Dado que cualquier cambio en la cantidad de agua en la mezcla de concreto compactado con rodillo, produce cambios drásticos en sus propiedades no se debe alternar la fabricación de éste con concretos de otro tipo.

El uso de tambores mezclados en la planta o en los camiones transportadores, ha resultado exitoso para mezclar el concreto en algunos casos. Este método es aconsejable cuando se dispone de agregados relativamente limpios, al igual que de una mezcla con un contenido mínimo de finos. Ésto se debe a que los finos tienden a aglutinarse, formando grumos difíciles de mezclar completamente debido y a la poca cantidad de agua presente en la mezcla.

Es frecuente que cuando se usa este sistema, se presenten problemas para la descarga de los camiones mezcladores; esto se remedia colocando el camión en una rampa inclinada 30 grados respecto a la horizontal y limpiando el interior del tambor para proporcionar una superficie suave, por la cual se puede deslizar fácilmente el concreto.

Figura 9. **Planta de concreto**



Fuente: **Instituto Costarricense del Cemento y el Concreto**. Proyecto de pavimentación a planta el colorado en Guanacaste.

6.2 Pruebas que se le realizan a la mezcla

El control de calidad es una parte del proceso constructivo que debe tenerse en cuenta para el éxito del proyecto, ya que la construcción de pavimentos de concreto compactado con rodillo es una técnica relativamente nueva y no se cuenta con la experiencia que tienen los constructores en otro tipo de obras.

El control de calidad del concreto compactado con rodillo comprende dos fases. La primera es el control de calidad del material, que se realiza comprobando la humedad y la gradación de los agregados, asegurando que la planta esté bien calibrada y midiendo la calidad del concreto para comprobar el grado de compactación, lo cual se realiza fabricando probetas para ensayos de resistencia y de densidad. La segunda es el control de la calidad final del pavimento que se lleva a cabo comprobando la uniformidad de la superficie terminada, extrayendo núcleos y viguetas del pavimento para medirles su resistencia y densidad, además del espesor final obtenido.

Para el control de calidad de los pavimentos de concreto rodillado y la durabilidad de éstos se deben realizar pruebas a la mezcla de concreto para lograr los resultados que se desean.

Tanto en laboratorio como en el campo, se deben realizar pruebas para determinar la buena calidad de la mezcla de concreto. A continuación se describen los ensayos que se realizan y su metodología para determinar la densidad máxima y la humedad óptima.

6.2.1 Proctor modificado

Este ensayo consiste en determinar la densidad máxima y la humedad óptima, aplicando energía de compactación a un volumen determinado de material, en este caso sería la mezcla de concreto. Se recomienda el proctor modificado tipo “D” ya que representa de una mejor forma las condiciones de compactación en la obra.

6.2.2 Consistómetro VeBe

Éste constituye la base principal del sistema de pavimentación, ya que determina el tiempo de vibrado del concreto en el lugar de la colocación, y que este quede compactado, reduciendo de buena manera la cantidad de vacíos.

Hay que tomar en cuenta que no es aplicable este método para mezclas donde el agregado grueso excede los 40.00 mm 1 ½ pulgadas.

Se emplea un tiempo de 5 a 30 segundos, para determinar la densidad máxima de compactación. En base a estudios previos en laboratorio a mezclas sometidas a este ensayo, se obtuvo estos tiempos de vibrado.

6.2.3 Revenimiento

Para determinar el asentamiento y la consistencia de la mezcla de concreto a colocar se realiza la prueba de revenimiento o asentamiento, haciendo uso del cono de Abrahams.

Los valores de asentamiento de la mezcla deberán ser de consistencia dura con dos centímetros de asentamiento, llenando el cono en tres partes y varillándolo veinticinco veces por cada capa, sin traspasar la capa siguiente hasta que se llena el cono.

6.2.4 Determinación de humedad

En la aplicación del método de ensayo previsto en esta norma, se deben observar las normas de seguridad de cada país, dado que se utilizan materiales radiactivos y también la radiación proveniente de ellos. El propietario del equipo de ensayo y el operador responsable deben tener los permisos individual e institucional correspondientes, otorgados por el organismo nacional competente.

Este método de ensayo consiste en la determinación de la humedad "*in situ*", por medio de un equipo nuclear, antes del fraguado del hormigón se calibra el equipo para determinar el contenido de humedad, expresado como la masa de agua por unidad de volumen de hormigón fresco, en kilogramos por metro cúbico.

Normalmente se emplea el valor del contenido porcentual de humedad, que se define como la proporción, en un determinado volumen de hormigón, de la masa de agua con relación a la masa de la parte sólida comprendida en ese volumen, ambas expresadas en kilogramos por metro cúbico. Por lo tanto, para calcular el contenido porcentual de humedad empleando el densímetro nuclear, es necesario determinar la densidad del material seco que compone el hormigón.

Los equipos nucleares disponibles, en su mayoría, contienen los dispositivos necesarios para la determinación de la humedad y de la densidad del material húmedo. La diferencia entre esos dos valores define la densidad del material seco.

Figura 10. **Control de calidad, chequeo de compactación por método no destructivo, usando sonda radioactiva**



Fuente: **Instituto Costarricense del Cemento y el Concreto.** Proyecto de pavimentación a planta El Colorado en Guanacaste.

6.3 Transporte de la mezcla

El concreto compactado con rodillo para pavimentos, generalmente se transporta en volquetas. Esto se debe a la poca distancia que usualmente existe entre la planta de mezclas y el sitio de la obra (especialmente cuando se usan plantas portátiles) y a lo económico y accesible de este sistema.

La selección del equipo de transporte se debe hacer de tal manera que se garantice un suministro rápido, ágil y eficiente para alcanzar y mantener la velocidad de los equipos de pavimentación.

Para disminuir la segregación, la descarga desde los camiones se debe realizar a partir de tolvas con alturas de caída lo más pequeñas posibles. También es necesario tomar medidas para evitar que las condiciones climáticas adversas perjudiquen la mezcla; para ello puede ser necesario utilizar lonas que protejan al concreto de la lluvia y de la desecación durante el transporte.

En algunos casos particulares, donde las condiciones de la obra y del equipo se presten, se pueden usar camiones mezcladores para el transporte del concreto de la planta a la obra. Estos casos son muy específicos y, como se mencionó en la sección de mezclado, debe dársele mucha importancia a la limpieza interior del tambor para agilizar la descarga y no incurrir en demoras innecesarias que perjudiquen el ritmo de colocación y la economía del proyecto. Existen diversos tipos de transportar las mezclas de concreto para el lugar de trabajo, lo importante es que debe estar protegida con lonas para evitar que los finos y el cemento en la mezcla se volatilicen por el efecto del viento que se genera por el movimiento de los vehículos.

6.3.1 Tipos de transporte

Regularmente se hace uso de caminos de volteo, por la rapidez de la descarga en el lugar de trabajo, pero también se pueden hacer uso de camiones mezcladores, que pueden colocar la mezcla con mayor versatilidad a diferencia de los camiones de volteo, dependiendo del tipo de maquinaria que se este utilizando para el tendido y colocación de la mezcla.

Figura 11. **Uso de camiones de volteo para la transportación de la mezcla de concreto**



Fuente: **Instituto Costarricense del Cemento y el Concreto.** Proyecto de pavimentación a planta El Colorado en Guanacaste.

6.3.2 Tiempos de llegada al lugar a pavimentar

El tiempo de llegada al lugar de trabajo donde se está colocando la mezcla de concreto, dependerá de la fórmula de trabajo y avance diario. Ésta se debe hacer lo más pronto, para que sea continua la colocación, si se demora mucho en la llegada al lugar, se puede dar el caso de que el material se segregue por la vibración, producida por el movimiento del transporte, para el caso del uso de camiones de volteo, pero un tiempo moderado será de veinte minutos después de salida la mezcla de la planta. No se cuenta con una especificación, como en el caso contrario a las mezcla de concretos asfálticos o mezclas en caliente.

7. METODOLOGÍA DE PAVIMENTACIÓN

7.1 Colocación de la mezcla

El proceso de colocación del concreto compactado con rodillo forma parte integral de todo el proceso constructivo del pavimento. Debido a esto el proceso debe ser siempre rápido y eficiente para mantener el ritmo de las otras etapas de la construcción. Inicialmente debe asegurarse que la superficie donde se va a colocar el concreto esté bien compactada y en buenas condiciones para evitar que la superficie del pavimento se agriete en un futuro. Es importante tener en cuenta que los espesores de colocación del concreto se deben incrementar entre un 15 y un 20% con respecto a los de diseño para obtener el espesor correcto cuando finalice el proceso de compactación. Esto se debe a la contracción de la mezcla de concreto que sufre en el proceso de fraguado ya que los aglomerantes que posee el concreto se activan en presencia de humedad.

7.1.1 Diferentes métodos de colocación

La colocación de la mezcla de concreto que será compactada, podrá ser, haciendo uso de trompos de topografía o bien con máquinas terminadoras que posean sistemas de medición de espesores por sensores, para el uso de trompos o bien con el uso de escantillón cuando se coloca con terminadora, para un espesor definido, donde según lo que va avanzado la máquina terminado se penetra un escantillón con la medida del espesor de la capa a colocar.

Con el uso de motoniveladora para la colocación de la mezcla de concreto, deberán existir trompos o marcas de nivelación de la rasante, y verificar con topografía, mientras que con el uso de sensores que registran los niveles ya sea de un patín o bien de un cable, estos sensores pueden ser de contacto o bien sónicos, que se usa en las máquinas terminadoras.

7.1.2 Maquinaria a utilizar para el tendido de la mezcla

El extendido del concreto se puede realizar mediante moto niveladoras, extendedoras o pavimentadoras usadas para concreto asfáltico o con las utilizadas tradicionalmente en la construcción de pavimentos de concreto convencional, aunque con algunas modificaciones.

Las moto niveladoras pueden usarse en zonas con geometría compleja, por ejemplo en parqueaderos y zonas de circulación de urbanizaciones. Son útiles en carreteras donde las exigencias de regularidad superficiales no sean muy altas o en carreteras que posteriormente se cubrirán con una carpeta de rodadura de concreto asfáltico.

Las moto niveladoras tienen la ventaja de disponer de gran capacidad y de permitir regar el material sobre una superficie muy extensa sin la necesidad de juntas longitudinales. Sin embargo, tienen el problema de producir una laminación en la parte superior del pavimento, la que consiste en la formación de capas delgadas con problemas, debido a la mala adherencia.

Para evitar que esto suceda se pueden hacer dos cosas, la primera, extender el pavimento con un espesor mayor y la segunda, colocar unos dientes estratégicamente en la cuchilla de la moto niveladora para romper las huellas de las llantas y eliminar la laminación. Claro está que este sistema no es muy bueno, debido a que los materiales cementados se deterioran cuando son remoldados.

Las pavimentadoras son máquinas fáciles de conseguir y manejar. Con ellas se puede controlar tanto la pendiente como el bombeo y lograr superficies de mejor calidad. Adicionalmente garantizan un espesor uniforme con ritmos de colocación hasta 1,2 m/min.

En algunas ocasiones, cuando es necesario colocar el pavimento en espesores mayores que 0,25 m, se deben modificar las extendedoras o pavimentadoras de tal forma que puedan manejar volúmenes grandes de material. Para estos casos es recomendable el uso de extendedoras provistas de pisonos o reglas vibrantes, que produzcan una pre-compactación significativa que permita conseguir un buen nivel de regularidad superficial, sin que haya necesidad de colocar el pavimento en varias capas.

Actualmente hay compañías que se dedican a diseñar y fabricar máquinas pavimentadoras adecuadas para la colocación del concreto compactado con rodillo, con la que se evitarían muchas de las dificultades mencionadas anteriormente. Estas máquinas tienen la capacidad de vibrar y compactar (a medida que riegan el concreto) hasta un 90% de la densidad óptima, disminuyendo así la compactación con los rodillos y haciendo el sistema más rápido y económico.

Para la colocación de la mezcla de concreto, se puede hacer uso de moto niveladoras, tractores provistos con cuchillas o bien de terminadoras, de las cuales existen diversas marcas. Una de las más importantes ventajas de las terminadoras es el acabado que ésta deja, ya que es uniforme según el espesor a colocar así como la vibración de las planchas que ayudan al acomodamiento de las partículas de la mezcla de concreto.

Figura 12. **Colocación de la mezcla de concreto usando terminadora**



Fuente: **Instituto Costarricense del Cemento y el Concreto**. Proyecto de pavimentación a planta El Colorado en Guanacaste.

7.1.3 Recomendaciones para el tendido de la mezcla

Los procedimientos de colocación del concreto compactado con rodillo deben estudiarse para cada proyecto en particular, y evitar en lo posible la formación de juntas frías. Por ejemplo, cuando se pavimentan áreas rectangulares, contrario a lo que se acostumbra, debe pavimentarse en el sentido más corto para reducir el tiempo entre la colocación de dos capas consecutivas y así obtener juntas frescas de construcción.

Para colocar los pavimentos de concreto rodillado, como se ha mencionado con anterioridad, no se requieren del uso de formaletas por la consistencia de la mezcla, ya que no tiende a derramarse por tener un revenimiento bajo, con el uso de moto niveladoras se debe tener atención en el desperdicio que se puede generar por la operación al momento de llegar al nivel del espesor a colocar, situación que no ocurre con las terminadoras, este tipo de equipos colocan la mezcla sin derramamientos por las extensiones que poseen.

7.2 Vibrado de la mezcla colocada

En la vibración de la mezcla de concreto se reducirán los vacíos de aire y al mismo tiempo aumentará la densidad de la mezcla obteniendo un porcentaje óptimo de vacíos de aire, ésto es parte del proceso de densificación del concreto colocado.

7.2.1 Métodos para el vibrado

La vibración de la mezcla de concreto será al momento de ser compactada y está en función del tiempo de fraguado de la mezcla; de cuanto será el tiempo de vibrado para evitar el endurecimiento de la mezcla por el tamaño del agregado máximo así será el tiempo de vibración que se le aplicará a la mezcla, existen tablas con los tiempos de vibrado según el tamaño máximo de agregado usado.

7.2.2 Maquinaria que se puede utilizar para el vibrado de mezcla

Para el vibrado de la mezcla de concreto se hace uso de compactadoras con rodos vibratorios que al mismo tiempo compactan la mezcla.

Existe también la vibración al momento de colocar la mezcla de concreto con las máquinas terminadoras que poseen un sistema de vibración en las planchas que van dejando una superficie lista para compactar, la cantidad de vibración que estas máquinas efectúan asemeja a la preparación de cilindros de concreto para las pruebas de resistencia a la compresión, donde el cilindro se llena en tres terceras partes y haciendo uso de una varilla se penetra veinticinco veces a manera de acomodar el material y reducir la cantidad de vacíos que puedan quedar.

Otra de las opciones al pavimentar con mezclas de concreto previas a compactar, es el uso de una plancha vibratoria que es la misma que se utiliza para la pavimentación con mezclas de concreto convencionales, que al tiempo que va colocando la mezcla la va vibrando.

Figura 13. **Proceso de colocación y vibrado de la mezcla de concreto por medio de la máquina terminadora**



Fuente: **Instituto Costarricense del Cemento y el Concreto**. Proyecto de pavimentación a planta El Colorado en Guanacaste.

7.3 Compactación

La compactación de las mezclas de concreto, es la parte más importante de este proceso constructivo, ya que de ella depende la resistencia del concreto para poder soportar las cargas de servicio al cual será sometido, tal es el caso del tráfico vehicular. Ésta será la manera de consolidar la mezcla ya colocada y aumentar su densidad, como ocurre en el caso de la pavimentación con mezclas asfálticas.

7.3.1 Métodos para la compactación de la mezcla colocada

Después de la colocación se debe proceder inmediatamente a la compactación. Este proceso se completa en tres etapas: la primera, una compactación con rodillo vibratorio, la segunda con un compactador de llantas lisas o neumáticos y la tercera con rodillo liso (sin vibración) para darle mejor acabado.

7.3.2 Equipos para compactación de la mezcla colocada

Los equipos que se usan para la compactación del pavimento son de fácil consecución. Ente estos equipos se encuentran los rodillos vibratorios lisos con un peso muerto de 9 a 11 toneladas y una carga estática lineal de 15 a 30 KN/m. También debe usarse un compactador neumático de aproximadamente 20 toneladas, de llantas múltiples, con una presión de inflado apropiada.

El equipo de vibrado debe operarse a una velocidad baja (normalmente menor de 3 Km./h). Y funcionar con una amplitud alta y una baja frecuencia de vibración. Si se cumplen estos requisitos puede asegurarse una buena compactación.

Las tres etapas mencionadas en la sección 7.3.1 se llevan a cabo de la siguiente forma:

Figura 14. **Rodo vibratorio de tambores lisos tipo *tándem* para acomodamiento del concreto y vibrado de la mezcla**



Fuente: **Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto**. Boletín informativo uso del CCR. Pág. 15.

La compactación se inicia con el rodillo con los vibradores accionados; el número de pasadas en esta etapa depende del tipo del equipo, de las características de la fundación y del espesor de la capa. Es importante tener en cuenta que en esta etapa el rodillo no debe retornar por el mismo carril, para evitar que se produzcan ahuellamientos. La compactación y la activación de la vibración se deberá hacer sobre la marcha y no detenido el rodo vibratorio e iniciar la marcha ya vibrando, de la misma forma se hace al final del tramo que se está vibrando; sobre la marcha desactivar la vibración.

Figura 15. **Rodo neumático, con serie de llantas lisas que permiten el sellado de la mezcla ya vibrada y compactada**



Fuente: **Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto**. Boletín informativo uso del CCR. Pág. 15.

El concreto debe haber alcanzado por lo menos el 79 por ciento de la densidad del Proctor Modificado y el número de pasadas, generalmente 3 ó 4, se debe definir con anterioridad por medios de ensayos. En la tabla VI se dan datos del número de pasadas necesarias para alcanzar esta densidad con diferentes equipos y espesores de capas. La amplitud y la frecuencia con que deben usarse los rodillos no está especificada, por consiguiente deben estudiarse para cada caso en particular.

Tabla VI **Número de pasadas en la primera etapa y espesores máximos para diferentes equipos**

Equipo de compactación	No. mínimo de pasadas	Espesor máximo (m)
Pisón vibratorio (mínimo 400 Kg)	4	0.15
Rodillo vibratorio sencillo		
15 kN/m	6	0.15
25 kN/m	6	0.25
Rodillo vibratorio <i>tándem</i>		
10 kN/m	6	0.10
20 kN/m	4	0.15
30 kN/m	4	0.25

Fuente: **Instituto Colombiano de Productores de Cemento.** Notas técnicas. Pág. 9.

La segunda etapa consiste en pasar el equipo con llantas neumáticas una o dos veces para que sellen todas las fisuras que quedan en la superficie después del vibrador y para asegurar un mejor acabado y calidad. Esta etapa se puede omitir cuando se va a cubrir la superficie con una capa asfáltica.

La tercera y última etapa puede lograrse con una o dos pasadas del rodillo en forma estática, primero hacia delante y luego hacia atrás, sobre el mismo carril, para borrar las huellas dejadas por el equipo con llantas neumáticas.

Algunas veces se presentan problemas para alcanzar las densidades esperadas, esto se debe a los siguientes factores:

- Baja capacidad de soporte de la sub-rasante.
- Control deficiente en la humedad del concreto compactado con rodillo.
- Demoras en empezar la etapa de compactación.
- Errores en los ensayos.
- Una des-compactación debida a que el rodillo vibratorio esté funcionando con amplitudes de vibración más altas de lo debido.

Estos problemas antes mencionados se pueden evitar colocando el concreto sobre una sub-rasante o una sub-base de buena calidad, utilizando retardadores de fraguado y rodillo con amplitud de vibración variable.

Figura 16. **Proceso de compactación usando un rodo doble tipo *tándem***



Fuente: **Instituto Costarricense del Cemento y el Concreto.** Proyecto de pavimentación a planta El Colorado en Guanacaste.

7.4 Juntas

El pavimento de concreto compactado con rodillo tiene las mismas juntas que los de concreto convencional, pero el tratamiento de ellas es diferente debido a la menor retracción del concreto compactado y extendido, por ende, un mayor espaciamiento entre aquellas.

7.4.1 Juntas transversales

Las juntas transversales, que tienen por objeto controlar la fisuración aleatorio como resultado de la contracción, se deben cortar en aquellos pavimentos en que se busque una buena apariencia estética y no se vaya a recubrir posteriormente con una capa de concreto asfáltico. En caso contrario, se puede permitir que se formen espontáneamente.

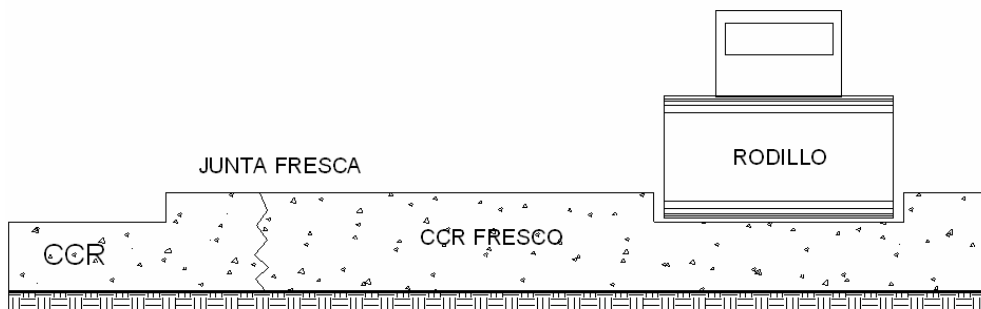
Cuando se elaboren cortes, se deben ejecutar durante las primeras 24 horas después de compactado el concreto, con un espaciamiento entre 15 y 20 m. Pero cualquiera que sea el sistema, fisuración aleatoria o juntas cortadas, se deben sellar para buscar la estanqueidad del pavimento.

7.4.2 Juntas longitudinales

Las juntas longitudinales, en el caso de la pavimentación con concreto compactado con rodillo en secciones transversales con un ancho inferior a los 10 m, no son necesarias siempre y cuando se pueda realizar la colocación del concreto en todo lo ancho de la sección transversal.

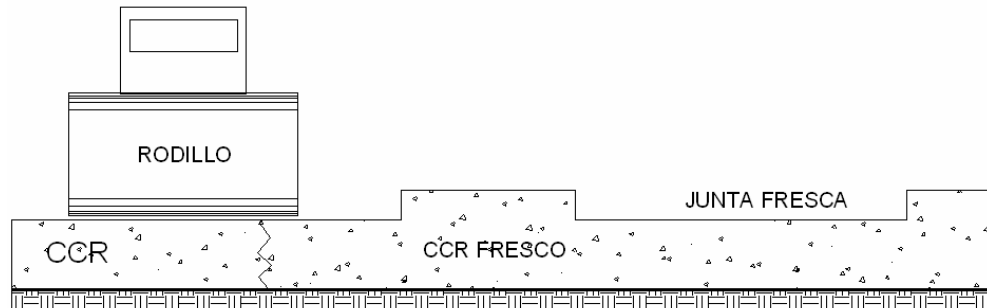
En caso contrario se deben evitar las juntas de construcción frías, colocando y compactando el concreto por carriles en un período inferior a 90 minutos, dejando de compactar unas franjas de 0, 20 a 0, 30 m de ancho en el borde de los carriles adyacentes, para luego compactar simultáneamente las dos franjas. El esquema del proceso constructivo se indica en las figuras 17, 18, y 19.

Figura 17. **Indica que la compactación se debe hacer hasta 30 centímetros del borde dando dos pasadas con el rodillo**



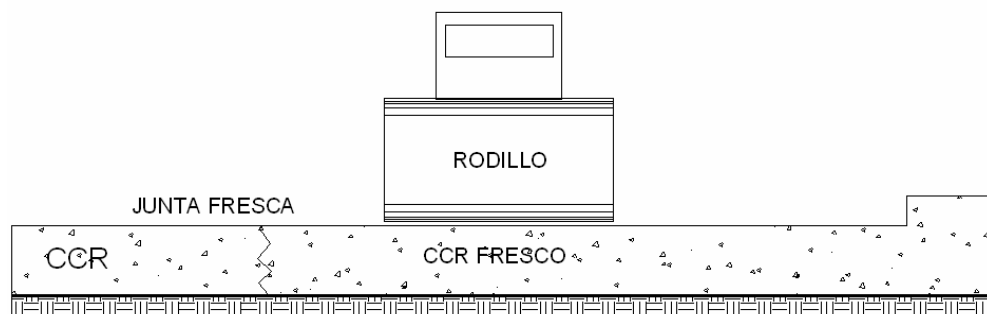
Fuente: **Instituto Colombiano de Productores de Cemento**. Notas técnicas. Pág. 10.

Figura 18. **El rodillo debe compactar la junta fresca dando dos pasadas y de igual manera no compactar de 30 a 45 centímetros del borde**



Fuente: **Instituto Colombiano de Productores de Cemento. Notas técnicas. Pág. 10.**

Figura 19. **Se repite la secuencia con la otra franja o media sección**



Fuente: **Instituto Colombiano de Productores de Cemento. Notas técnicas. Pág. 10.**

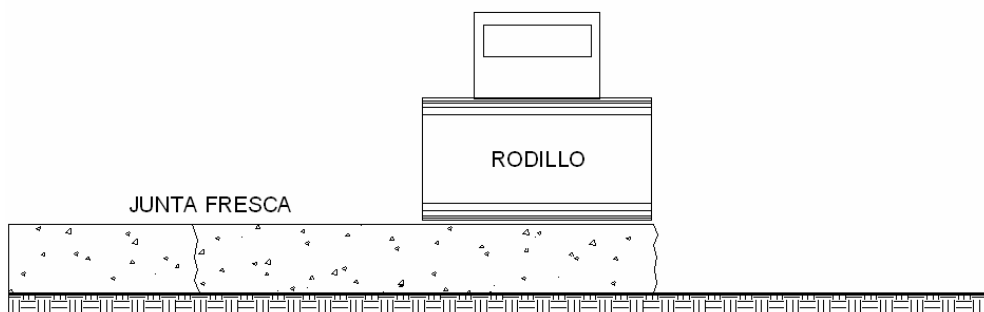
7.4.3 Juntas frías

Las juntas frías pueden ser longitudinales o transversales y se deben en principio a dos razones: la primera a la interrupción en la construcción por fallas en el suministro del concreto o por la finalización de la jornada laboral y la segunda, a las limitaciones del equipo constructivo.

Las juntas frías deben tener un plano vertical, el cual se obtiene cortando el concreto cuando aún se encuentra fresco, con la ayuda de la cuchilla de la moto niveladora. Al reiniciarse la construcción se descarga el concreto a lo largo de la junta fría, con el sobre espesor necesario para lograr la altura del concreto compactado deseado, según el diseño. Este sobre espesor es bueno colocarlo también en una franja de unos 8 cm. de ancho sobre el concreto endurecido de la junta para permitir la circulación de los equipos compactadores y empujar el concreto hacia el concreto fresco con la ayuda de un rastro.

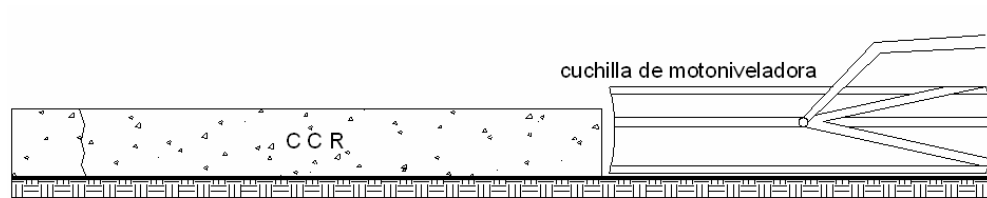
A continuación se hacen circular los compactadores a lo largo de la junta, con el rodillo montado 0, 30 m sobre el concreto fresco como se indica en las figuras 20, 21, 22, 23, y 24.

Figura 20. **Compactación del borde en la última franja o sección**



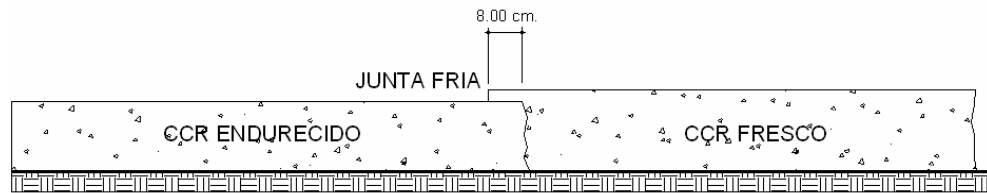
Fuente: **Instituto Colombiano de Productores de Cemento. Notas técnicas. Pág. 10.**

Figura 21. **Corte del borde del pavimento de concreto rodillado, usando la cuchilla de una moto niveladora**



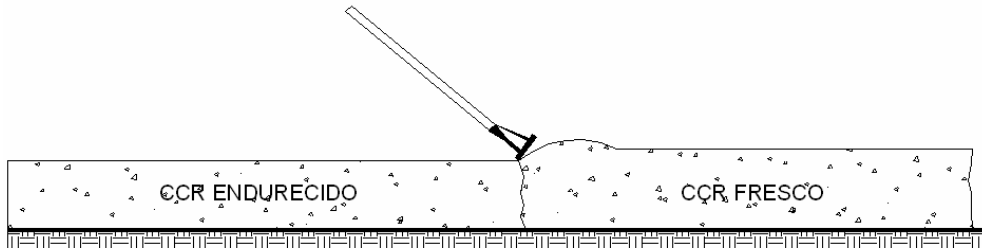
Fuente: **Instituto Colombiano de Productores de Cemento.** Notas técnicas. Pág. 10.

Figura 22. **Traslape del pavimento de mezcla endurecida y de mezcla fresca en la cual se debe humedecer el borde y colocar**



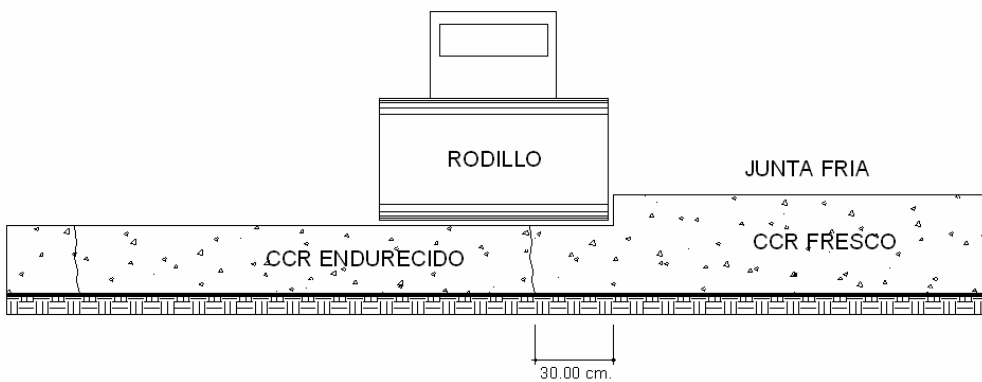
Fuente: **Instituto Colombiano de Productores de Cemento.** Notas técnicas. Pág. 10.

Figura 23. **Uso de arrastres para mejor acabado en las juntas**



Fuente: **Instituto Colombiano de Productores de Cemento**. Notas técnicas. Pág. 10.

Figura 24. **Compactación de junta de concreto fresco con concreto endurecido haciendo dos pasadas de rodo estático**



Fuente: **Instituto Colombiano de Productores de Cemento**. Notas técnicas. Pág. 10.

7.4.4 Otras

Las juntas de expansión no son necesarias en los pavimentos de concreto a menos que se necesite proteger estructuras que se encuentren dentro del área a pavimentar, en cuyo caso se deben seguir las mismas recomendaciones que para los pavimentos de concreto convencional.

Las juntas longitudinales de construcción se ejecutan dejando sin compactar temporalmente, una franja de más o menos 0,25 m de ancho a lo largo del borde del pavimento, mientras se compacta el concreto del interior de la vía, para luego hacer circular los equipos compactadores por la franja no compactada, con un esquema similar al de la figura 9.

Cuando se necesite tener una junta longitudinal muy bien ejecutada, como puede ser el caso de una vía urbana, puede ser necesaria la colocación de formaletas metálicas o de madera que contengan el concreto adecuadamente en su sitio.

En este tipo de pavimentos no se ha utilizado hasta el momento ningún tipo de varillas de acero, ni como refuerzo, ni como barras de transferencia de carga.

7.5 Curado de la mezcla colocada

Debido al bajo contenido de agua en la mezcla, cualquier pérdida de ésta durante y después de la colocación del concreto se vuelve crítica para la calidad final del pavimento. Se requiere que inmediatamente después de que se termine la compactación, debe empezarse el curado con agua, empleando una capa de arena húmeda, mantas de algodón, tela de fique, camiones regaderas o sistemas atomizadores de agua.

Se debe cuidar de que la mezcla colocada no fragüe de manera rápida para evitar que falle el concreto por la poca cantidad de humedad que posee respecto a la atomización del agua o bien la aplicación de agua pulverizada. Ella permite que exista una película protectora para que la acción de endurecimiento del concreto no sea de manera brusca, por efectos de la temperatura del lugar donde se coloque la mezcla de concreto.

El buen nivelado y la suavidad de la superficie dependen especialmente de la calidad, del tamaño máximo de los agregados, de la cantidad de finos y del equipo usado. La macro textura de la superficie del concreto compactado con rodillo tiene la apariencia de un pavimento asfáltico.

7.5.1 Aplicación de agua pulverizada

La aplicación de agua pulverizada consiste en aplicar presión a una área de salida del agua reducida formando una brisa, y ésta a su vez forma una película delgada de agua sobre la mezcla colocada, que es de fácil penetración o absorción por el concreto para el curado de la mezcla.

7.5.2 Riegos de agua periódicos

Los riegos de agua periódicamente sobre el concreto compactado evita que pierda su humedad óptima, se debe hacer después de compactada la mezcla colocada, para evitar resecamiento de las capas superiores.

7.5.3 Aditivos que se pueden emplear para curado

Los aditivos que se emplean para el curado de la mezcla de concreto luego de ser compactada, pueden ser para fraguado lento o bien para fraguado rápido.

Figura 25. **Curado del pavimento de concreto rodillado usando riegos de emulsión**



Fuente: **Instituto Costarricense del Cemento y el Concreto**. Proyecto de pavimentación a planta El Colorado en Guanacaste.

CONCLUSIONES

1. Las propiedades más significativas en el concreto compactado con rodillo son las mismas que para el concreto convencional y si bien se reconoce que la resistencia a la compresión es la característica más representativa del concreto, hay otras muy importantes como el módulo de elasticidad, la resistencia a tracción y al corte, los cambios de volumen, la permeabilidad, la durabilidad, etc.
2. Los menores contenidos de agua y de pasta en el concreto compactado con rodillo, respecto al concreto convencional, son los responsables de las diferencias en el comportamiento entre ambos concretos. Por fortuna para el desarrollo de esta técnica los efectos de las variaciones de las proporciones de agua, pasta y agregados ya han sido estudiados ampliamente.
3. En el concreto compactado con rodillo aplicado en la pavimentación existen dos propiedades que son preponderantes: la resistencia a los esfuerzos por flexión y la resistencia a la fatiga, debido a su incidencia en el espesor del pavimento.

RECOMENDACIONES

1. Conociendo las propiedades de este tipo de pavimentos se sugiere que se construya un tramo de prueba, para conocer el comportamiento de este sistema de pavimentación.
2. Al Ministerio de Comunicaciones e Infraestructura plantear este sistema de pavimentación, como alternativa de trabajo para tramos carreteros de tráfico mayor que requieran de bajo mantenimiento.
3. Continuar el estudio de este sistema de pavimentación y sobretodo del diseño de mezclas de concreto compactado con rodillo.

BIBLIOGRAFÍA

1. **American Concrete Institute** Normas C1245, C1170, C1176, C1435 EUA. 1980
2. **Concreto compactado con rodillo.** (Trabajos varios) Centro Salvadoreño de información del cemento y concreto, El Salvador: 43 y 44. 1998
3. **Concreto compactado con rodillo.** (Boletín informativo) Instituto mexicano del cemento y el concreto. México: 1990.
4. **Concreto compactado con rodillo.** (Notas Técnicas) Instituto colombiano de productores de cemento (ICPC), Colombia: Editorial Camacol. 1991.
5. Domínguez, Jorge Gómez. **Diseño de pavimentos rígidos concreto rodillados y bases tratadas.** Investigación Instituto mexicano del cemento y el concreto (IMCYC). México: 1991.
6. **Estudio en laboratorio del modulo de deformación de los hormigones compactados** (Sección Hormigón No. 695) Instituto español del cemento y sus aplicaciones (IECA), Barcelona, España: 1991. s.e.
7. Galizzi, Juan Augusto. **Hormigón compactado con rodillo estudio y aplicación en carreteras.** (Investigación), universidad nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Instituto del cemento Pórtland argentino. Argentina: 1987.
8. **Roller compacted concrete** Reported by ACI committee 207 EUA. Ed. 207.5R. 1980.
9. Son Petz, German Marco Antonio. Evaluación de la compactación y resistencia mecánica del concreto compactado con rodillo (CCR). Tesis Ing. Civil, Guatemala, universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1989.

ANEXO 1

MÉTODO DE PROCTOR MODIFICADO

PROCTOR AASHTO T - 180

Proctor modificado (AASHTO T-180 o ASTM D 1557) se compone de veinticinco golpes con un pisón que pesa 10 libras, cayendo de una altura de 18 pulgadas, en cada una de las cinco capas iguales de material colocado en un molde cilíndrico de 4 pulgadas de diámetro y 1/30 pie cúbico de capacidad. El esfuerzo es de 56,200 libras/pie por pie cúbico, que es comparable al que se obtiene con los equipos más pesados, en condiciones favorables de trabajo.

Si el suelo contiene muchas partículas mayores que las contenidas en el tamiz No.4, el cilindro tendrá 6 pulgadas de diámetro, a la misma altura y los golpes se aumentarán a 55 por cada capa.

En la mayoría de los suelos el peso específico máximo que se obtiene siguiendo el método modificado es de 3 a 6 libras por pie cúbico mayor que la que se obtiene por el método normal. Hay otros procedimientos para obtener la humedad óptima y el peso específico máximo, como los de presión estática y el de presiones de amasado, que representan mejor las condiciones de trabajo en la obra; sin embargo, su uso no se ha generalizado porque el equipo de prueba es más complicado y los resultados no son tan diferentes en muchos suelos, como para justificar el mayor costo.

Estas pruebas de laboratorio están limitadas a suelos con partículas de tamaño más fino que 2 cm. Para materiales más gruesos, como rocas partidas y gravas, es necesario hacer ensayos pilotos en obra a escala natural.

DESCRIPCIÓN MÉTODO DEL CONSISTOMETRO

V E B E

A continuación se presenta una descripción detallada del consistometro VeBe y en seguida la forma directa de realizar la prueba, como también el diagrama que muestra las partes más importantes del mismo.

- **Descripción**

Para el recipiente cilíndrico de metal (A) el diámetro interno y la altura serán de 240 ± 5 mm y 200 mm, respectivamente, (espesores: 3 mm y 7.5 mm para el fondo) deberá ser impermeable, suficientemente rígido, para conservar su forma bajo condiciones severas de uso, proveído de asas y protegido contra la corrosión. El recipiente deberá tener piezas adecuadas en la base para facilitar o permitir ser sujetado a la parte superior de la mesa vibradora por medio de tuercas-mariposa (H).

- **Molde**

El espécimen de prueba será formado en un molde hecho de metal que no sea atacado rápidamente por la pasta de cemento. El metal no deberá tener un espesor menor que 1.5 mm. El molde puede ser construido con o sin costura de unión. El interior deberá ser liso y libre de alteraciones tales como remaches y deberá en todo tiempo estar libre de abolladuras. El molde tendrá la forma de la superficie lateral de un pedazo de cono con:

- La base: 200 ± 2 mm de diámetro.
- La parte superior: 100 ± 2 mm de diámetro y,
- La altura 300 ± 2 mm.

La base y la parte superior deberán ser abiertas y paralelas una a la otra y en ángulos rectos a los ejes del cono. El molde deberá tener en la parte superior manijas en las dos terceras partes de la altura.

- **Disco**

Un disco transparente horizontal (C) estará ligado a una varilla (J) la cual resbala verticalmente a través de un tubo hueco (E) montado en un brazo giratorio (N) y puede ser fijado en posición por un tornillo (O). El brazo giratorio también para un embudo (D) la parte inferior del cual coloca sobre la parte superior del molde cónico cuando éste es colocado concéntricamente en el recipiente cilíndrico (A). El brazo giratorio está situado en un tubo (M) y puede ser fijado en posición por un tornillo (F). Cuando están en posición apropiada los ejes de la varilla y el embudo deberán coincidir con los ejes del recipiente cilíndrico.

El disco transparente deberá ser 230 ± 2 mm de diámetro y 10 ± 2 mm de espesor. Un peso (P) colocado, directamente; sobre el disco deberá proveerse, tal que el movimiento juntos, la varilla, disco y peso, tengan 2750 ± 50 gramos de peso. La varilla tendrá una escala que indique el asentamiento del concreto.

- **Mesa vibradora**

La mesa vibradora (G) deberá ser de 380 mm de largo y 260 mm de ancho y soportada sobre 4 amortiguadores de hule. La unidad vibradora (L) soportada sobre una base (K) descansa sobre 3 pies de hule deberá asegurarse, fijamente, bajo ella.

La mesa vibradora con el contenido completo deberá ser operada a una frecuencia de aproximadamente, 3,000 vibraciones por minuto, con una amplitud vertical de aproximadamente 0.5 mm.

- **Varilla apisonadora**

La varilla apisonadora deberá ser cilíndrica, de acero, recta, de diámetro 16 mm, 600 mm de longitud y con extremos redondeados.

- **Reloj o Cronómetro**

El reloj o cronómetro deberá ser capaz de dar lecturas con una exactitud de 0.5 segundos.

- **Procedimiento para hacer las pruebas**

Colocar el medidor VeBe, horizontalmente sobre una base rígida. Asegurarse que el recipiente (A) esté firmemente sujeto a la mesa vibradora (G) por medio de tuercas (H). Humedecer el cono (B) y colocarlo en el recipiente cilíndrico, colocar el embudo (D) encima del cono y deslizarlo hacia abajo sobre él. Apretar el tornillo (F) así, el cono no puede levantarse del fondo del recipiente cilíndrico. Vertido y compactado el concreto en el molde de asentamiento aflojar el tornillo (F), retornar el embudo a su posición original y proceder a nivelar el concreto en la parte superior del cono. Levantar el cono separándolo del concreto, usando las manijas.

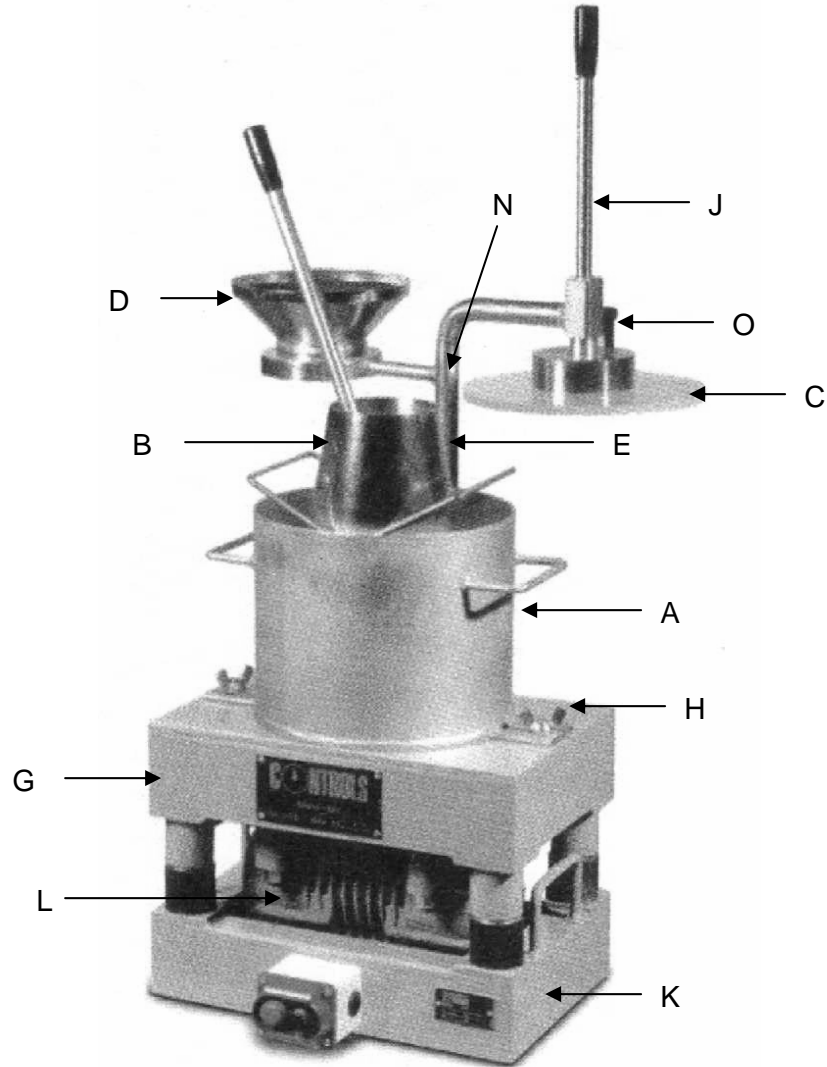
Suspender el disco transparente (C) sobre la parte superior del concreto, aflojar el tornillo (O) y muy, cuidadosamente, bajar el disco hasta llegar a tener contacto con el concreto, teniendo cuidado que el concreto asentado no esté en contacto con la pared del recipiente cilíndrico. El asentamiento del concreto puede ahora ser medido con la ayuda de una escala graduada en milímetros. Apretando el tornillo (F) al mismo tiempo chequeando que el tornillo (O) este flojo para que el disco transparente (C) pueda fácilmente deslizarse hacia abajo dentro del recipiente cilíndrico. Conectar la mesa vibradora, simultáneamente poner en funcionamiento un reloj o cronómetro. Obsérvese a través del disco como el concreto está siendo compactado. Tan pronto como la superficie inferior del disco transparente esté completamente cubierta por mortero, deténgase el reloj e interrúmpase la vibración.

- **Resultados del ensayo**

Registro del tiempo con el reloj con una aproximación de 0.5 segundos. Este es el tiempo VeBe expresando la consistencia de la mezcla con forme al ensayo.

El ensayo VeBe es el más adecuado para mezclas de concreto con un tiempo VeBe entre 5 y 30 segundos.

Figura 26. Esquema de un consistómetro VeBe



Fuente: **Instituto Colombiano de Productores de Cemento.** Notas técnicas Pág. 20.

- **Partes de un consistómetro VeBe**

A: Recipiente de metal

B: Cono

C: Disco transparente

D: Cono para colocación de mezcla

E: Tubo para brazo giratorio

F: Tornillo para tubo E

G: Mesa vibratoria

H: Tornillo fijación recipiente

J: Varilla para disco transparente

K: Base de metal

L: Generador de vibración

N: Brazo giratorio de disco y cono

ANEXO 2

TABLAS

Tabla VII **Concentración de pasta para resistencia y tamaño de agregado en mezclas de concreto hidráulico**

Resistencia media requerida a 28 días		Tamaño máximo agregado grueso		Concentracion de la pasta	
Kgs./Cm ²	Lbs./Plgs ²	mm.	Plgs.	W/c	C/w
140	2000	19.1	3/4"	0.65	1.54
		25.4	1"	0.65	1.54
		38.1	1 1/2"	0.65	1.54
175	2500	19.1	3/4"	0.60	1.67
		25.4	1"	0.60	1.67
		38.1	1 1/2"	0.60	1.67
210	3000	19.1	3/4"	0.56	1.79
		25.4	1"	0.56	1.79
		38.1	1 1/2"	0.56	1.79
245	3500	19.1	3/4"	0.52	1.92
		25.4	1"	0.52	1.92
		38.1	1 1/2"	0.52	1.92
280	4000	19.1	3/4"	0.49	2.04
		25.4	1"	0.49	2.04
		38.1	1 1/2"	0.49	2.04
315	4500	19.1	3/4"	0.46	2.17
		25.4	1"	0.46	2.17
		38.1	1 1/2"	0.46	2.17

Fuente: **Dirección General de Caminos.** Tablas para diseño de concreto hidráulico, publicación interna.

Tabla VIII **Cantidad de agua según asentamiento para resistencia y tamaño de agregado en mezclas de concreto hidráulico**

Resistencia media requerida a 28 días		Tamaño máximo agregado grueso		Cantidad de agua (Lts.) según asentamiento (cms.)			
Kgs./Cm ²	Lbs./Plgs ²	mm.	Plgs.	0 - 2	2 - 5	5 - 10	10 - 15
140	2000	19.1	3/4"	165.00	175.00	186.00	197.00
		25.4	1"	157.00	165.00	173.00	181.00
		38.1	1 1/2"	154.00	160.00	173.00	193.00
175	2500	19.1	3/4"	165.00	175.00	186.00	197.00
		25.4	1"	157.00	165.00	173.00	181.00
		38.1	1 1/2"	154.00	160.00	166.00	193.00
210	3000	19.1	3/4"	164.00	174.00	184.00	195.00
		25.4	1"	156.00	164.00	172.00	180.00
		38.1	1 1/2"	154.00	160.00	166.00	191.00
245	3500	19.1	3/4"	164.00	174.00	184.00	195.00
		25.4	1"	156.00	164.00	172.00	180.00
		38.1	1 1/2"	154.00	160.00	166.00	191.00
280	4000	19.1	3/4"	162.00	172.00	182.00	193.00
		25.4	1"	155.00	163.00	171.00	179.00
		38.1	1 1/2"	154.00	160.00	166.00	189.00
315	4500	19.1	3/4"	162.00	172.00	182.00	193.00
		25.4	1"	155.00	163.00	171.00	179.00
		38.1	1 1/2"	154.00	160.00	166.00	189.00

Fuente: **Dirección General de Caminos.** Tablas para diseño de concreto hidráulico, publicación interna.

Tabla IX **Porcentaje de agregado fino según módulo de finura para resistencia y tamaño de agregado en mezclas de concreto hidráulico**

Resistencia media requerida a 28 días		Tamaño máximo agregado grueso		Porcentaje de agregado fino		
				M. F.	M. F.	M. F.
Kgs./Cm ²	Lbs./Plgs ²	mm.	Plgs.	2.2 - 2.6	2.6 - 2.9	2.9 - 3.2
140	2000	19.1	3/4"	47.00	49.00	51.00
		25.4	1"	44.00	46.00	48.00
		38.1	1 1/2"	42.00	44.00	46.00
175	2500	19.1	3/4"	45.00	47.00	49.00
		25.4	1"	42.00	44.00	46.00
		38.1	1 1/2"	40.00	42.00	44.00
210	3000	19.1	3/4"	44.00	46.00	48.00
		25.4	1"	41.00	43.00	45.00
		38.1	1 1/2"	39.00	41.00	43.00
245	3500	19.1	3/4"	42.00	44.00	46.00
		25.4	1"	39.00	41.00	43.00
		38.1	1 1/2"	37.00	39.00	41.00
280	4000	19.1	3/4"	40.00	42.00	44.00
		25.4	1"	37.00	39.00	41.00
		38.1	1 1/2"	35.00	37.00	39.00
315	4500	19.1	3/4"	38.00	40.00	42.00
		25.4	1"	35.00	37.00	39.00
		38.1	1 1/2"	33.00	35.00	37.00

Fuente: **Dirección General de Caminos.** Tablas para diseño de concreto hidráulico, publicación interna.

Tabla X **Porcentaje de aire en la mezcla para resistencia y tamaño de agregado en mezclas de concreto hidráulico**

Resistencia media requerida a 28 días		Tamaño máximo agregado grueso		Porcentaje de aire en la mezcla		
				M. F.	M. F.	M. F.
Kgs./Cm ²	Lbs./Plgs ²	mm.	Plgs.	2.2 - 2.6	2.6 - 2.9	2.9 - 3.2
140	2000	19.1	3/4"	4.80	4.90	5.00
		25.4	1"	4.40	4.50	4.60
		38.1	1 1/2"	4.00	4.10	4.20
175	2500	19.1	3/4"	4.30	4.40	4.50
		25.4	1"	3.70	3.80	3.90
		38.1	1 1/2"	3.30	3.40	3.50
210	3000	19.1	3/4"	3.60	3.70	3.80
		25.4	1"	3.00	3.10	3.20
		38.1	1 1/2"	2.60	2.70	2.80
245	3500	19.1	3/4"	3.10	3.20	3.30
		25.4	1"	2.30	2.40	2.50
		38.1	1 1/2"	1.90	2.00	2.10
280	4000	19.1	3/4"	2.60	2.70	2.80
		25.4	1"	2.00	2.10	2.20
		38.1	1 1/2"	1.60	1.70	1.80
315	4500	19.1	3/4"	2.40	2.50	2.60
		25.4	1"	1.70	1.80	1.90
		38.1	1 1/2"	1.40	1.50	1.60

Fuente: **Dirección General de Caminos.** Tablas para diseño de concreto hidráulico, publicación interna.