

T
624.1834
H06
C-2



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

“Adición de Ceniza de Cascarilla de Arroz en Hormigón Compactado con Rodillo ”

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

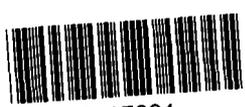
INGENIERO CIVIL

Presentada por:

Javier Eduardo Molina Salinas

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año 2002



D-27391

AGRADECIMIENTO



A todas las personas que de uno u otro modo colaboraron en el desarrollo de este trabajo y de manera especial al Ing. Hugo Egüez, Director de Tesis y al Ing. José Camposano, Director del CTH, por su invaluable ayuda.

DEDICATORIA

A DIOS

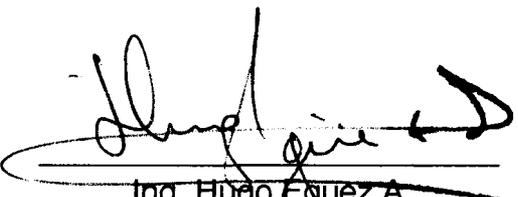
A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

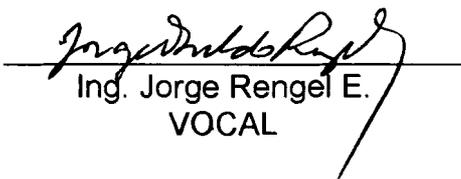
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Ing. Edison Navarrete C.
DECANO DE LA FICT
PRESIDENTE



Ing. Hugo Eguéz A.
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Jorge Rengel E.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

Javier Molina Salinas

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla la “Adición de Ceniza de Cascarilla de Arroz (CCA) en el Hormigón Compactado con Rodillo (HCR vial) ”, teniendo la finalidad de demostrar que la CCA como material cementante de adición mejora las propiedades del HCR, sin costos elevados ya que se trata de un producto de desecho agrícola.

En su primera parte se revisan todos los conceptos básicos acerca del HCR, luego se hace un breve recuento acerca del desarrollo histórico de este tipo de concreto alrededor del mundo. Posteriormente se dan a conocer las características principales de los materiales utilizados en las pruebas realizadas dentro de este trabajo.

Luego se realizaron adiciones de CCA en diferentes porcentajes (4%, 8%, 12%, 16%, 20%) en un diseño patrón de HCR elaborado con cemento puzolánico INEN IP, que fue elegido de entre seis modelos diferentes. El parámetro que influyó en la elección fue el máximo valor de densidad seca.

Para observar el comportamiento mecánico del HCR con adición de CCA, se evaluaron algunas de sus propiedades como son: densidad seca máxima, resistencia a la compresión simple, tracción por compresión diametral y trabajabilidad, considerando en cada caso los porcentajes de adición antes mencionados.

Como resultado se determinó que la mezcla elaborada con el 4% de CCA utilizada como adición, presentó los mejores resultados de trabajabilidad y resistencia mecánica, manteniendo similares valores de densidad seca que los obtenidos con el hormigón patrón escogido.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	II
ÍNDICE GENERAL	IV
ABREVIATURAS	VIII
SIMBOLOGÍA	IX
PRÓLOGO	1
CAPÍTULO 1	
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Definición del Hormigón Compactado con Rodillo (HCR vial)	3
1.2. Principales Características del HCR	4
1.3. Ventajas y limitaciones de su uso	5
1.4. Aplicaciones actuales y perspectivas futuras	7
CAPÍTULO 2	
2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL HCR EN EL PAÍS Y EL MUNDO	9
2.1. Desarrollo histórico	9
2.2. Experiencias en otros países y su comportamiento	11

CAPÍTULO 3	Pág.
3. DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES UTILIZADOS	15
3.1. Cemento Puzolánico IP	16
3.2. Ceniza de Cascarilla de Arroz	19
3.3. Agregados Gruesos	21
3.4. Agregados Finos	23
3.5. Aditivo	24
CAPÍTULO 4	
4. PRUEBAS PRELIMINARES	26
4.1. Realización de pruebas utilizando el Ensayo de Compactación Proctor Modificado, con el fin de obtener el diseño patrón	26
4.1.1. Tablas de dosificaciones preliminares	27
4.1.2. Gráficos de los ensayos Proctor preliminares	30
4.1.3. Resúmenes de densidades, humedad óptima y relación A/C de las mezclas preliminares	33
4.1.4. Análisis de pruebas preliminares	34
4.2. Realización de pruebas utilizando el Ensayo de Compactación Proctor Modificado, con el efecto de adición de CCA en diferentes porcentajes	35
4.2.1. Gráficos de los ensayos Proctor con la adición de CCA	36

	Pág.
4.2.2. Resúmenes de densidades, humedad óptima, relación A/C, relación A/(C+CCA) de las mezclas con adición de CCA	38
4.3. Análisis de resultados preliminares	40

CAPÍTULO 5

5. OBTENCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE

Y TRACCIÓN POR COMPRESIÓN DIAMETRAL	42
5.1. Valores de resistencia a la compresión simple para mezclas con adición de CCA	43
5.2. Valores de Tracción por Compresión Diametral para mezclas con adición de CCA	44
5.3. Gráficas de los ensayos de resistencia a la compresión simple y tracción por compresión diametral	45
5.4. Análisis de resultados	48

CAPÍTULO 6

6. TRABAJABILIDAD DEL HCR Y EL EFECTO DE LA ADICIÓN

DE CCA	49
6.1. Comparación de la Trabajabilidad entre mezclas de HCR	50
6.2. Gráficos obtenidos a partir de los ensayos de trabajabilidad	51
6.3. Análisis de resultados	52

	Pág.
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	53
APÉNDICES	55
BIBLIOGRAFÍA	64

ABREVIATURAS

CCA	Ceniza de Cascarilla de Arroz
cm	Centímetro
dm ³	decímetro cúbico
HCR	Hormigón Compactado con Rodillo
Kg/m ³	Kilogramo por metro cúbico
m	Metro lineal
mm	Milímetro
m ² /Kg	Metro cuadrado por Kilogramo
min	Minuto
MPa	MegaPascal
TCD	Tracción por Compresión Diametral



SIMBOLOGIA

°C
μm

Grado centígrado
Micrómetro

PRÓLOGO

El presente trabajo trata de la "Adición de Ceniza de Cascarilla de Arroz (CCA) en el Hormigón Compactado con Rodillo (HCR vial)", enfocado a la utilización de la CCA como material cementante de adición con el fin de mejorar las propiedades del HCR.

La materia prima necesaria (CCA) para realizar nuestro trabajo, se la obtiene a partir de un desecho agrícola abundante en el medio y sin costo alguno, como es la cascarilla de arroz.

En este estudio se analizó la adición de CCA en diferentes porcentajes (4%, 8%, 12%, 16%, 20%) en un diseño patrón de HCR, considerando parámetros como densidad seca máxima, resistencia a la compresión simple, tracción por compresión diametral y trabajabilidad, los mismos que luego de ser evaluados mediante los ensayos correspondientes fueron comparados con los obtenidos con la mezcla patrón.

Este trabajo aporta información específica sobre las dosificaciones empleadas y datos sobre ensayos realizados sobre probetas de hormigón a edades de 3, 7, 14, 28, 90 días.

Los resultados logrados con este trabajo, promueven el uso de la CCA como material cementante de adición en la construcción de pavimentos de HCR y a la realización de investigaciones futuras.

CAPITULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Definición del hormigón compactado con rodillo (HCR vial).

El hormigón compactado con rodillo es un concreto de revenimiento nulo, con un contenido de agua suficiente como para poder compactarlo en el lugar requerido por medio de equipo con rodillos vibratorios o de consolidación. El mezclado se lo realiza por medio de mezcladores convencionales, o en algunas ocasiones en camiones mezcladores de tambor basculante, transportado a obra en camiones volcadores convencionales, colocado y compactado con el equipo usado en la construcción de pavimentos asfálticos. La compactación con rodillos vibratorios es de gran aporte a la estructura del hormigón, mientras que la utilización de rodillos neumáticos ayuda al acabado superficial.

Este tipo de hormigón se ha ido desarrollando con el transcurso del tiempo como una alternativa rápida y económica en el campo vial, es decir, tiene aplicación en una amplia área de la ingeniería civil: rutas, calles, aeropuertos, estacionamientos. Se trata de un hormigón que una vez endurecido presenta características similares o superiores a las de los concretos convencionales vibrados, pero con la ventaja de poder utilizar el equipo constructivo de pavimentos asfálticos con los cuales se consiguen rendimientos muy superiores a los obtenidos en una ejecución entre encofrados (4).

1.2. Principales características del HCR.

A continuación se detallan algunas de las más importantes características del hormigón compactado con rodillo para utilización vial:

- Tiene consistencia dura.
- No tiene asentamiento en el cono de Abrams.
- El tamaño máximo del agregado grueso a utilizarse no deberá de superar los 19 mm con el objeto de evitar segregaciones, facilitar el mezclado y mejorar la regularidad superficial.

- Para su aplicación se requiere de una buena sub-base, a fin de disponer de un apoyo seguro que permita al equipo lograr compactar adecuadamente el hormigón y alcanzar el objetivo de una máxima densificación.
- El hormigón compactado con rodillo es una inmejorable solución para reemplazar pavimentos asfálticos, puesto que ofrece un tiempo de vida útil mayor, disponiendo además de una gran capacidad estructural, durabilidad y elevada densidad del material una vez compactado, todo lo cual se resume en una gran resistencia mecánica.

1.3. Ventajas y limitaciones de su uso.

Una de las principales ventajas que ofrece el uso de HCR vial, es que no se necesitan equipos especiales para su construcción, pudiendo emplearse maquinarias empleadas en pavimentos asfálticos. Además, las reducidas exigencias en cuanto a mano de obra y ritmos de construcción, se resumen en ahorros considerables en comparación con otros métodos constructivos. Adicionalmente a esto, hay que destacar que los pavimentos de HCR vial ofrecen una apertura inmediata al tráfico, debido a la estabilidad del esqueleto

de los áridos luego de la compactación (4). Otras ventajas son detalladas a continuación:

- Economía en cemento. La gran compactación lograda con los rodillos vibratorios, hace que el HCR tenga mayor resistencia que un hormigón convencional con igual contenido de cemento, existiendo un ahorro importante en el consumo de cemento por metro cúbico.
- Velocidad de construcción. La gran eficiencia en mezclado y construcción hace que la velocidad de avance y ejecución de obra sea 2 y 3 veces superior a los pavimentos de hormigón convencional y pavimentos asfálticos.
- Mayor resistencia a la fatiga por flexión. Un pavimento de HCR tiene mejor comportamiento a la fatiga por flexión que un hormigón convencional de igual resistencia. Esto conlleva a la reducción de espesores de losa y por tanto un ahorro en el volumen de concreto utilizado
- Pueden utilizarse agregados locales y marginales.
- Reducción o eliminación de juntas.
- No necesita utilizarse formaletas o armaduras.

- Bajo costo de mantenimiento.

Así mismo, el HCR vial presenta ciertas limitaciones en su uso. Por ejemplo, las variaciones en la humedad y la compactación inadecuada tienen mucho que ver con el comportamiento final de este tipo de concretos (resistencia mecánica, durabilidad, trabajabilidad). Para carreteras de alta velocidad, aún no se ha conseguido una regularidad superficial satisfactoria, recurriendo en este caso a la colocación de una capa de asfalto encima del HCR logrando así el acabado adecuado (4).

1.4. Aplicaciones actuales y perspectivas futuras.

- Pavimentos urbanos, rurales, de montaña, etc.
- Pavimentos resistentes al desgaste para aplicaciones industriales.
- Pavimentos para vehículos pesados, playas de estacionamiento y sendas peatonales.
- Pavimentos de tránsito rápido (con acabado asfáltico).
- Bacheos
- Pistas de aeropuertos secundarios.

- Playas de estacionamiento de aviones, a prueba de huellas y combustibles derramados.
- Técnica en desarrollo, debe poder superarse el problema de regularidad superficial y controlarse mejor las fisuras (4).

CAPITULO 2

2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO EN EL PAÍS Y EL MUNDO.

2.1 Desarrollo histórico.

Los pavimentos de HCR no constituyen en absoluto una nueva técnica en la construcción de carreteras, de hecho mientras en Escocia en 1865 aparecía el primer pavimento de HCR, los concretos vibrados no aparecieron sino hasta 50 años más tarde. De esta forma, los pavimentos de hormigón compactado surgieron en varios países antes de la Primera Guerra Mundial; con la aparición de las técnicas de vibración del concreto, se abandonó el uso de los hormigones compactados ya que los equipos y técnicas empleados no aseguraban una calidad similar a la obtenida por medio de la vibración. Es así como los concretos vibrados ganaban espacio rápidamente en varios campos de la ingeniería civil, mientras que los

hormigones compactados se utilizaban en el tratamiento de bases con cemento.

Los primeros ejemplos modernos de pavimentos de hormigón compactado con rodillo que se conocen se construyeron en España en 1970, en vías de baja intensidad de tráfico. En lo que se refiere a las aplicaciones para tráfico pesado, Canadá empezó su empleo en 1976, en pavimentos para industrias forestales. Después de 1980 al menos diez países más (Francia, USA, Noruega, Suecia, Finlandia, Dinamarca, Alemania, Australia, Argentina, Japón) han construido cada uno de ellos más de 100 000 m² de pavimentos de hormigón compactado y, en menor escala, otros nueve países (Chile, Uruguay, México, Venezuela, Colombia, Islandia, Eslovenia, Nueva Zelanda y Sudáfrica) han utilizado HCR de forma más escasa, en algunos casos solamente en tramos de ensayo (como ha sucedido en el Ecuador) (4).

Al principio de la generalización en el uso del HCR (1980) se construía una capa de hormigón pobre compactado y se la recubría con una carpeta asfáltica de entre 5 y 7.5 cm. Posteriormente se empezó a dejar el HCR expuesto sin recubrimiento alguno, lo cual requiere un acabado superficial óptimo para evitar imperfecciones



que dificulten el tráfico de alta velocidad. De igual forma existe una técnica intermedia entre las dos mencionadas, que consiste en liberar al tránsito el pavimento de HCR sin protección y luego de 3 a 6 meses recubrir la superficie del mismo con una delgada capa de asfalto de 2.5 cm de espesor. Este último procedimiento fue probado experimentalmente en un tramo de acceso al Campus de la ESPOL (Guayaquil) con excelentes resultados a corto y largo plazo.

Actualmente se está empleando el HCR en autopistas y carreteras principales de varios países del mundo, disponiendo una capa de rodadura asfáltica encima de la del concreto para mejorar su regularidad superficial. En cuanto a la apertura al tráfico, en la mayoría de los casos se lo hace inmediatamente después de haber finalizado la compactación para lo cual se utilizan áridos de machaqueo que permiten obtener la estabilidad necesaria luego de la compactación. Sin embargo, en EE.UU., Canadá y Australia no permiten la circulación vehicular sobre el pavimento de concreto compactado en un intervalo de entre 3 y 14 días (4).

2.2 Experiencias en otros países y su comportamiento.

En nuestro país, la ejecución de pavimentos de hormigón compactado con rodillo aún no ha logrado expandirse de gran

manera dentro de la ingeniería civil, por lo que no se tiene suficiente información a largo plazo de su comportamiento. Por esta razón nos basamos en las experiencias acumuladas de otros países en la construcción de concretos compactados con rodillo.

Por ejemplo, si bien es cierto que se ha limitado el tamaño de los agregados gruesos a 19 mm, en España se han utilizado áridos de hasta 38 mm en vías de baja intensidad de tráfico, en donde la regularidad superficial no juega un papel importante (velocidades inferiores a 60 Km/h). En varios países (Francia, España, Brasil, Argentina, Australia, EE.UU., Canadá, etc) se emplean curvas de límites granulométricos dentro de las cuales debe estar la correspondiente a la granulometría de cada árido, recomendando utilizar proporciones elevadas de materiales de machaqueo que proporcionarán estabilidad al concreto recién compactado.

En Dinamarca se empezaron a utilizar un tipo de terminadoras que proporcionan una elevada precompactación en mezclas muy secas. Esta técnica permite que sea innecesario el paso posterior de rodillos, obteniendo la regularidad superficial necesaria para soportar tráfico de alta velocidad; además tiene mucha aceptación en varios



países en los cuales se está empleando últimamente y promete seguir desarrollando y expandiéndose.

La aparición de los pavimentos de concreto compactado con rodillo como una alternativa de construcción ha involucrado su acelerado desarrollo en países que han visto su comportamiento satisfactorio. Es así como se han empezado a utilizar cenizas volantes como adiciones activas, llegando éstas a alcanzar altos porcentajes con respecto al contenido de cemento (3).

La utilización de este tipo de adiciones ha producido cierto retraso en el proceso de fraguado y por consiguiente aumento en el plazo de ejecución. Su empleo está restringido en zonas con inviernos severos, no así el humo de sílice el mismo que ha permitido alcanzar altas resistencias y mayor durabilidad del hormigón.

De manera general, el comportamiento de los pavimentos de hormigón compactado en todos los tipos de aplicaciones que han tenido alrededor del mundo, ha sido muy satisfactorio. Tan sólo se pueden mencionar ciertas imperfecciones en el proceso constructivo debidas a pérdidas de humedad ó una compactación defectuosa y problemas asociados a separaciones excesivas de las juntas, sobre

todo en el caso de pavimentos recubiertos con capas asfálticas. Por ello en España se recomienda una distancia entre juntas de 2.5 a 3.5m solucionando en gran medida el problema de reflexión de grietas, incluso en condiciones climáticas y de tráfico muy severas (4).

CAPITULO 3

3. DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES UTILIZADOS.

Las propiedades del hormigón compactado con rodillo dependen en gran parte de la estructura del mismo, es decir, de los materiales que lo conforman. En nuestro país existe una amplia variedad de materiales (que cumplen las especificaciones señaladas en las normas técnicas internacionales), útiles para la fabricación de este tipo de concretos de acuerdo a los requerimientos constructivos. Por ello es importante conocer las características de los materiales utilizados en las diferentes dosificaciones mencionadas, como se lo hace a continuación.

3.1 Cemento puzolánico IP.

Un material cementante es aquel que tiene las propiedades de adhesión y cohesión necesarias para unir agregados inertes y conformar una masa sólida de resistencia y durabilidad.

El cemento Portland Puzolánico es una mezcla de cemento Portland tipo I (ASTM C 150) y puzolanas artificiales o naturales (que no sean escoria de alto horno) en una proporción que varía del 15% al 40%. Básicamente un cemento Portland es un material grisáceo finamente pulverizado que está constituido por óxidos metálicos de Magnesio, Aluminio, Hierro, Sílice, yeso y porcentajes residuales menores al 2%, como se puede apreciar a continuación:

Oxido de Calcio	60%-66%
Oxido de Magnesio	0% - 5%
Oxido de Aluminio	3% - 8%
Oxido de Hierro	1% - 5%
Oxido de Sílice	19%-25%
Trióxido de Azufre	1% - 3%

Esta composición es muy común en nuestro país y lo fabrican algunas industrias cementeras nacionales. Es de uso general,

adecuado para aplicaciones en que no se requieran propiedades especiales, donde el cemento o el concreto no esté sujeto al ataque de factores específicos como a los sulfatos o elevaciones perjudiciales de temperatura debido al calor generado en la hidratación. Entre sus usos se incluyen pavimentos y aceras, puentes, edificios de concreto reforzado, tuberías para agua, etc.

Los materiales puzolánicos que comúnmente se encuentran son: ceniza volcánica, pumicita, arcillas quemadas, cenizas volantes, esquistos de opalina.

La puzolana adherida al cemento en el proceso de hidratación liga químicamente el hidróxido de calcio que es soluble en el agua y que se desprende durante el endurecimiento del cemento Portland.

En la tabla 3.1 (6) se muestra la composición química común del cemento Rocafuerte Portland IP, mientras que en la tabla 3.2 (6) se detallan las características físicas del mismo cemento.

Tabla 3.1**Composición Química del Cemento Rocafuerte Portland IP (6)**

SiO ₂	28.4 %
Al ₂ O ₃	5.9 %
Fe ₂ O ₃	2.6 %
CaO	52.7 %

Tabla 3.2**Características Físicas del Cemento Rocafuerte Portland IP (6)**

RESISTENCIAS	1 día	9.6 MPa
	3 días	20.6 MPa
	7 días	26.8 MPa
	28 días	36 MPa
BLAINE		442 m ² /Kg
RETENIDO TAMIZ # 325		12.6 %
FRAGUADO INICIAL		220 min
FRAGUADO FINAL		332 min
PERDIDA AL FUEGO		4.3 %

3.2 Ceniza de cascarilla de arroz (CCA).

La cascarilla de arroz es un material de desecho agrícola, que representa alrededor del 20% de la producción mundial de arroz. Cada tonelada de arroz produce aproximadamente 200 Kg de cascarilla que posteriormente originan 40 Kg de ceniza que puede ser obtenida por combustión a campo abierto o combustión controlada (1).

Antes del año 1970, la cascarilla de arroz era quemada en forma incontrolada y generalmente la ceniza producida era muy pobre en puzolanas. En hornos industriales se obtiene del 90% al 95% de sílice. Si la combustión es a campo abierto se obtiene sílice cristalina no reactiva en gran cantidad, la misma que debe de ser llevada a tamaño pequeño para que así logren desarrollar actividad puzolánica. Es así como luego del año 1973 aparecieron técnicas para controlar la combustión de este desecho agrícola, logrando como resultado una ceniza altamente reactiva, la misma que puede ser producida por combustión controlada cuidando que la sílice, sea producida en forma no cristalina y en estructura celular, para esto se necesita una incineración controlada de 500°C a 700°C, a fin de obtener una ceniza altamente puzolánica (5).

La CCA utilizada en las pruebas de este trabajo de investigación fue obtenida en las piladoras de Daule, en dicho lugar se la encuentra en grandes cantidades sin costo alguno. En la tabla 3.3 (1), se muestran las propiedades físicas de la ceniza de cascarilla de arroz y en la tabla 3.4 (1) la composición química.

Tabla 3.3

Propiedades Físicas de la Ceniza de Cascarilla de arroz (1)

Propiedades	Valores
Masa Unitaria Compacta	452 Kg/m ³
Masa Unitaria Suelta	181 Kg/m ³
Densidad	2265 Kg/m ³
Superficie Específica Blaine	2000 m ² /Kg
Tamaño promedio de partículas (5)	7µm

Tabla 3.4

Composición Química de la Ceniza de Cascarilla de Arroz (1)

Cloro	0.05%
TiO ₂	0.05%
P ₂ O ₅	0.41%
SiO ₂	94.10%
Al ₂ O ₃	0.12%
F ₂ O ₃	0.30%
CaO	0.55%
MgO	0.95%
K ₂ O	2.10%
Na ₂ O	0.11%
SO ₃	0.06%
P.P. Cal.	1.10%



3.3 Agregados Gruesos.

Agregado grueso es todo material que no pasa por el tamiz # 4, es decir, un tamiz con 4 aberturas por pulgada lineal. Para realizar las investigaciones correspondientes a este trabajo se utilizaron como agregados gruesos la piedra de 19.5 mm y la piedra de 12.5 mm los mismos que cumplen con la norma ASTM C-33.

La piedra de 19.5 mm es un producto para la preparación de hormigones de alta resistencia: es una caliza triturada compacta, de forma cúbico angular. Utilizada en la preparación de hormigones,

CIB ESPOL

derivados de alta resistencia y asfaltos. Tiene las siguientes propiedades físicas (2):

- Masa Unitaria: 1380 Kg/m³.
- Densidad: 2430 Kg/m³.
- Absorción: 2%.
- Abrasión: Desgaste "Los Angeles": 22%.

La piedra de 12.5 mm es una caliza triturada, compacta de poca porosidad, muy granular y de forma cúbica angular. Utilizada en la preparación de hormigones, derivados de alta resistencia y asfaltos. Tiene las siguientes propiedades físicas (2):

- Masa Unitaria: 1400 Kg/m³.
- Densidad: 2640 Kg/m³.
- Absorción: 3%.
- Abrasión: Desgaste "Los Angeles": 23%.

3.4 Agregados Finos.

Agregado fino o arena es un material pétreo que pasa el tamiz # 4. Para realizar las investigaciones correspondientes a este trabajo se utilizaron como agregados finos la arena natural de río y la arena triturada, y cumplen con la norma ASTM C-33.

La arena natural de río es un árido lavado de toda impureza. Utilizada para la elaboración de hormigones y derivados de alta resistencia; morteros de calidad y para asfaltos. Tiene las siguientes propiedades físicas (2):

- Masa Unitaria: 1580 Kg/m³.
- Densidad: 2600 Kg/m³.
- Absorción: 3%.
- Abrasión: Desgaste "Los Angeles": 24%.
- Módulo de Finura: 2.30 ± 0.10 .

La arena triturada es una caliza de forma cúbico-angular. Es un árido lavado de toda impureza. Utilizada para la elaboración de hormigones, derivados de alta resistencia y para asfaltos. Tiene las siguientes propiedades físicas (2):

- Masa Unitaria: 1580 Kg/m³.
- Densidad: 2600 Kg/m³.
- Absorción: 3%.
- Módulo de Finura de 4.40 ± 0.20.
- Abrasión: Desgaste "Los Angeles": 24%.

3.5 Aditivo.

Aditivos, son aquellas sustancias o productos que incorporados al hormigón, mortero o pasta o durante el amasado y/o durante un amasado suplementario en una proporción no superior al 5% del peso del cemento (salvo en casos especiales) producen la modificación deseada en dicho hormigón, mortero o pasta en estado fresco y/o endurecido, de alguna de sus características, de sus propiedades habituales o de su comportamiento.

El aditivo utilizado en las diferentes pruebas de este trabajo es un aditivo plastificante denominado ROCA-PR. Los aditivos plastificantes son sustancias químicas que modifican las propiedades

reológicas del hormigón fresco, el mortero o pasta, tales como la trabajabilidad, la relación agua/cemento, la fluidez, el fraguado, etc.

Los aditivos plastificantes presentan en su composición química una base específica que será la que los diferencie para sus respectivas formulaciones. En el caso del aditivo ROCA-PR se trata del producto Lignosulfonato de Calcio, que es una sal sulfonada metálica obtenida a partir de la lignina de los licores de sulfito resultante del subproducto del proceso de elaboración de la pulpa de papel.

El lignosulfonato de calcio actúa sobre el hormigón fresco retardando el tiempo de fraguado debido a la formación de una capa protectora en la superficie de los gránulos del solvente, la cual disminuye la velocidad de las reacciones de hidratación iniciales. Además se menciona el efecto de modificar las propiedades reológicas del hormigón ya que el lignosulfonato de calcio actúa fijándose en la superficie de los gránulos de cemento que conduce a obtener un hormigón de consistencia plástica (7).

CAPITULO 4

4. PRUEBAS PRELIMINARES.

4.1. Realización de pruebas utilizando el Ensayo de Compactación Proctor Modificado, con el fin de obtener el diseño patrón.

En la ejecución de pavimentos de HCR, especial atención tiene el proceso de compactación ya que lo que se busca es obtener una máxima densificación, que posteriormente se traduce en un excelente comportamiento mecánico. La densidad alcanzada dependerá en gran medida de los materiales utilizados, su selección adecuada, su proporción dentro de la mezcla y una adecuada relación Agua/Cemento.

Es por ello que para elegir la mezcla patrón en torno a la cual se realizaron los estudios centrales de este trabajo, se revisaron previamente seis diseños diferentes de hormigón compactado con rodillo, los mismos que se indican a continuación.

4.1.1. Tablas de dosificaciones preliminares.



Tabla 4.1

Mezcla # 1

Dosificación	(Kg/m ³)	Contenido de agregados
Cemento	330	
Piedra TM 19.5 mm	0	0%
Piedra TM 12.5 mm	1160	56%
Arena triturada	340	16%
Arena de río	580	28%
Agua	165	
Roca PR 1%		
Relación Ag. Grueso-Ag. Fino: 56%-44%		

Tabla 4.2

Mezcla # 2

Dosificación	(Kg/m ³)	Contenido de agregados
Cemento	315	
Piedra TM 19.5 mm	0	0%
Piedra TM 12.5 mm	840	41%
Arena triturada	300	15%
Arena de río	905	44%
Agua	151	
Roca PR 1%		
Relación Ag. Grueso-Ag. Fino: 41%-59%		



Tabla 4.3**Mezcla # 3**

Dosificación	(Kg/m³)	Contenido de agregados
Cemento	330	
Piedra TM 19.5 mm	580	30%
Piedra TM 12.5 mm	385	20%
Arena triturada	240	38%
Arena de río	725	12%
Agua	163	
Roca PR 1%		
Relación Ag.Grueso-Ag.Fino: 50%-50%		

Tabla 4.4**Mezcla # 4**

Dosificación	(Kg/m³)	Contenido de agregados
Cemento	330	
Piedra TM 19.5 mm	0	0%
Piedra TM 12.5 mm	875	45%
Arena triturada	800	41%
Arena de río	265	14%
Agua	158	
Roca PR 1%		
Relación Ag.Grueso-Ag.Fino: 45%-55%		

Tabla 4.5**Mezcla # 5**

Dosificación	(Kg/m³)	Contenido de agregados
Cemento	330	
Piedra TM 19.5 mm	0	0%
Piedra TM 12.5 mm	1042	55%
Arena triturada	213	11%
Arena de río	640	34%
Agua	158	
Roca PR 1%	3	
Relación Ag.Grueso-Ag.Fino: 55%-45%		

Tabla 4.6**Mezcla # 6**

Dosificación	(Kg/m³)	Contenido de agregados
Cemento	330	
Piedra TM 19.5 mm	606	32%
Piedra TM 12.5 mm	190	10%
Arena triturada	436	23%
Arena de río	663	35%
Agua	158	
Roca PR 1%	3	
Relación Ag.Grueso-Ag.Fino: 42%-58%		

Una vez conocidas estas dosificaciones, se realizaron pruebas utilizando el ensayo de Compactación Proctor Modificado (ASTM D 1557 Procedimiento C) para luego determinar la mezcla patrón con la cual se investigó el efecto de la adición de CCA en algunas de las propiedades del HCR .

Utilizando las proporciones adecuadas de los materiales en cada caso, se obtuvieron de las pruebas realizadas varios resultados que se simplifican y se muestran en las gráficas 4.1 a 4.6, y en las tabla 4.7 a 4.9 se indican los valores correspondientes a densidad seca máxima, densidad húmeda máxima, humedad óptima (%) y la relación Agua/Cemento adecuada:

4.1.2. Gráficos de los ensayos Proctor preliminares.

Gráfico 4.1

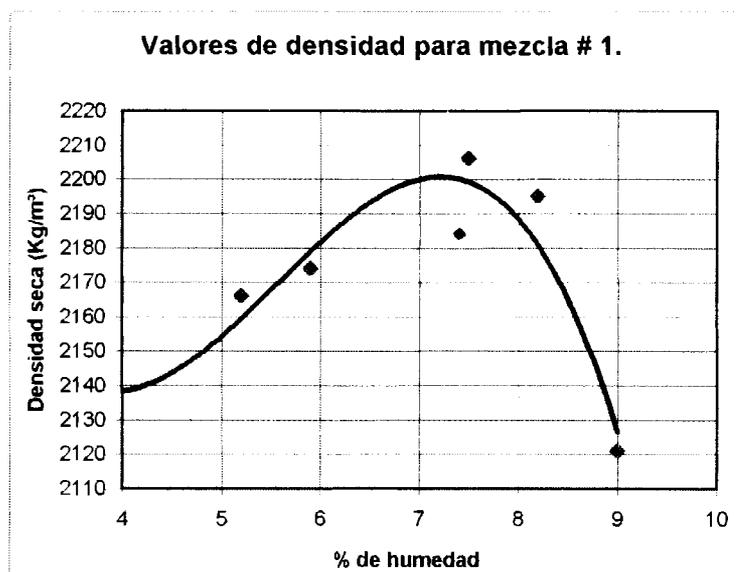


Gráfico 4.2

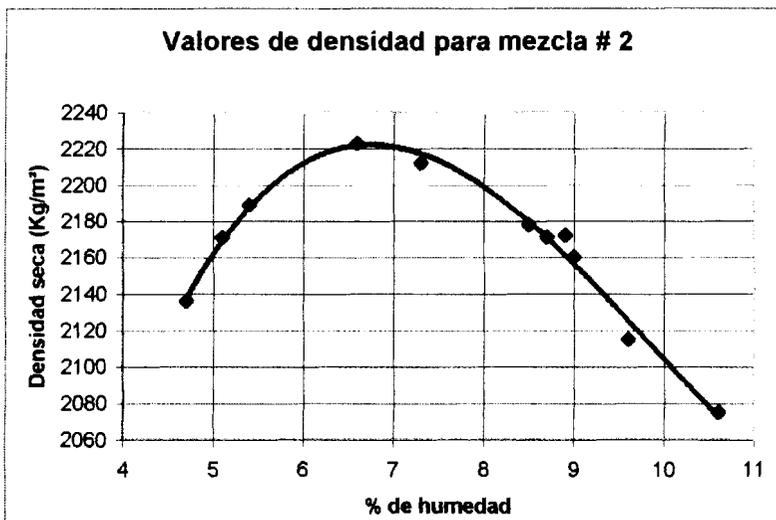


Gráfico 4.3

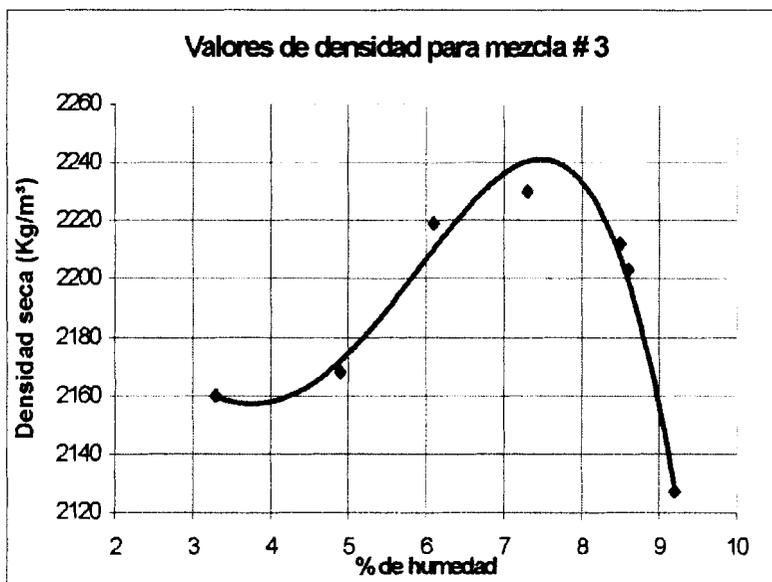


Gráfico 4.4

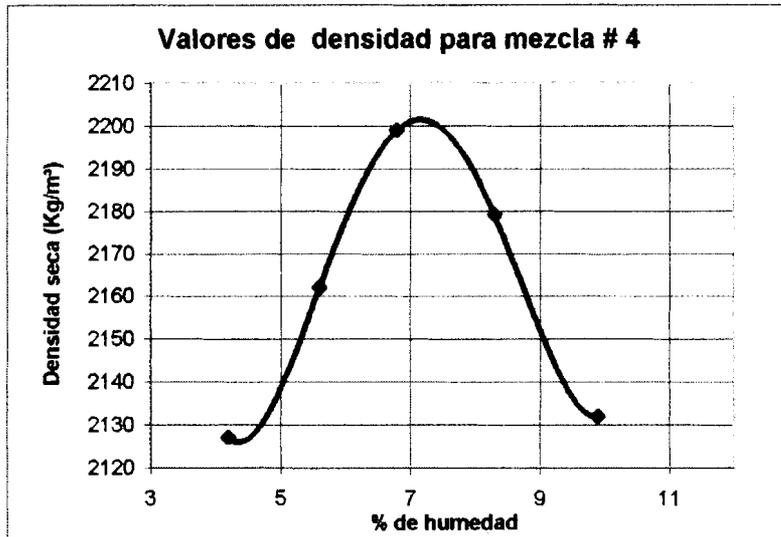


Gráfico 4.5

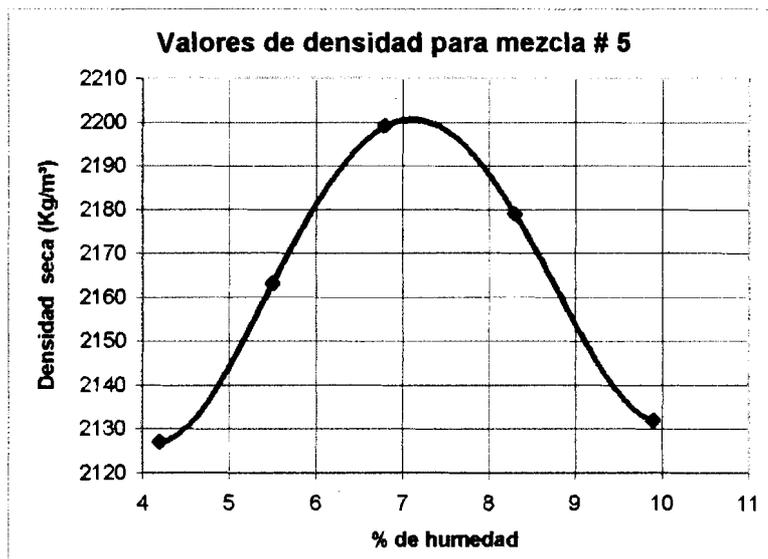
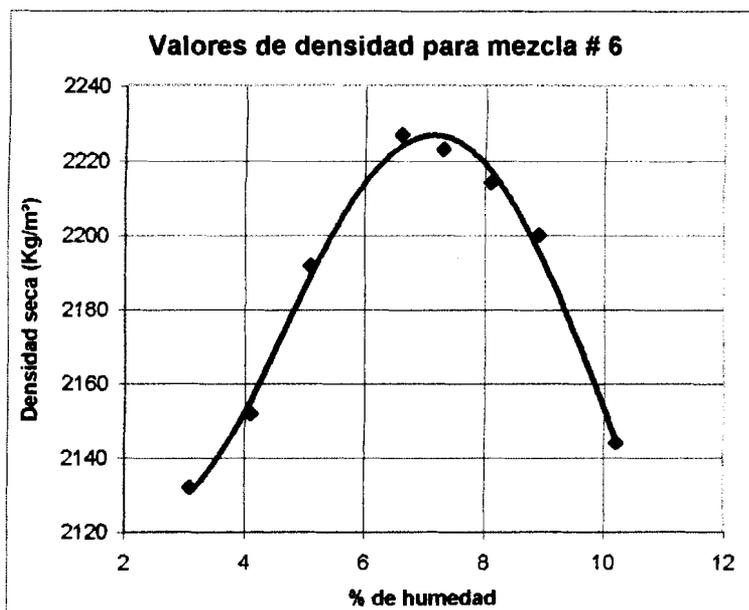


Gráfico 4.6



4.1.3. Resúmenes de densidades, humedad óptima y relación A/C de las mezclas preliminares.

Tabla 4.7

Propiedades	Mezcla # 1	Mezcla # 2
Densidad seca máx. (Kg/m³)	2205	2220
Densidad húmeda máx. (Kg/m³)	2370	2370
Humedad óptima (%)	7.5	6.8
Relación Agua/Cemento	0.368	0.339

Tabla 4.8

Propiedades	Mezcla # 3	Mezcla # 4
Densidad seca máx.(Kg/m ³)	2230	2200
Densidad húmeda máx.(Kg/m ³)	2395	2350
Humedad óptima (%)	7.3	7.2
Relación Agua/Cemento	0.368	0.341

Tabla 4.9

Propiedades	Mezcla # 5	Mezcla # 6
Densidad seca máx.(Kg/m ³)	2200	2230
Densidad húmeda máx.(Kg/m ³)	2350	2385
Humedad óptima (%)	7.2	7.1
Relación Agua/Cemento	0.361	0.348

4.1.4. Análisis de pruebas preliminares.

Analizando los resultados obtenidos por medio de las gráficas de densidad seca máxima vs. % de humedad, se ha escogido la mezcla # 6 (ver Tabla 4.6 y Gráfica 4.6) como el diseño patrón por presentar uno de los mejores valores de densidad, y basándose en este modelo seleccionado se desarrollaron los estudios destinados a realizar comparaciones entre algunos porcentajes de adición de CCA en el hormigón y observar el comportamiento de sus propiedades. Es de notar que no se ha escogido la mezcla # 3, que a pesar de tener una elevada densidad seca (ver tabla 4.3 y Gráfica 4.3), no ha sido seleccionada puesto que su gráfica obtenida no posee una

aceptable distribución de datos y el contenido de humedad óptimo es alto comparado con algunas de las mezclas analizadas.

4.2. Realización de pruebas utilizando el Ensayo de Compactación

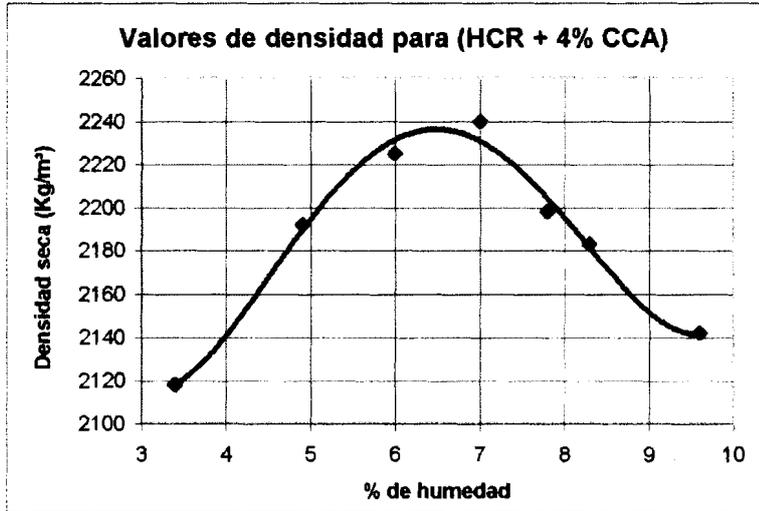
Proctor Modificado, con el efecto de la adición de CCA en diferentes porcentajes.

Una vez seleccionada la mezcla patrón (ver Tabla 4.3) se utilizó la ceniza de cascarilla de arroz como material cementante de adición en diferentes porcentajes (4%, 8%, 12%, 16%, 20%) para investigar la variación de las propiedades del HCR ante la presencia del material antes mencionado.

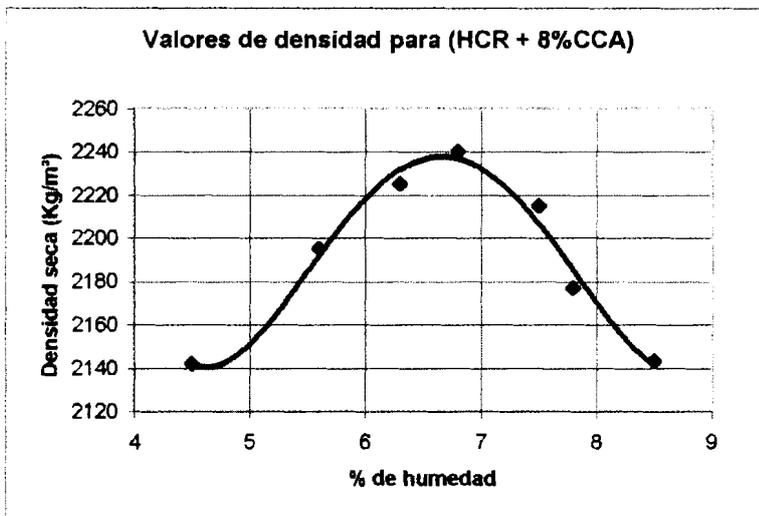
La primera propiedad en ser evaluada fue la densidad alcanzada luego de la compactación. Para tal efecto se realizaron pruebas utilizando el ensayo de Compactación Proctor Modificado (ASTM D 1557 Procedimiento C), utilizando las proporciones adecuadas de los materiales y cada uno de los porcentajes de adición de CCA. Por medio de estas pruebas se obtuvieron resultados que a la postre permitieron realizar las gráficas 4.7 a 4.11, y las tablas 4.10 a 4.14 en las cuales se indican valores de densidad seca máxima, densidad húmeda máxima, humedad óptima (%), relación Agua/Cemento y relación Agua/(Cemento + CCA).

4.2.1. Gráficas de los ensayos Proctor con la adición de CCA.

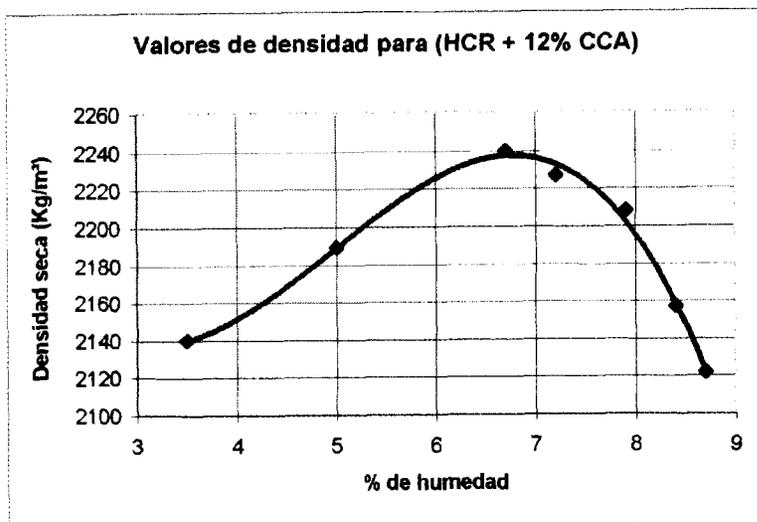
Gráfica 4.7



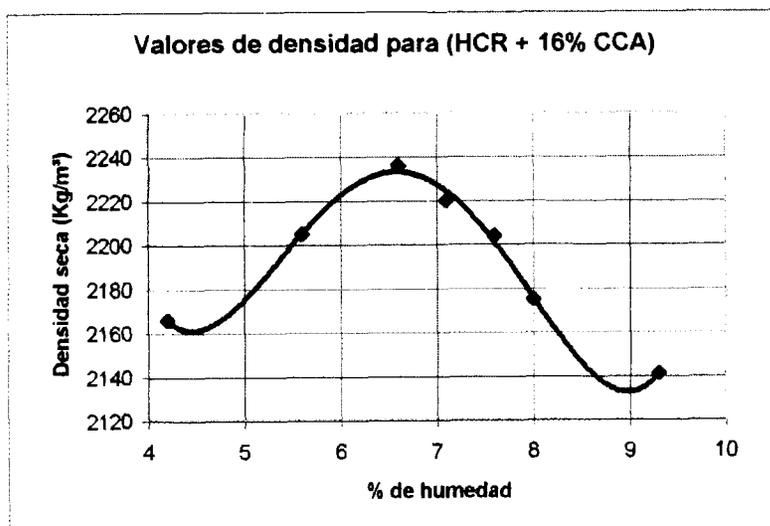
Gráfica 4.8



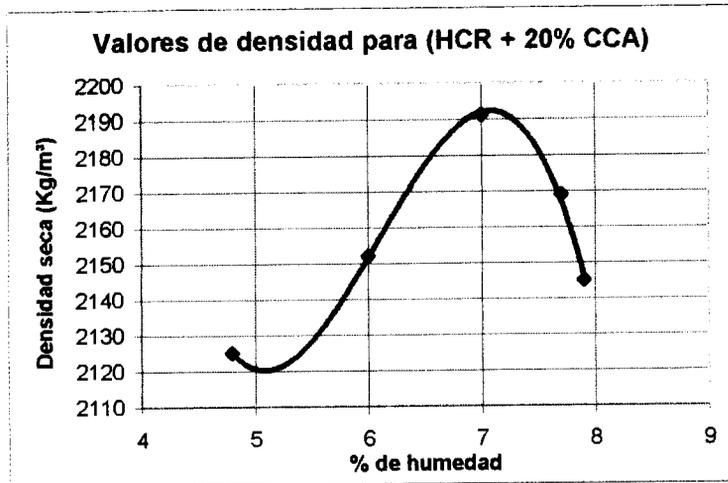
Gráfica 4.9



Gráfica 4.10



Gráfica 4.11



4.2.2. Resúmenes de densidades, humedad óptima, relación A/C, relación A/(C+CCA) de las mezclas con adición de CCA.

Tabla 4.10

Propiedades	HCR+4%CCA
Densidad seca máxima (Kg/m ³)	2240
Densidad húmeda máxima (Kg/m ³)	2395
Humedad óptima (%)	7.0
Relación Agua/Cemento	0.345
Relación Agua/(Cemento+CCA)	0.332

Tabla 4.11

Propiedades	HCR+8%CCA
Densidad seca máxima (Kg/m ³)	2240
Densidad húmeda máxima (Kg/m ³)	2390
Humedad óptima (%)	6.8
Relación Agua/Cemento	0.331
Relación Agua/(Cemento+CCA)	0.308

Tabla 4.12

Propiedades	HCR+12%CCA
Densidad seca máxima (Kg/m ³)	2240
Densidad húmeda máxima (Kg/m ³)	2390
Humedad óptima (%)	6.7
Relación Agua/Cemento	0.325
Relación Agua/(Cemento+CCA)	0.290

Tabla 4.13

Propiedades	HCR+16%CCA
Densidad seca máxima (Kg/m ³)	2235
Densidad húmeda máxima (Kg/m ³)	2385
Humedad óptima (%)	6.7
Relación Agua/Cemento	0.323
Relación Agua/(Cemento+CCA)	0.280

Tabla 4.14

Propiedades	HCR+20%CCA
Densidad seca máxima (Kg/m ³)	2190
Densidad húmeda máxima (Kg/m ³)	2345
Humedad óptima (%)	7.0
Relación Agua/Cemento	0.334
Relación Agua/(Cemento+CCA)	0.280

4.3. Análisis de resultados preliminares.

La realización de las pruebas de compactación con los porcentajes de adición de CCA correspondientes, sirvió para corregir las dosificaciones que se utilizaron en las pruebas posteriores. Dichas correcciones se realizaron tomando en cuenta los valores de densidad húmeda máxima y la cantidad de CCA utilizada según sea el caso, manteniendo fijos estos valores. En la tabla 4.15 se muestran las dosificaciones corregidas que permitieron desarrollar las pruebas posteriores que evalúan resistencia a compresión simple, tracción por compresión simple y trabajabilidad de la mezcla:



Tabla 4.15
Dosificaciones corregidas

Material (Kg/m ³)	Mezclas de HCR utilizadas		
	HCR Patrón	HCR+4%CCA	HCR+8%CCA
Cemento	330	330	326
Piedra 19.5 mm	606	606	600
Piedra 12.5 mm	190	190	188
Arena Triturada	436	436	431
Arena de río	663	663	656
CCA	0	13.2	26.1
Agua	158	157	153
Aditivo ROCA-PR	3.3	3.3	3.3
	HCR+12%CCA	HCR+16%CCA	HCR+20%CCA
Cemento	326	323	317
Piedra 19.5 mm	600	593	581
Piedra 12.5 mm	188	186	182
Arena Triturada	431	427	417
Arena de río	656	649	635
CCA	39.2	51.7	63.4
Agua	150	150	153
Aditivo ROCA-PR	3.3	3.3	3.3

CAPÍTULO 5

5. OBTENCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE Y TRACCIÓN POR COMPRESIÓN DIAMETRAL.

Para evaluar estas propiedades se prepararon muestras cilíndricas de HCR en moldes metálicos de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura. En la preparación de la mezcla se utilizó una mezcladora de concreto de 50 dm³ de capacidad, empleando las proporciones de materiales adecuadas y teniendo como guía la tabla 4.15. La compactación se la realizó en tres capas con un martillo vibratorio Kango; al cabo de 24 horas de la confección de las muestras de HCR, estas fueron desencofradas e introducidas en una cámara húmeda para cumplir con el proceso de curado del hormigón, por medio del cual se mejoran sus propiedades.

Tanto para obtener la resistencia a la compresión simple y tracción por compresión simple, se destinaron 10 cilindros por cada una de las mezclas de HCR analizadas (ver tabla 4.15), los mismos que fueron

evaluados a edades de 3, 7, 14, 28 y 90 días. Por razones de irregularidad superficial y de compacidad, en varias muestras se cortó una capa de entre 1 y 2 cm. en su parte superior para evitar inconvenientes en la evaluación de sus propiedades, sobre todo en la obtención de los valores de resistencia a la compresión simple.

En los ensayos de compresión simple se cumplió con las normas ASTM C 39-96 e INEN 1573, mientras que en los ensayos de Tracción por Compresión Diametral (TCD) se cumplió con las normas ASTM C 496-96. Los valores promedios (dos probetas) obtenidos de resistencia a la compresión simple para cada tipo de mezcla, se indican en las tablas 5.1 a 5.3, mientras que los valores promedios de tracción por compresión simple se muestran en las tablas 5.4 a 5.6:

5.1. Valores de resistencia a la compresión simple para mezclas con adición de CCA.

Tabla 5.1

Resistencia a la compresión simple (MPa)		
Edad(días)	HCR Patrón	HCR+4%CCA
3	32.0	33.1
7	37.7	38.9
14	41.0	41.5
28	44.3	45.0
90	46.0	50.0

Tabla 5.2

Resistencia a la compresión simple (MPa)		
Edad(días)	HCR+8%CCA	HCR+12%CCA
3	30.6	27.6
7	37.5	33.8
14	40.3	37.9
28	42.6	39.8
90	44.0	46.0

Tabla 5.3

Resistencia a la compresión simple (MPa)		
Edad(días)	HCR+16%CCA	HCR+20%CCA
3	27.5	27.5
7	32.7	31.9
14	35.7	34.5
28	39.3	39.1
90	42.5	40.6

5.2. Valores de Tracción por Compresión Diametral para mezclas con adición de CCA.

Tabla 5.4

Tracción por Compresión Diametral (MPa)		
Edad(días)	HCR Patrón	HCR+4%CCA
3	3.06	3.15
7	3.50	3.59
14	3.75	3.78
28	3.99	4.04
90	4.12	4.40

Tabla 5.5

Tracción por Compresión Diametral (MPa)		
Edad(días)	HCR+8%CCA	HCR+12%CCA
3	2.95	2.72
7	3.49	3.20
14	3.70	3.52
28	3.87	3.66
90	3.97	4.12

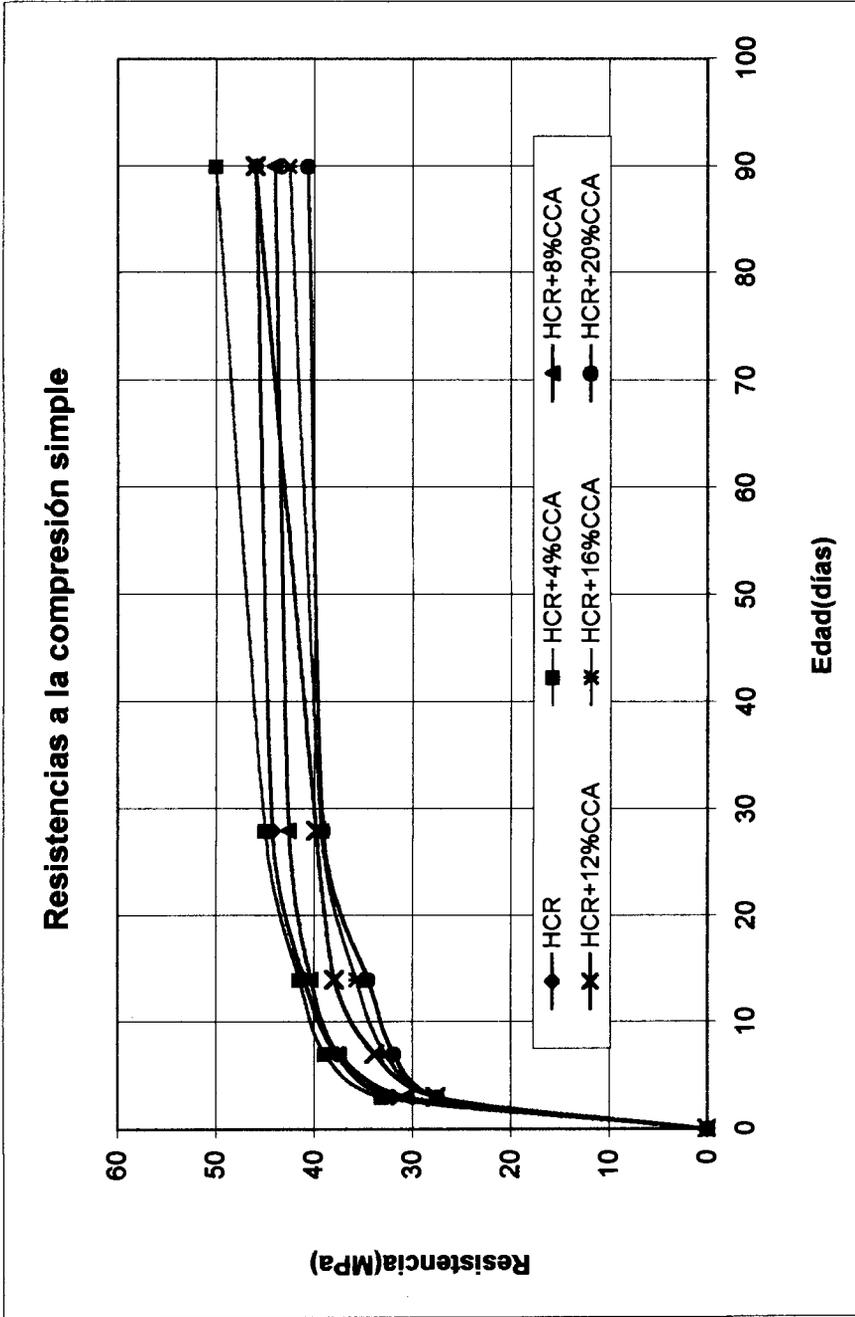
Tabla 5.6

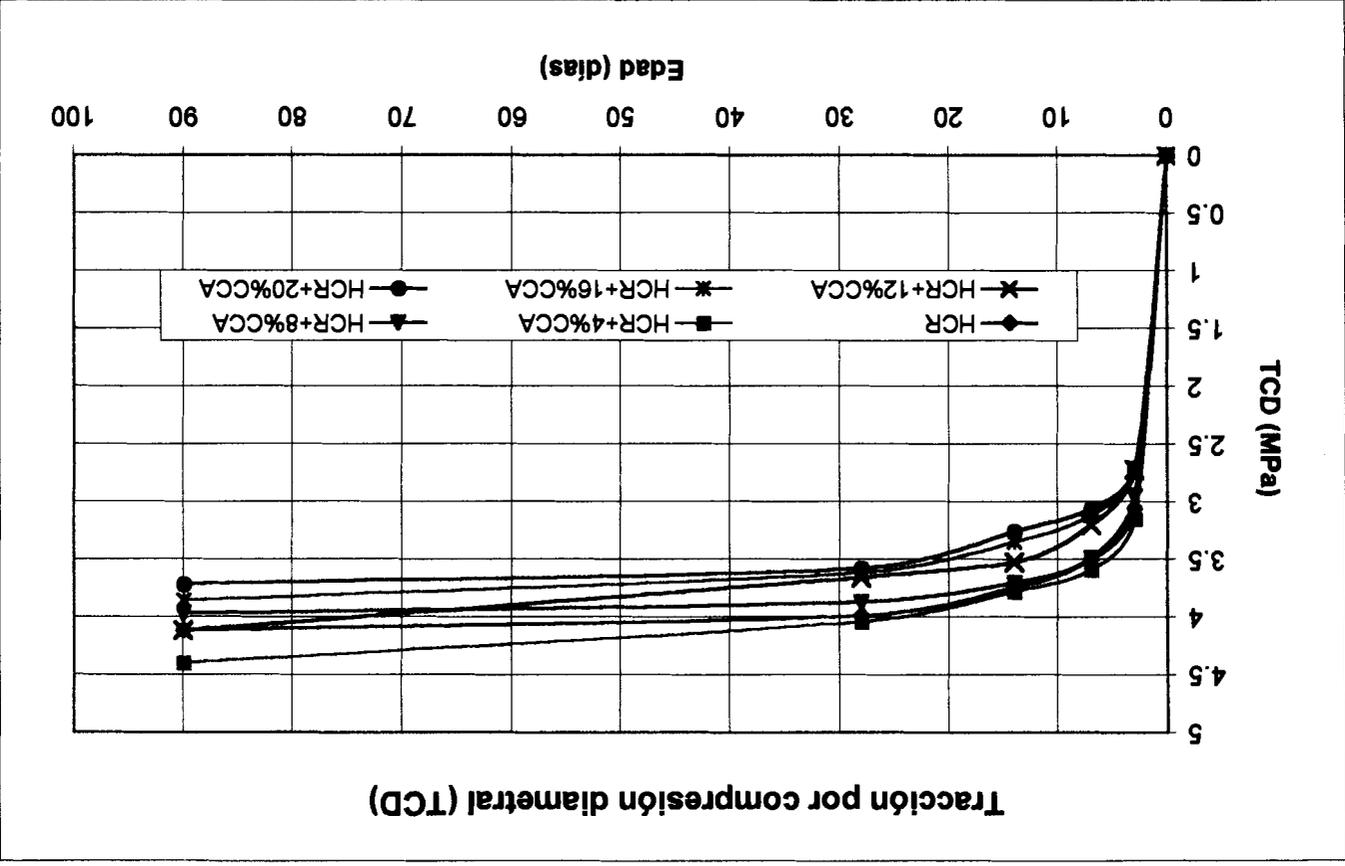
Tracción por Compresión Diametral (MPa)		
Edad(días)	HCR+16%CCA	HCR+20%CCA
3	2.71	2.71
7	3.12	3.06
14	3.35	3.26
28	3.62	3.58
90	3.86	3.72

5.3. Gráficas de los ensayos de resistencia a la compresión simple y tracción por compresión diametral.

Los resultados presentados en las tablas 5.1 a 5.6, permitieron la realización de gráficos en los cuales se aprecia de una mejor manera el comportamiento mecánico del HCR con cada una de las adiciones de CCA. Los gráficos mencionados se presentan a continuación:

Gráfica 5.1





Gráfica 5.2

5.4. Análisis de resultados.

La adición de 4% de CCA produjo los mejores resultados en el comportamiento mecánico del HCR, ya que se obtuvo los más altos valores de resistencia a la compresión simple y tracción por compresión diametral, siendo más notoria esta diferencia a los 90 días de edad.

Vale destacar que la utilización de adiciones de CCA superiores al 12%, ha producido que la resistencia mecánica del HCR sea inferior a la obtenida con la mezcla patrón, sobre todo a tempranas edades.

CAPITULO 6

6. TRABAJABILIDAD DEL HCR Y EL EFECTO DE LA ADICION DE CCA.

La trabajabilidad se define como la propiedad del hormigón fresco que determina la facilidad con que puede ser mezclado, transportado, moldeado, compactado y terminado sin que se pierda su homogeneidad.

Una buena trabajabilidad obtenida al finalizar el mezclado tiene una gran influencia sobre el hormigón endurecido en su resistencia mecánica, resistencia a las condiciones extremas del medio ambiente, durabilidad e impermeabilidad.

Para cada requerimiento constructivo existe una trabajabilidad adecuada, y dependerá de los materiales utilizados (su tamaño y proporción dentro de la mezcla) y de las condiciones de transporte del hormigón fresco. En el caso específico de los hormigones compactados, también dependerá de su colocación en obra y de los métodos de compactación (7).



Partiendo de estos conceptos, el criterio empleado para evaluar la trabajabilidad de las mezclas de HCR fue el de obtener valores de resistencia a la compresión simple en muestras cilíndricas de este concreto ensayadas a los 7 días de edad, pero moldeadas en tiempos diferentes con respecto a la preparación de la mezcla, esto es luego de 1 hora, 2 horas, 2.5 horas, 3 horas, 3.5 horas después.

Las mezclas utilizadas para realizar esta comparación fueron HCR Patrón, HCR + 4% CCA, HCR + 16% CCA. Los ensayos de resistencia a la compresión simple se realizaron cumpliendo con las normas ASTM C 39-96 e INEN 1573. Los resultados se muestran de manera relativa a la resistencia correspondiente al tiempo 0 horas en la tabla 6.1.

6.1. Comparación de la trabajabilidad entre mezclas de HCR.

Tabla 6.1

Tiempo (horas)	Resistencias relativas		
	HCR Patrón	HCR+4%CCA	HCR+16%CCA
0.0	1.00	1.00	1.00
1.0	1.35	1.38	1.00
2.0	1.35	1.38	0.97
2.5	1.33	1.34	0.92
3.0	0.93	1.21	0.81
3.5	0.70	1.07	0.68

6.2. Gráficos obtenidos a partir de los ensayos de trabajabilidad.

Gráfico 6.1

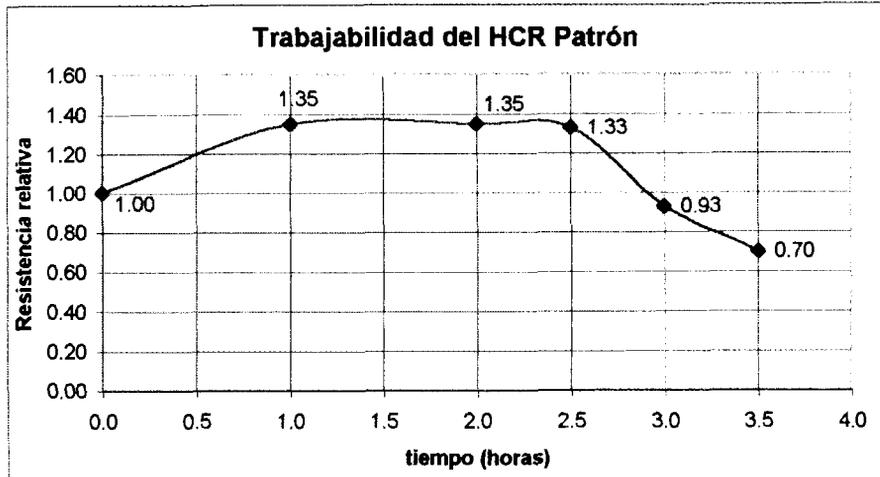


Gráfico 6.2

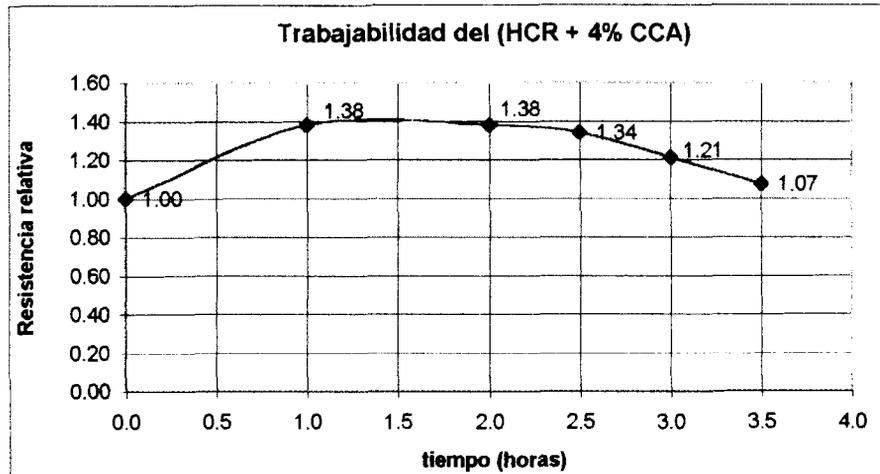
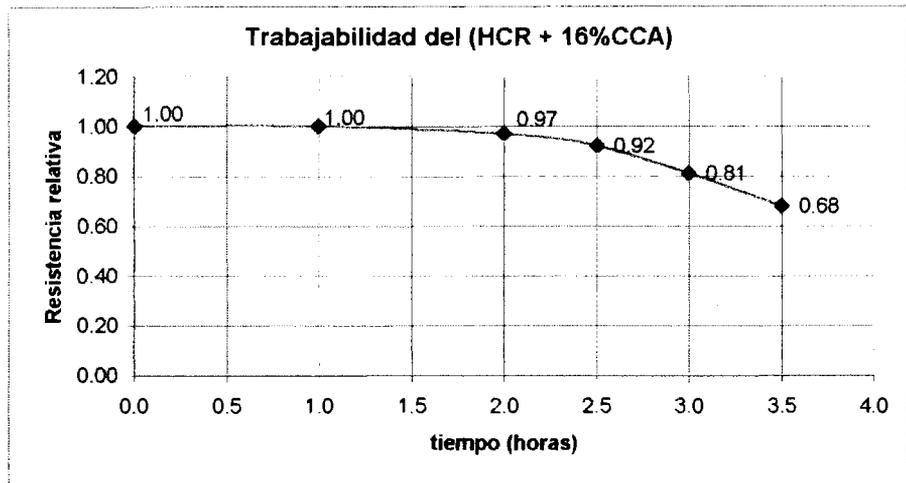


Gráfico 6.3

6.3. Análisis de resultados.

Por medio de los resultados obtenidos, se puede mencionar que una adición de 4% de CCA mejora notablemente el plazo de trabajabilidad, lográndose mayores incrementos de resistencia relativa que los conseguidos con la mezcla patrón. De igual manera se puede notar que la adición de 16% de CCA produce una mezcla de HCR con un período de trabajabilidad menor a 1.5 horas y sin incrementos relativos de resistencia a la compresión simple.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

1. La adición de CCA en el HCR produce un ligero aumento en la densidad máxima alcanzada luego de la compactación. Esto ocurre cuando la adición de CCA es del 4% al 12%. Mientras que utilizando adiciones superiores la densidad disminuye, volviéndose una mezcla poco consistente y difícil de compactar.
2. En cuanto a la resistencia a la compresión simple y tracción por compresión diametral, con una adición de 4% de CCA, se obtiene valores superiores a los alcanzados con la mezcla patrón, siendo estos últimos similares a los obtenidos con una adición de 8%. Todo esto a partir de los 28 días, ya que a edades tempranas la variación es mínima.
3. La mezcla de HCR + 4% CCA presenta un mejor comportamiento con respecto al HCR Patrón en cuanto a la trabajabilidad, ya que se obtuvieron mayores incrementos de resistencia relativa, pero en ambos casos los mejores valores se lograron entre 1 y 2.5 horas luego de preparadas las mezclas de concreto.

4. La presencia de CCA en las mezclas de HCR reduce ligeramente el valor de humedad óptima para alcanzar la máxima densidad.
5. Cuando la adición de CCA se realizó en porcentajes mayores a 12%, los valores obtenidos de resistencia a la compresión simple y tracción por compresión simple son más bajos que los logrados con la mezcla patrón, incluso a edades tempranas.
6. La mezcla de HCR + 16% CCA es poco compactable, de inferior resistencia relativa y con un periodo de trabajabilidad menor a 1.5 horas luego de preparada la muestra.
7. Se recomienda el uso de CCA en un porcentaje óptimo de 4% de adición en el HCR, donde se logran excelentes resultados en el comportamiento mecánico del concreto y mayor durabilidad.
8. En el desarrollo de este trabajo se utilizó el aditivo ROCA-PR en una proporción de 1% con respecto al cemento, obteniendo excelentes resultados en cuanto a la trabajabilidad se refiere. Se recomienda la utilización de este aditivo en un porcentaje mayor, para ampliar los plazos de trabajabilidad del concreto.

APÉNDICES

APÉNDICE A

DATOS DE LAS MUESTRAS CORRESPONDIENTES A LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE

Características de las muestras de HCR Patrón					
Muestra #	Edad (días)	d (mm)	h (mm)	Peso (Kg)	Densidad (Kg/m³)
1	3	101	181	3.520	2429
2	3	101	178	3.490	2448
3	7	101	180	3.510	2435
4	7	101	174	3.380	2426
5	14	101	187	3.635	2427
6	14	101	181	3.525	2432
7	28	101	181	3.525	2432
8	28	101	176	3.475	2466
9	90	101	182	3.570	2450
10	90	101	175	3.480	2483

Densidad promedio (Kg/m³)	2443
---	-------------

Características de las muestras de HCR + 4% CCA					
Muestra #	Edad (días)	d (mm)	h (mm)	Peso (Kg)	Densidad (Kg/m³)
21	3	101	204	3.930	2406
22	3	101	203	3.915	2408
23	7	101	204	4.045	2476
24	7	101	202	3.875	2396
25	14	101	203	3.915	2408
26	14	101	203	3.935	2421
27	28	101	186	3.715	2494
28	28	101	183	3.560	2429
29	90	101	189	3.720	2458
30	90	101	189	3.700	2445

Densidad promedio (Kg/m³)	2434
---	-------------

Características de las muestras de HCR + 8% CCA					
Muestra #	Edad (días)	d (mm)	h (mm)	Peso (Kg)	Densidad (Kg/m³)
41	3	101	204	3.915	2397
42	3	101	205	3.965	2415
43	7	101	204	3.915	2397
44	7	101	204	3.915	2397
45	14	101	188	3.630	2411
46	14	101	189	3.660	2418
47	28	101	188	3.650	2425
48	28	101	183	3.555	2426
49	90	101	203	3.950	2430
50	90	101	203	3.950	2430

Densidad promedio (Kg/m³)	2414
----------------------------------	-------------

Características de las muestras de HCR + 12% CCA					
Muestra #	Edad (días)	d (mm)	h (mm)	Peso (Kg)	Densidad (Kg/m³)
61	3	101	205	3.910	2382
62	3	101	204	3.870	2369
63	7	101	205	3.935	2397
64	7	101	204	3.910	2394
65	14	101	204	3.910	2394
66	14	101	188	3.615	2401
67	28	101	190	3.655	2402
68	28	101	190	3.650	2399
69	90	101	188	3.630	2411
70	90	101	188	3.620	2405

Densidad promedio (Kg/m³)	2395
----------------------------------	-------------

Características de las muestras de HCR + 16% CCA					
Muestra #	Edad (días)	d (mm)	h (mm)	Peso (Kg)	Densidad (Kg/m³)
81	3	101	191	3.72	2432
82	3	101	188	3.66	2431
83	7	101	191	3.70	2419
84	7	101	191	3.72	2432
85	14	101	189	3.65	2412
86	14	101	189	3.68	2431
87	28	101	187	3.61	2411
88	28	101	191	3.70	2419
89	90	101	189	3.68	2431
90	90	101	190	3.70	2432

Densidad promedio (Kg/m³)	2425
----------------------------------	-------------

Características de las muestras de HCR + 20% CCA					
Muestra #	Edad (días)	d (mm)	h (mm)	Peso (Kg)	Densidad (Kg/m³)
101	3	101	181	3.49	2408
102	3	101	178	3.46	2427
103	7	101	178	3.45	2420
104	7	101	181	3.53	2435
105	14	101	184	3.56	2416
106	14	101	178	3.41	2392
107	28	101	178	3.46	2427
108	28	101	177	3.41	2406
109	90	101	179	3.44	2400
110	90	101	179	3.46	2414

Densidad promedio (Kg/m³)	2415
----------------------------------	-------------

APÉNDICE B

DATOS DE LAS MUESTRAS CORRESPONDIENTES A LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN POR COMPRESIÓN DIAMETRAL

Características de las muestras de HCR Patrón					
Muestra #	Edad (días)	d (mm)	h (mm)	Peso (Kg)	Densidad (Kg/m³)
11	3	101	183	3.55	2420
12	3	101	191	3.69	2413
13	7	101	189	3.67	2425
14	7	101	189	3.67	2425
15	14	101	186	3.65	2447
16	14	101	183	3.56	2429
17	28	101	190	3.72	2442
18	28	101	182	3.57	2450
19	90	101	175	3.49	2490
20	90	101	175	3.49	2490

Densidad promedio (Kg/m³)	2443
---	-------------

Características de las muestras de HCR + 4% CCA					
Muestra #	Edad (días)	d (mm)	h (mm)	Peso (Kg)	Densidad (Kg/m³)
31	3	101	205	3.98	2421
32	3	101	205	3.93	2394
33	7	101	204	3.99	2442
34	7	101	204	3.99	2442
35	14	101	204	4.00	2446
36	14	101	203	3.93	2418
37	28	101	203	3.96	2433
38	28	101	204	4.05	2479
39	90	101	203	3.97	2442
40	90	101	203	3.95	2430

Densidad promedio (Kg/m³)	2435
---	-------------

Características de las muestras de HCR + 8% CCA					
Muestra #	Edad (días)	d (mm)	h (mm)	Peso (Kg)	Densidad (Kg/m³)
51	3	101	204	3.92	2397
52	3	101	205	3.95	2406
53	7	101	204	3.91	2394
54	7	101	204	3.92	2397
55	14	101	205	3.95	2406
56	14	101	204	3.97	2427
57	28	101	205	3.98	2424
58	28	101	204	3.95	2418
59	90	101	204	3.97	2430
60	90	101	203	3.95	2430

Densidad promedio (Kg/m³)	2413
----------------------------------	-------------

Características de las muestras de HCR + 12% CCA					
Muestra #	Edad (días)	d (mm)	h (mm)	Peso (Kg)	Densidad (Kg/m³)
71	3	101	204	3.90	2387
72	3	101	205	3.90	2373
73	7	101	204	3.90	2387
74	7	101	204	3.91	2394
75	14	101	205	3.94	2400
76	14	101	205	3.95	2406
77	28	101	205	3.92	2388
78	28	101	205	3.92	2388
79	90	101	204	3.93	2406
80	90	101	204	3.94	2412

Densidad promedio (Kg/m³)	2394
----------------------------------	-------------

Características de las muestras de HCR + 16% CCA					
Muestra #	Edad (días)	d (mm)	h (mm)	Peso (Kg)	Densidad (Kg/m³)
91	3	101	205	3.98	2424
92	3	101	191	3.73	2439
93	7	101	203	3.94	2424
94	7	101	203	3.96	2436
95	14	101	189	3.65	2412
96	14	101	203	3.91	2405
97	28	101	204	3.98	2436
98	28	101	191	3.68	2406
99	90	101	205	3.98	2424
100	90	101	204	3.97	2430

Densidad promedio (Kg/m³)	2424
----------------------------------	-------------

Características de las muestras de HCR + 20% CCA					
Muestra #	Edad (días)	d (mm)	h (mm)	Peso (Kg)	Densidad (Kg/m³)
111	3	101	178	3.46	2427
112	3	101	178	3.44	2413
113	7	101	179	3.43	2393
114	7	101	178	3.40	2385
115	14	101	181	3.51	2418
116	14	101	179	3.44	2400
117	28	101	178	3.44	2413
118	28	101	178	3.49	2448
119	90	101	178	3.44	2413
120	90	101	178	3.49	2448

Densidad promedio (Kg/m³)	2416
----------------------------------	-------------

APÉNDICE C

DATOS DE LAS MUESTRAS CORRESPONDIENTES A LOS ENSAYOS DE TRABAJABILIDAD

Características de las muestras de HCR Patrón					
Muestra #	Edad (días)	d (mm)	h (mm)	Peso (Kg)	Densidad (Kg/m ³)
121	7	101	185	3.56	2403
122	7	101	185	3.56	2403
123	7	101	190	3.72	2445
124	7	101	189	3.70	2445
125	7	101	189	3.68	2431
126	7	101	189	3.66	2418
127	7	101	191	3.72	2432
128	7	101	189	3.67	2425
129	7	101	192	3.77	2452
130	7	101	190	3.70	2432

Densidad promedio (Kg/m ³)	2429
--	------

Características de las muestras de HCR + 4% CCA					
Muestra #	Edad (días)	d (mm)	h (mm)	Peso (Kg)	Densidad (Kg/m ³)
131	7	101	189	3.70	2445
132	7	101	189	3.70	2445
133	7	101	190	3.71	2438
134	7	101	190	3.72	2445
135	7	101	192	3.74	2433
136	7	101	188	3.68	2444
137	7	101	191	3.74	2445
138	7	101	192	3.76	2446
139	7	101	189	3.71	2451
140	7	101	192	3.74	2433

Densidad promedio (Kg/m ³)	2442
--	------

Características de las muestras de HCR + 16% CCA					
Muestra #	Edad (días)	d (mm)	h (mm)	Peso (Kg)	Densidad (Kg/m³)
141	7	101	190	3.68	2419
142	7	101	190	3.68	2419
143	7	101	192	3.74	2433
144	7	101	189	3.68	2431
145	7	101	189	3.67	2425
146	7	101	189	3.67	2425
147	7	101	190	3.69	2425
148	7	101	190	3.66	2406
149	7	101	187	3.62	2417
150	7	101	190	3.66	2406

Densidad promedio (Kg/m³)	2421
---	-------------

BIBLIOGRAFIA

1. ARCE XAVIER, "Hormigones Livianos" (Tesis, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1997)
2. DISENSA, "Agregados Rocafuerte"
3. KAJORNCHAPPUNNGAM SOMJAI and STEWARD DONALD, "Rice Husk Ash in Roller Compacted Concrete," *Concrete International: Design and Construction*, Abril 1992.
4. JOFRÉ CARLOS, "Rehabilitación de carreteras con concreto compactado," Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones: Pavimentos de concreto compactado, Madrid
5. MALHOTRA V. MOHAN and ZHANG MIN-HONG, "High-Performance concrete Incorporating Rice Husk Ash as a Supplementary Cementing Material," *ACI Materials Journal*, November-December 1996

6. PEÑA CECILIA y ZAMBRANO FULTON, "Hormigón Celular con la Utilización de Materiales Locales" (Tesis, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2001)

7. ROBLES FÉLIX, "Mejoramiento de las Características Reológicas del Hormigón Fresco por Adición de Lignosulfonato de Calcio como Plastificante" (Tesis, Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Guayaquil, 1997)