

**PAVIMENTOS EN CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO EN MINAS A  
CIELO ABIERTO**

**LEYDI CAROLINA BONILLA RODRIGUEZ  
ANDREINA SUSANA GARCIA PINTO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2009**

**PAVIMENTOS EN CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO EN MINAS A  
CIELO ABIERTO**

**LEYDI CAROLINA BONILLA RODRIGUEZ  
ANDREINA SUSANA GARCIA PINTO**

**Proyecto de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
Ingeniero Civil**

**Director:  
EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZON  
INGENIERO CIVIL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2009**

*A Dios por ser el guía espiritual de mi vida.*

*A mis padres Marco Antonio y Clara Yaneth por su esfuerzo y confianza al darme la oportunidad de realizarme profesionalmente.*

*A mis hermanos Edwin, Marcos y Cristhian por su apoyo y motivación para seguir adelante.*

*A Mauricio por su cariño, amor y compañía en cada etapa realizada.*

*A mis amigos por todas las experiencias compartidas durante mi carrera.*

***Leydi Carolina Bonilla Rodríguez.***

*A Dios por ser el único motivo para alcanzar grandes cosas y la inspiración para seguir soñando.*

*“Sabiduría y ciencia te son dadas, tanto que no ha habido antes de ti otro como tu, ni después de ti se levantará otro como tú.*

*Y aún también te he dado riquezas y gloria de tal manera que entre los reyes ninguno haya como tú en todos tus días.*

*2 cronicas1:12*

***Andreina Susana García Pinto.***

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen la colaboración de todos aquellos que hicieron posible la realización de este proyecto:

M. Sc. Eduardo Castañeda, Director de proyecto

M. Sc. Gabriel Bustos Quelgueren, Superintendente de ambiental CERREJON.

Héctor Rojas

Laboratorio Universidad Industrial de Santander

Laboratorio de ingeniería civil ANDINA INGENIEROS

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	1
1. OBJETIVOS	2
1.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2. CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO	3
2.1 RESEÑA HISTORICA	3
2.2 FUNDAMENTO TEORICO	6
2.2.1 Definición concreto compactado con rodillo	6
2.2.2 Características principales	7
2.2.3 Características generales	7
2.2.4 Métodos de diseño de la mezcla para CCR	9
2.2.4.1 Dosificación por ensayos de consistencia	9
2.2.4.2 Métodos de las mezclas	10
2.2.4.3 Dosificación empleando métodos de compactación de suelos	10
1.2.5 Secuencia básica de construcción	11
1.2.6 Control de calidad	11
2.3 CONCEPTOS GENERALES	12
2.3.1. Concreto	12
2.3.2 Consistencias del concreto	12
2.3.3 Cohesión de la mezcla	13
2.3.4 Resistencia del concreto	13

2.3.5 Compactación de suelos	16
2.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES PARA CCR	16
2.4.1 Agregados	16
2.4.2 Cemento	18
2.4.3 Agua	18
2.4.4 Aditivos	18
2.4.5 Aditivo mineral	19
2.5 PROPIEDADES DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO	19
2.5.1 Resistencia a la compresión	20
2.5.2 Resistencia a la flexión	20
2.5.2.1 Modulo de rotura	20
2.5.3 Resistencia a la fatiga	21
2.5.4 Propiedades elásticas	21
2.5.5 Retracción	22
2.5.6 Durabilidad	22
2.5.7 Permeabilidad	23
3. DISEÑO LA MEZCLA PARA CCR	24
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	24
3.2 CONTENIDO DE AGREGADO	31
3.3 CONTENIDO DE AGUA	33
3.4 CONTENIDO DE CEMENTO	35
3.5 CONTENIDO DE RESIDUO MINERO	36
4. PREPARACION DE ESPECIMENES PARA CÁLCULO DE RESISTENCIAS	37
4.1 PREPARACIÓN DE CILINDROS PARA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CCR	37

4.1.1 Cilindros para el ensayo	37
4.1.2 Toma de muestras	37
4.1.3 Llenado de las probetas y compactación del hormigón	38
4.1.4 Trato a dar a las probetas terminadas	38
4.1.5 Manejo y curado de las probetas una vez fraguado el hormigón	39
4.2 PREPARACIÓN DE VIGAS PARA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE CCR	39
4.2.1 Vigas para el ensayo	39
4.2.2 Toma de muestras	40
4.2.3 Llenado de las vigas y compactación del hormigón	40
4.2.4 Trato a dar a las vigas terminadas	41
4.2.5 Manejo y curado de las vigas una vez fraguado el hormigón	41
4.3 RESULTADOS DE LAS RESISTENCIAS COMPRESION Y FLEXION A LOS 28 DIAS	41
4.3.1 Probetas	41
4.3.2 Vigas en CCR	42
5. DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO	45
5.1 CALCULO DE ESFUERZOS POR MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	45
5.2 MÉTODO DE LA P.C.A., PARA CÁLCULO DE ESPESORES DE PAVIMENTO	49
5.3 EJECUCIÓN DE JUNTAS	53
6. ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS LOSA EN CCR	56
CONCLUSIONES	57
BIBLIOGRAFIA	58

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Presas construidos con CCR	4
Tabla 2. Pavimentos construidos con CCR	6
Tabla 3. Granulometría y proporción de los agregados	33
Tabla 4. Resultados proctor modificado	35
Tabla 5. Energía de compactación para cilindros en CCR	38
Tabla 6. Energía de compactación viga en CCR	40
Tabla 7. Resistencia a la compresión cilindros en CCR	42
Tabla 8. Resistencia a la flexión vigas en CCR	43
Tabla 9. Resistencias y modulo de elasticidad	44

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1a. Construcción tramo experimental en CCR (planta cementos diamante)	5
Figura 1b. Estado Actual de la vía (planta cementos diamante)	5
Figura 2. Consistometro Vebe	9
Figura 3. Proctor modificado	10
Figura 4. Tren de colocación y compactación CCR	11
Figura 5. Caracterización de materiales	25
Figura 6. Granulometría agregado grueso	26
Figura 7. Maquina de los Ángeles	27
Figura 8. Granulometría agregado fino	27
Figura 9. Ensayo equivalente de arena	28
Figura 10. Residuo minero	30
Figura 11. Triturado proveniente del Cerrejón	31
Figura 12. Curvas granulométricas P.C.A	32
Figura 13. Ensayo proctor modificado	34
Figura 14. Humedad Vs densidad	34
Figura 15. Resistencia a la compresión (7 días)	35
Figura 16. Cilindros en CCR	39
Figura 17. Elaboración y ensayo a flexión vigas	41
Figura 18. Taller de llantas	45
Figura 19. Sólidos de diseño	46
Figura 20. Propiedades para un material elástico isotrópico	47
Figura 21. Modelo enmallado.	47
Figura 22. Vehículo de diseño	48

Figura 23. Cargas aplicadas en diferentes partes de la placa	48
Figura 24 Esfuerzos crítico del modelo	51
Figura 25. Deformada del modelo	52
Figura 26. Distribución de juntas vista en planta	54
Figura 27. Junta transversal de construcción	54
Figura 28. Junta longitudinal	55

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos	59
Anexo B. Ensayo de Compactación Proctor Modificado	60
Anexo C. Ensayo de abrasión de agregados en la maquina de los Ángeles	61
Anexo D. Ensayo Equivalente de Arena	62
Anexo E. Ensayo Agregado Fino	63
Anexo F. Ensayo Agregado Grueso	64
Anexo G. Ensayo de CBR	65
Anexo H. Tablas de Esfuerzos en el Modelamiento	66
Anexo I. Comando de Modelamiento	66

## RESUMEN

**TITULO:** PAVIMENTOS EN CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO EN MINAS A CIELO ABIERTO\*

**AUTORES:** LEYDI CAROLINA BONILLA RODRIGUEZ  
ANDREINA SUSANA GARCIA PINTO\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Concreto compactado con rodillo, energía de compactación, humedad optima, asentamientos

### DESCRIPCIÓN:

El Concreto Compactado con Rodillo (CCR) es probablemente el más importante desarrollo en la tecnología de presas en los últimos años, ganando aceptación alrededor del mundo debido a su bajo costo, debido a la rapidez de la puesta en obra, el relativamente bajo contenido de cemento y la utilización de aditivos minerales. El Concreto Compactado con Rodillo, se suele usar también en la construcción de pavimentos y áreas de almacenamiento.

Este proyecto considera la técnica de concreto compactado con rodillo como una alternativa de diseño de pavimentos en minas a cielo abierto. Los estudios se han hecho para la mina de carbón a cielo abierto más grande del mundo ubicada en La Guajira Colombia (CERREJON), en donde las altas cargas de tráfico diario producen un deterioro en los pavimentos existentes presentando un alto costo en el mantenimiento de los mismos. Se presenta una alternativa de diseño en concreto compactado con rodillo más económica y resistente a las cargas que un pavimento de concreto convencional debido a sus bajos porcentajes de agua y cemento como también de la adición de residuos mineros que se producen al explotar el carbón en esta mina, al reutilizar estos residuos como material de construcción causa una disminución en el impacto ambiental.

Finalmente se modela una placa en CCR en elementos finitos para analizar su comportamiento y determinar el espesor ideal para la placa del pavimento. Al hacer un análisis de costos se determina la viabilidad del diseño de un pavimento en concreto compactado con rodillo frente a otros pavimentos.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzón

## SUMMARY

**TITLE:** CONCRETE PAVEMENT ROLLER-COMPACTED\*

**AUTHOR:** LEYDI CAROLINA BONILLA RODRIGUEZ  
ANDREINA SUSANA GARCIA PINTO\*\*

**KEY WORDS:** Roller compacted concrete, energy compaction, optimum moisture, settlements

### DESCRIPTION:

The roller compacted concrete (RCC) is probably the most important development in the technology of dams in recent years, gaining acceptance around the world due to its low cost, the quick entry into the development of work, the relatively low content of cement and mineral additives. The roller compacted concrete is used in the construction of pavements and storing areas.

This project takes in to account the roller compacted concrete technique as an alternative design of pavements in opencast mines. Studies have been carried out in the opencast world's largest mine coal located in La Guajira Colombia (CERREJON), where the high loads daily traffic produces a deterioration in the existing pavements, giving to these a high cost in maintenance. It is presented an alternative designing with roller compacted concrete more resistant and economic than a conventional concrete pavement due to their low percentages of water and cement; as well as the addition of mining waste are produced by exploiting the coal in this mine, when reusing waste as construction material which causes a decrease in environmental impact. Finally, a plate is modeled as RCC in finite element to analyze their behavior and determine the ideal thickness for the plate's surface.

By doing an overall analysis it is determined the feasibility of designing a concrete pavement in front of roller compacted with other pavements.

---

\* Project of Degree

\*\* Physical-Mechanical Engineering Faculty. Civil Engineering School. Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzón

## INTRODUCCION

La implementación de nuevas tecnologías para la construcción de carreteras, son cada vez más necesarias para dar respuesta a las exigencias de diversa índole en el sector vial, lo cual requiere de la investigación de las mismas para identificar aquellas que proporcionen la mejor solución.

Por la importancia que este tipo de investigaciones le proporciona a nuestro país y en vista de que actualmente la tecnología de concreto compactado con rodillo es una alternativa que se está empleando a nivel mundial hemos querido investigar el comportamiento en minas a cielo abierto específicamente en la mina de carbón el Cerrejón, ubicada en el departamento de La Guajira.

Con este proyecto se busca dar una solución eficaz y efectiva de la viabilidad que tiene este concreto como técnica constructiva en pavimentos en vías de altos índices de tráfico diario; además de proporcionar un estudio técnico, económico y de durabilidad del empleo de CCR en obras del sector vial.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar un estudio de factibilidad técnica y económica del empleo del concreto compactado con rodillo en las vías de la mina del cerrejón.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Diseñar una estructura de pavimento en concreto compactado con rodillo para soportar las cargas de vehículos que circulan en las vías de la mina del cerrejón.
- Definir dosificación de la mezcla óptima de concreto seco con los agregados disponibles en el cerrejón.
- Obtener la relación A/C necesaria para lograrla la óptima compactación.
- Analizar el comportamiento de los residuos mineros como aditivo de la mezcla.

## **2. CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO**

### **2.1 RESEÑA HISTORICA**

El concreto compactado con rodillo es un material constituido por agregados, cemento, agua (en menor cantidad que para un concreto convencional) y aditivos (opcional). Su mayor uso ha sido en la construcción de presas donde es necesario el empleo de concreto masivo. Así mismo, se ha utilizado en la construcción de pavimentos, pistas de aeropuertos, protección de las márgenes de canales y en la construcción de fundaciones masivas.

El CCR se derivó de dos técnicas muy difundidas en la construcción de vías: El suelo-cemento y el concreto pobre, pues se podría decir que él es el resultado de tomar lo mejor de cada una de las técnicas mencionadas. Esto ayudó a que la aceptación del material fuera muy rápida dado que no fue necesario desarrollar equipos especiales para el mezclado, transporte y colocación del material, como tampoco para el control en el campo y en el laboratorio de las propiedades del CCR.

Durante muchos años, el hoy llamado CCR, fue usado en la subbase de firmes carreteras y pavimentos en aeropuertos. Desde finales de la década de los cuarenta ha sido empleado frecuentemente en el reino unido, con la denominación de hormigón pobre, como una base de 150 a 250 mm de espesor bajo superficies bituminosas.

El éxito del concreto compactado con rodillo en estos usos ha sido atribuido a una serie de factores, principalmente a que es un material sencillo de producir y colocar, así como que no requiere el empleo de un equipo de construcción específico, lo que supone, en definitiva, una economía considerable.

En pavimentos existen antecedentes que datan del año 1925 en Francia, en 1930, en Suecia se llevo a cabo una forma de concreto compactado con rodillo. En E.E.U.U., en 1942 se llevo a cabo el proyecto carretero en Yakima, Washington. En España, las primeras aplicaciones que se tienen datos se realizaron alrededor de 1970 en la provincia de Barcelona. Sin embargo, el mayor uso de CCR para la construcción de pavimentos en países como Canadá y E.E.U.U., data desde 1980. Debido a ello, la técnica de CCR se considera relativamente reciente y su tecnología aun continúa evolucionando.

En Colombia es muy poco lo que se ha hablado de CCR en la construcción de pavimentos, sus aplicaciones más inmediatas han sido la construcción de presas.

En la tabla 1., se muestran algunas de las presas construidas recientemente en CCR, en varias partes del mundo, donde se especifica el volumen por m3 utilizado en la construcción de las mismas.

Tabla 1. Presas construidos con CCR

<b>NOMBRE</b>	<b>PAIS</b>	<b>AÑO</b>	<b>ALTURA</b> <b>(m)</b>	<b>VOLUMEN CCR</b> <b>(x 1000 m3)</b>
Rialb	España	1991	101	1100
Guarino	Colombia	1992	71,5	160
Pangue	Chile	1996	113	670
Beni Haroun	Argelia	2000	121	1690
Porce II	Colombia	2001	123	1445
Miel I	Colombia	2002	188	1669
La breña II	España	2008	119	1400
Longtan	China	-----	192	3392

En el año 1991 en la Universidad Industrial de Santander, se llevo a cabo el diseño de un tramo experimental ubicado en la vía de acceso a la fábrica de cementos diamante (Bucaramanga-Colombia).

En la figura 1a y 1b., contiene imágenes de la construcción del tramo experimental de la vía de acceso a la fabrica cementos diamante, como del estado actual de esta vía.

En la tabla 2., se muestran algunas vías construidas en CCR, en varias partes del mundo

Figura 1a. Construcción tramo experimental en CCR (planta cementos diamante)



Figura 1b. Estado Actual de la vía (planta cementos diamante)



Tabla 2. Pavimentos construidos con CCR

<b>NOMBRE</b>	<b>PAIS</b>	<b>AÑO</b>	<b>ESPEJOR</b>	<b>AREA CCR</b>
			<b>(cm)</b>	<b>(m<sup>2</sup>)</b>
Acceso casa de maquinas Itaipú	Brasil	1976	20 cm	5200
Patios de una empresa forestal	Canadá	1976	35.5 cm	16000
Zona de tanques en Texas	E.E.U.U	1984	25.4 cm	16500
Puerto de Otterbacken	Suiza	1985	15 cm	4000
Terminal de carga Bullington	E.E.U.U	1985	45.7 cm	44000
Puerto de Tucama	E.E.U.U	1985	30.5 cm	49500
Aeropuerto de Portland	E.E.U.U	1985	35 cm	34200
Puerto de Carley	E.E.U.U	1987	45 cm	63500

## 2.2 FUNDAMENTO TEORICO

**2.2.1 Definición concreto compactado con rodillo.** El Concreto Compactado con Rodillo se define como "Un concreto de consistencia seca, asiento nulo, que se coloca de forma continua y su compactación se realiza con un rodillo normalmente vibrante".

De esta manera el concreto compactado con rodillo difiere del concreto convencional principalmente en su consistencia requerida. Para la consolidación efectiva, la mezcla de concreto debe ser lo suficientemente seca para prevenir el hundimiento de los equipos de rodillo vibratorio, pero lo suficientemente húmeda para permitir la adecuada distribución del mortero conglomerante en el concreto durante el mezclado y la operación de la compactación vibratoria.

La rapidez de la puesta en obra, el relativamente bajo contenido de cemento y la utilización de aditivos minerales (cenizas volátiles, filler calizo, residuos mineros, etc.), explican el motivo por el cual este material es económicamente interesante para la industria de la construcción.

### **2.2.2 Características principales:**

- Cero asentamiento
- Humedad solo para que el cemento reaccione
- No requiere encofrados
- No requiere aceros de refuerzo
- Rápida consolidación
- Se consolida con rodillos vibratorios

### **2.2.3 Características generales:**

- Bajo contenido de agua, que se aproxima al óptimo del proctor modificado.
- Índice de capacidad soporte inmediata alto, lo que permite que sea puesto bajo circulación.
- Contenido de cemento similar al de un concreto clásico; el cemento puede ser con alto contenido de cenizas volantes o escorias.
- Fabricación en plantas continuas de grava-cemento o en centrales de concreto discontinuas.
- Puesta en obra con la maquinaria utilizada para gravas-cemento o con la utilizada para pavimentos asfálticos.

Su definición como técnica híbrida entre las bases tratadas y los pavimentos de hormigón, permite vencer una serie de limitaciones que se presentaban en aquellos casos:

- En lo relativo a gravas-cemento, al disminuir la relación agua/cemento la retracción hidráulica es mas baja, con lo que la separación entre fisuras es bastante menor de la habitual.
- El aumento en el contenido de conglomerante, y las variaciones del mismo originadas por el sistema de dosificación, tienen una menor influencia en las resistencias alcanzadas por el material.
- El menor costo de ejecución que supone el no tener que utilizar una maquinaria especial.

Las técnicas de construcción del CCR tienen la ventaja de poder llevarse a cabo con determinados materiales con granulometrías, plasticidad y otras características que normalmente no serian permitidas en el concreto convencional. La colocación con elevadas consistencias minimiza las pérdidas de resistencia que tienen lugar como consecuencia de la adición de agua en concreto convencional debido a las exigencias de una mínima docilidad. A pesar de estas ventajas el modulo de elasticidad suele ser inferior, presentándose además otro tipo de limitaciones:

- Estructura interna vulnerable ante la acción de los ciclos de hielo-deshielo en el caso de concreto saturado.
- Sensibilidad a las variaciones de humedad en el mezclado y extendido del material así como a los defectos de compactación que se traducen en una considerable disminución de las resistencias.
- Dificultad de conseguir una buena regularidad superficial extendiendo con motoniveladora. Se recomienda un reperfilado.
- Necesidad de colocación de una capa de rodadura asfáltica para tráficos importantes.

**2.2.4 Métodos de diseño de la mezcla para CCR.** Se han desarrollado una serie de métodos para la dosificación de las mezclas empleadas en concreto compactado con rodillo.

**2.2.4.1 Dosificación por ensayos de consistencia.** Este método está basado en el análisis de la trabajabilidad de la mezcla para CCR, de tal manera que esta puede ser lo suficientemente seca para soportar el peso del equipo de compactación, y lo suficientemente húmeda para permitir una adecuada distribución de la pasta en toda la mezcla durante las operaciones de mezclado y compactación. El equipo de laboratorio utilizado para dicho análisis es el Consistometro Vebe, el cual está compuesto por una mesa vibratoria de frecuencia y amplitud fija y contenedores metálicos de volumen conocido. El objetivo del ensayo de laboratorio es medir el tiempo de vibración en segundos, requerido para consolidar la mezcla completamente. La norma de ensayo utilizada es ASTM C 1170.

Figura 2. Consistometro Vebe



**2.2.4.2 Métodos de las mezclas.** Estos métodos emplean, para obtener la composición óptima del árido, Husos granulométricos establecidos previamente. Estos husos incluyen desde un tamaño máximo de 80 a 50 mm, hasta finos menores de 80 micras, y a partir de ellos va variando el contenido de productos cementicios de la mezcla. El mínimo contenido de cemento que proporcione la resistencia requerida por el proyecto, con la trabajabilidad adecuada para su puesta en obra será el adoptado.

**2.2.4.3 Dosificación empleando métodos de compactación de suelos.** Este método conlleva la determinación de la máxima densidad seca empleando procedimientos semejantes a los utilizados en la tecnología del suelo-cemento. El equipo generalmente empleado es el del proctor modificado.

Dependiendo del tamaño máximo de agregados, se han empleado moldes de distintos tamaños, conservándose la energía de compactación del proctor modificado.

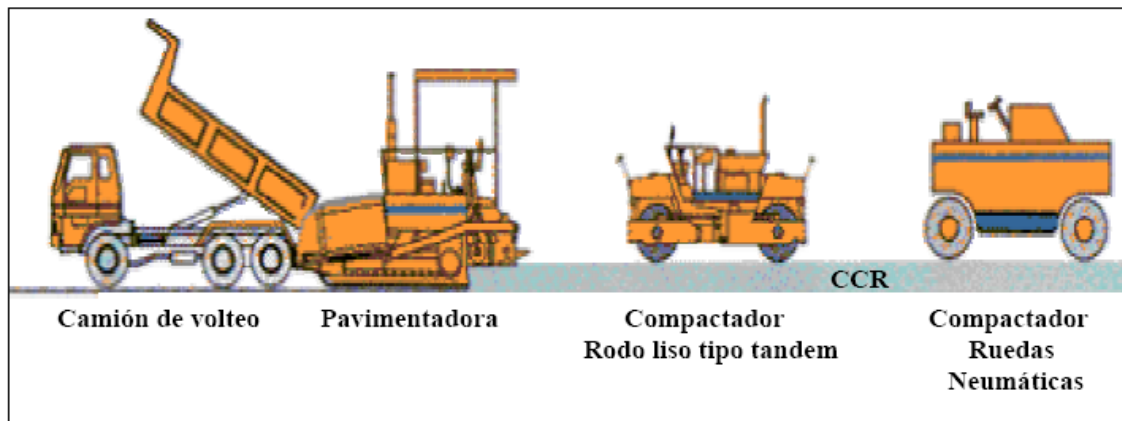
La norma de ensayo utilizada es ASTM D 1557.

Figura 3. Proctor modificado



### 1.2.5 Secuencia básica de construcción. :

Figura 4. Tren de colocación y compactación CCR



- El concreto es producido en una planta de mezclado fija o portátil, sea de mezcla húmeda o seca.
- Transportado por camiones de volteo (para aumentar la rapidez de la construcción).
- Humidificación de la superficie de apoyo.
- Colocado con pavimentadoras de asfalto.
- Compactado con compactadoras de rodillos vibratorios y/o compactadoras de neumáticos.
- Curado con agua, o curadores de concreto.
- Construcción de Juntas

### 1.2.6 Control de calidad:

- Se debe lograr un 98% de la Densidad Máxima del Concreto.

- Se diseñan curvas de Densidad en forma similar a las del suelo según el ensayo de Proctor Modificado.
- Estas curvas se diseñan para distintos contenidos de cemento, p.ej. 11%, 12%, 13%, 14%, 15%, 16%, 17%
- Se hacen ensayos de resistencia del concreto utilizando cilindros con las diferentes mezclas de distintos contenidos de cemento.
- Se escoge la curva de Densidad cuyo contenido de cemento resulta la resistencia de diseño.

## 2.3 CONCEPTOS GENERALES

**2.3.1. Concreto.** El término concreto se refiere a la mezcla de cemento, agua, aire (naturalmente atrapado o intencionalmente incorporado), aditivos (cuando son empleados), agregado fino (arena) y agregado grueso (grava). Es también llamado hormigón. Se debe caracterizar por su buena calidad en resistencia mecánica solicitada, durabilidad que lo mantenga en buenas condiciones durante su servicio, y un precio razonable que no pueda ser remplazado por otro material.

### 2.3.2 Consistencias del concreto:

- **Semi-seco** (especial para hormigón compactado a rodillo - RCC).
- **Duro** (asentamiento en Cono de Abrams de 5 cm  $\pm$  1,5 cm).
- **Plástico** (asentamiento en Cono de Abrams de 10 cm  $\pm$  2,5 cm).
- **Blando** (asentamiento en Cono de Abrams 15 cm  $\pm$  3,0 cm).
- **Fluido** (asentamiento en Cono de Abrams mayor que 15 cm  $\pm$  3,5 cm).

La medida de la consistencia del hormigón se hace normalmente con el Cono de Abrams, y es la diferencia entre la altura del cono que sirvió de molde y la del cono de hormigón que se forma al retirar el molde. Norma AASHTO T 119M/ T 119 – 05 y ASTM C 143/ C 143M – 03

**2.3.3 Cohesión de la mezcla.** Puede destacarse como factores que afectan la trabajabilidad del hormigón, los siguientes:

- Insuficiente cantidad de cemento.
- Agregados con granulometrías discontinuas exigen más agua para una misma trabajabilidad.
- Agregados gruesos con formas alargadas y angulosas.
- Las mezclas con canto rodado son siempre más dóciles que mezclas similares con piedra partida.
- El agregado fino con partículas de formas angulosas, afecta proporcionalmente más la trabajabilidad del hormigón que piedras lajasas en el agregado grueso.
- El uso de aditivos fluidificantes o incorporadores de aire puede mejorar la trabajabilidad de las mezclas.

**2.3.4 Resistencia del concreto.** La resistencia del hormigón es su capacidad para oponerse a esfuerzos que se manifiestan por sollicitaciones a compresión, a tracción, a flexión, a flexo tracción y al corte.

Se considera que un concreto es de resistencia normal a compresión cuando no supera los 42 Mpa, y si los supera se considera un concreto de alta resistencia pero no pasa de 100 Mpa a los 28 días

#### **Factores que inciden en la resistencia**

- **Relación agua cemento:** la relación a/c se defina como la cantidad de agua en masa, sin incluir el agua absorbida por los agregados, sobre cantidad de cemento en masa.

La resistencia del concreto está estrechamente relacionada con la relación a/c, de tal manera que entre mayor sea el contenido de agua de mezclado, mayor será la cantidad que no se cambia con el cemento y por consiguiente al disiparse la parte de agua evaporable la pasta será más porosa y la resistencia del concreto disminuirá. De acuerdo con este principio se ha desarrollado graficas y formulas que la correlaciona con la resistencia a la compresión de acuerdo con las condiciones específicas en cuanto a materiales, producción y ensayos.

Esta propiedad fue demostrada por **Duff Abrams** en el año de 1918, señalando que para un concreto perfectamente compactado , empleando materiales con las mismas características y condiciones de ensayos, la resistencias a una edad dada es inversamente proporcional a la relación del agua /cemento. En cuanto menor sea la relación de agua / cemento muy baja la mezcla se vuelve más seca y difícil de compactar quedando porosa a punto que la resistencia comienza a decrecer obviamente cuando la compactación se hace con vibrador, se puede utilizar relaciones agua / cementos menores que las empleadas con la compactación manual.

- **Contenido y tipo de cemento:** el contenido y tipo de cemento influyen en gran parte en la mezcla debido a que el cemento es el material químicamente “activo” en la mezcla.

La más importante en lo que respeta al cemento en su contenido dentro del concreto porque a la medida que se aumenta se consiguen mayores resistencias esta afirmación se debe aplicar con precaución porque solo es válido a un límite a partir del cual la cantidad del cemento por encima de este no se hidrata totalmente y por tanto pasa a formar parte del concreto como un material inerte de relleno. Por otro lado se ha demostrado que para mezclas con una baja relación a/c, en las cuales se incrementa el contenido de este material a valores superiores a 470 Kg/m<sup>3</sup> se origina una disminución de la resistencia en especial cuando se utiliza

agregado de gran tamaño. Este comportamiento se debe al esfuerzo inducido por la contracción que al ser obstruida por la partícula de agregado causa agrietamiento de la pasta o a una pérdida de adherencia entre el cemento y el agregado.

- **Características de los agregados:** en general se puede decir que para una misma relación a/c, las partículas de agregados con una textura rugosa o de forma angular forman concretos más resistentes que otras redondeadas o lisas debido a que hay mayor trabazón entre los granos y gruesos y el mortero. Sin embargo con igual contenido de cemento los primeros exigen mayor cantidad de agua para una determinada manejabilidad y por ello el efecto sobre la resistencia no varía en forma apreciable.

**Granulometría** una masa de agregados cuya granulometría sea continua, permite elaborar mezcla de alta compacidad, mucho más densas y por lo tanto se consiguen mayores resistencias

**Influencia de tamaño máximo** en general, la diferencia y tamaño máximo de un mismo tipo de agregado bien gradado, tiene dos efectos opuestos en la resistencia a la compresión del concreto. En primer lugar, para una consistencia dada y para igual contenido de cemento, la utilización de tamaños máximos mayores requiere menos agua de mezclado que los agregados de tamaño máximos y menores .por otro lado, mezclas con la misma consistencia e igual relación a/c presentan resistencias más bajas cuando se utilizan agregados de tamaño máximo mayor. En particular se ha demostrado que para concreto de altas resistencias, mientras mayor sea la resistencia requerida, menor deberá ser el tamaño máximo.

- **Otros factores que influyen son:** tipo y dosificación de los aditivos, fraguado del concreto, curado del concreto, edad del concreto, calidad del agua.

**2.3.5 Compactación de suelos.** La compactación de suelos se fundamenta en el aumento de la resistencia y disminución de la capacidad de deformación que se obtiene al someter el suelo a técnicas convenientes, que aumentan el peso específico seco, disminuyendo sus vacíos.

La importancia de realizar una adecuada compactación es justamente calcular la cantidad de agua, ósea la “humedad óptima” que ha de tener un suelo, a fin de obtener una buena lubricación que permita, al compactarlo, alcanzar la mayor densidad posible, es decir, la “Densidad Máxima seca”

Beneficios de una buena compactación:

- Aumenta la capacidad para soportar cargas
- Impide el hundimiento del suelo
- Reduce el escurrimiento del agua
- Reduce el esponjamiento y la contracción del suelo
- Impide los daños de las heladas

## **2.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES PARA CCR**

**2.4.1 Agregados.** La calidad requerida de los agregados depende de las propiedades deseadas del CCR, principalmente su resistencia. Para un CCR de alta resistencia, es necesario un agregado de alta calidad. Para el CCR que no es sometido a esfuerzos o no está expuesto a condiciones de congelamiento y descongelamiento mientras está húmedo, pueden ser usados agregados de baja calidad.

Los agregados pueden ser materiales procedentes o no de trituración y comprenden agregados gruesos (grava) y finos (arena), los cuales constituyen aproximadamente del 75% al 85% del volumen de la mezcla.

Para evitar la segregación, obtener una mejor calidad superficial y facilitar el mezclado del material, se recomienda que el tamaño máximo sea de  $\frac{3}{4}$ ".

Los agregados a utilizar deben cumplir las especificaciones que se exigen para las mismas categorías de tráfico de proyecto en las bases granulares y las establecidas en la ICONTEC 174 de especificaciones de los agregados para hormigón.

Algunas características para tener en cuenta:

- Que resistan lo suficiente como para no triturarse bajo la acción del compactado por rodillos vibratorios
- Que no supere un máximo contenido de arcilla que daría como resultado un hormigón poco resistente
- Como árido fino debería emplearse arenas naturales o productos finos de machaqueo con una granulometría continua
- Debe cuidarse el tamaño máximo de los agregados
- Las proporciones óptimas dependerán de la gradación del árido fino y Serán el resultado de los ensayos previos definidos por distintas obras para cada tipo de obra
- Si el hormigón presenta signos de segregación debería incrementarse el contenido de finos
- La granulometría ideal para la demanda mínima de mortero será la que proporcione la máxima densidad del material seco compactado con la mínima área superficial.

**2.4.2 Cemento.** Los cementos recomendados para la utilización de pavimentos en CCR son aquellos capaces de producir bajo calor de hidratación, baja retracción y altas resistencias a largo plazo que contrarreste los fenómenos de fatiga con el fin de lograr un mayor espaciamiento entre las fisuras como por ejemplo los cementos puzolanicos tipo I y tipo II.

El contenido de cemento en el CCR no es inferior al contenido en los concretos convencionales, pero generalmente varía entre el 12% y el 14% del peso seco del total de los componentes.

**2.4.3 Agua.** El agua utilizada en mezclas de CCR debe estar libre de cantidad excesivas de álcalis, ácidos o material orgánico que pueden inhibir la adecuada ganancia de resistencia. La mayoría de las mezclas de CCR requiere de 89 a 119 Kg de agua por m<sup>3</sup> para agregados de tamaño máximo mayor que 2 pulg. (50mm).

El contenido de agua en el CCR suele estar entre el 4% y el 6% del peso seco total de los componentes, pues la humedad de la mezcla debe ser la óptima para obtener la máxima densidad seca con la energía de compactación del Proctor Modificado.

**2.4.4 Aditivos.** Pueden utilizarse aditivos que mejoren ciertas características de la mezcla. El empleo de reductores de agua (fluidificantes) hace posible conseguir las densidades requeridas con menores contenidos de agua, lo cual se traduce en un aumento de las resistencias.

Otro tipo de aditivos cuyo empleo se hace imprescindible en estos casos, salvo si la temperatura de puesta en obra es baja, son los retardadores de fraguado que aumentan el plazo de trabajabilidad del material.

La dosificación a utilizar depende del tipo de cemento que se emplee, del clima imperante en la zona, de la distancia de transporte de la mezcla y de la metodología usada para la puesta en obra. Esta suele variar entre un 0.4% y un 1% en peso en cemento.

**2.4.5 Aditivo mineral.** El uso de residuo minero en la mezcla CCR puede servir como reemplazo parcial del cemento para reducir la generación del calor, como reemplazo parcial del cemento para reducir costos y como un aditivo para aumento de finos y mejorar la maniabilidad al dosificar mezclas para volúmenes mínimos de pasta, ya que rellena los espacios que de otra forma sería ocupado por el cemento o el agua. Ocupar este espacio con agua, obviamente dará como resultado una reducción en la resistencia del concreto.

## **2.5 PROPIEDADES DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO**

Las propiedades del concreto convencional se presentan también en el concreto compactado con rodillo. Sin embargo deben cuidarse indispensablemente la resistencia a la flexión y la resistencia a la fatiga cuando este concreto seco va a ser utilizado en pavimentación.

Además se presentan otras propiedades como la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad, la retracción, la permeabilidad, la resistencia al desgaste, etc.

Las diferencias entre las propiedades del hormigón convencional y el compactado con rodillo se deben principalmente a la menor relación agua-cemento, al tipo de energía utilizada para lograr su compactación y a las diferentes proporciones de la mezcla.

**2.5.1 Resistencia a la compresión.** La resistencia del hormigón a la compresión con un buen curado y una temperatura aproximada igual depende en este caso de la relación A/C y del grado de compactación.

La medición de la resistencia a la compresión en el laboratorio se hace ensayando probetas cilíndricas compactadas. Existen diferentes métodos de compactación el proctor modificado, el martillo Kango con vibración y compresión superficial superior, el sistema francés de de vibrocompresión con vibración lateral y compresión superior y mediante el uso de mesas vibratorias como el consistometro Vebe con compresión superior (sobrecargada) y mesa vibratoria inferior; este último parece ser el que más se adapta a las características del concreto compactado con rodillo, para el desarrollo de este proyecto se uso proctor modificado ya que era el único disponible.

Es de anotar que si no se logra una adecuada compactación se produce una fuerte disminución en la resistencia a la compresión.

## **2.5.2 Resistencia a la flexión:**

**2.5.2.1 Modulo de rotura.** Es el esfuerzo máximo de tensión que soporta una viga sometida a flexión, en el momento de falla.

Al igual que en el concreto convencional, en el compactado con rodillo existe una buena correlación entre la resistencia a la tracción indirecta y el modulo rotura. Así mismo también se ha encontrado que existe una excelente correlación entre el modulo de rotura y la resistencia a la compresión. Se debe agregar que el modulo de rotura depende de buena parte de la adherencia entre el mortero y el agregado.

La resistencia a la flexión al igual que la de los concretos convencionales depende de la relación A/C, la edad, el curado, el tipo de agregado y la cuantía del cemento.

**2.5.3 Resistencia a la fatiga.** El fracturamiento por fatiga es extenso y suele ser considerado como el mayor o único criterio para el diseño de pavimentos de concreto, recientemente sólo se han considerado bombeo y erosión, otro criterio para tomarse en consideración incluye la sustentación y deterioro en las juntas del pavimento de concreto y las juntas reforzadas así como la socavación por corte en el concreto reforzado.

El fracturamiento por fatiga es causado probablemente por los esfuerzos que se inducen en el borde y en la mitad de la losa. El número permisible de repeticiones de carga para causar el fracturamiento por fatiga depende de la relación de esfuerzos entre el esfuerzo a la flexo-tensión y el módulo de ruptura del concreto. Ya que el diseño se basa en el borde cargado de la losa y sólo una pequeña porción de las cargas del tránsito son aplicadas a borde del pavimento, el número total de repeticiones de carga debe ser reducido a un mínimo equivalente de bordes cargados, de tal manera que ese mismo deterioro por fatiga sea obtenido. Esta aproximación es diferente para el análisis por fatiga en pavimentos flexibles donde el factor cambia y es usado como ajuste del número de repeticiones de carga.

**2.5.4 Propiedades elásticas.** Los principales factores que afectan a las propiedades elásticas del hormigón son la edad, el tipo de árido y la relación agua/cemento o calidad de la pasta. El modulo elástico del concreto aumenta con la edad y con el contenido de cemento. La discontinuidad de la pasta, por ser su volumen insuficiente, provocara la aparición de un volumen de huecos elevado, lo cual afectara negativamente al modulo elástico. Ciertos tipos de áridos (cuarcitas,

argilitas, etc.) confieren unas características de fragilidad al concreto que se traducen en elevados valores del modulo elástico.

Debe esperarse que con una adecuada dosificación y consolidación del CCR se obtengan valores similares a los del concreto convencional amasado con el mismo tipo de árido.

El aumento en la proporción de áridos que conlleva el CCR, y el consiguiente aumento en la densidad debería aumentar el modulo de elasticidad para un tamaño máximo del árido dado, estando provista la mezcla de suficiente pasta. Si esta fuese insuficiente, la densidad disminuirá con el aumento de los huecos de aire.

**2.5.5 Retracción.** El cambio de volumen potencial debido a la pérdida de humedad o retracción de secado, es significativamente bajo en el CCR debido a su menor contenido de agua de amasado frente al de un concreto convencional. La superficie está sujeta a la desecación, como sucede en los concretos, pero hay también menos pasta en superficie y el mayor volumen de árido restringe más el cambio de volumen. El principal efecto de la desecación superficial sería la microfisuración de la pasta alrededor de las partículas de árido. La retracción de secado resulta también afectada por la relación agua/cemento.

Generalmente las puzolanas naturales inducen mayores cambios de volumen autógeno en el concreto que las cenizas volantes o el cemento portland puro.

**2.5.6 Durabilidad.** La durabilidad del concreto se estima por su resistencia a la meteorización por ciclos hielo-deshielo, el ataque químico y la erosión o desgaste.

En el caso de la meteorización, influye la resistencia a la misma del árido y el contenido de aire incluido en el concreto. Este último resulta bajo en el CCR, por lo que será necesario una adecuada elección de los áridos para garantizar su durabilidad en lo que a meteorización se refiere. Es preciso insistir en los estudios que vienen realizándose para conseguir ocluir aire en el CCR.

Estudios realizados con CCR, muestran que la resistencia a la erosión se mejora con el empleo de tamaños de áridos más pequeños y texturas superficies suaves.

No existen aun estudios en cuanto a la resistencia a ataques químicos del CCR, pero parece lógico pensar que no diferirán mucho del concreto convencional.

**2.5.7 Permeabilidad.** La permeabilidad de una masa de concreto depende en gran medida del aire atrapado en el sistema de huecos. Como la cantidad de pasta es suficiente para minimizar el sistema de huecos, y el grado de compactación, consolida completamente la masa, el CCR es tanto o más impermeable que el concreto convencional.

Sin embargo, las filtraciones que pueden aparecer por no haberse conseguido una adecuada trabazón en las juntas horizontales, deben ser evitadas tratando que la mezcla cubra las juntas frías proporcionando un exceso de volumen de pasta, y evitando, en la medida de lo posible, el agrietamiento y la desecación.

### **3. DISEÑO LA MEZCLA PARA CCR**

Se basa en escoger una proporción de mezclas utilizando el método de suelos simplificado o concepto de compactación de suelos.

Las mezclas de CCR han sido proporcionadas desde 1960 usando principios de compactación de suelos, los mismos fundamentos han sido la base para determinar el contenido de cemento para mezclas de suelo-cemento por más de 50 años. La teoría de compactación de suelos considera al CCR como un suelo procesado o agregado enriquecido con cemento, cuyo diseño de mezcla está basado en la relación humedad-densidad. Para un agregado específico y un contenido de material cementante, el objetivo es determinar un contenido óptimo de humedad para un esfuerzo de compactación de laboratorio que corresponde al esfuerzo o densidad aplicable por los rodillos en el campo<sup>1</sup>.

El método se inicia con una granulometría de agregados fija que involucra un programa de ensayos de variación de contenidos de material cementante y la comparación de resultados una vez que el contenido de agua es determinado.

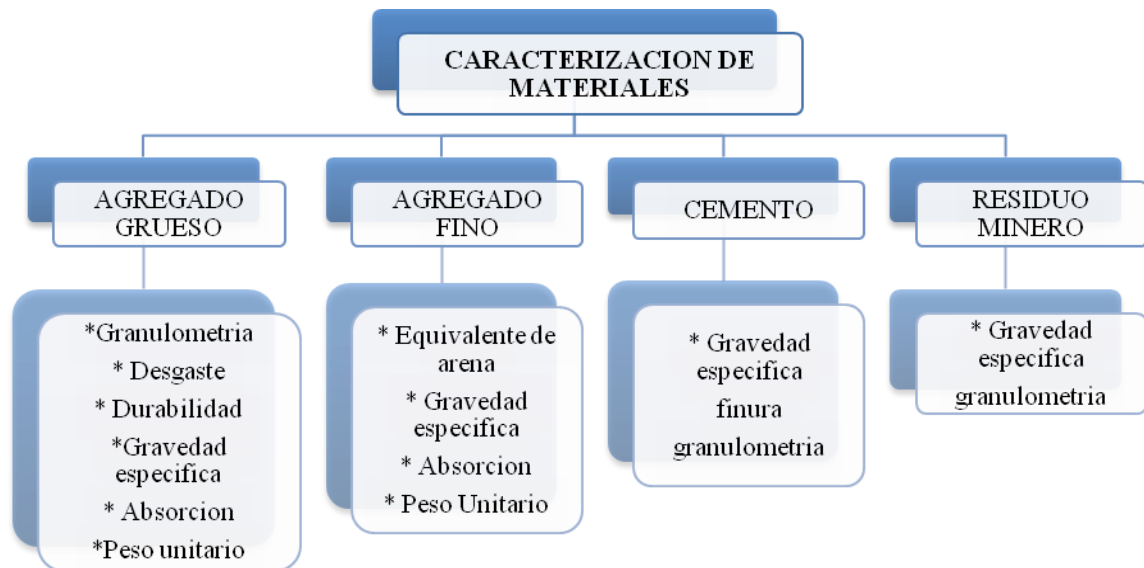
#### **3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES**

Es de gran importancia tener una caracterización de los materiales a usar para el estudio, dependiendo de la calidad de los materiales será la calidad del comportamiento del concreto, Inicialmente se ha realizado ensayos pertinentes para la caracterización de los materiales como fueron:

---

<sup>1</sup> Rico Rodríguez, Ingeniería de suelos en vías terrestres, volumen, Editorial Imusa

Figura 5. Caracterización de materiales



### Caracterización de materiales:

#### AGREGADO GRUESO:

- **Ensayo de granulometría, método manual (I.N.V. E – 123)**

Su objeto es determinar en porcentaje en peso de los diferentes tamaños de las partículas de suelo y con estos datos construir la curva granulométrica del material. Se pasa una muestra de suelo seco a través de diferentes tamices, los cuales se enumeran según las aberturas que tienen por pulgada y se pesa la cantidad de suelo retenido en cada tamiz.

Figura 6. Granulometría agregado grueso



- **Ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles**

El método se emplea para determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados, empleando la citada máquina con una carga abrasiva.

Este ensayo ha sido ampliamente usado como un indicador de la calidad relativa o la competencia de diferentes fuentes de agregados pétreos de similares composiciones mineralógicas. Los resultados no brindan automáticamente comparaciones válidas entre fuentes marcadamente diferentes en origen, composición o estructura.

Figura 7. Maquina de los Ángeles



## AGREGADO FINO

- **Ensayo de granulometría, método mecánico (I.N.V. E – 123)**

Su objeto es determinar en porcentaje en peso de los diferentes tamaños de las partículas de suelo y con estos datos construir la curva granulométrica del material. Se pasa una muestra de suelo seco a través de diferentes tamices, los cuales se enumeran según las aberturas que tienen por pulgada y se pesa la cantidad de suelo retenido en cada tamiz.

Figura 8. Granulometría agregado fino



- **Ensayo equivalente de arena**

Este ensayo tiene por objeto determinar la proporción relativa del contenido de polvo fino nocivo, o material arcilloso, en los suelos o agregados finos. Es un procedimiento que se puede utilizar para lograr una correlación rápida en campo.

Figura 9. Ensayo equivalente de arena



## **RESULTADOS CARACTERIZACION DE MATERIALES**

- **AGREGADO GRUESO**

Procedente de la planta de trituración de la mina del cerrejón.

- Tamaño máximo: 3/4 "
- Desgaste en la máquina de los ángeles: 29%
- Gravedad específica real: 2.73
- Gravedad específica aparente: 2.60
- Gravedad específica aparente SSS: 2.65
- Absorción: 1.94%
- Peso unitario compactado: 1609 kg/m<sup>3</sup>
- Peso unitario suelto: 1110 kg/m<sup>3</sup>

- **AGREGADO FINO**

Procedente de cantera en la mina del cerrejón

- Equivalente de arena: **88.5%**
- Gravedad específica real: **2.66**
- Gravedad específica aparente: **2.54**
- Gravedad específica aparente SSS: **2.58**
- Absorción: **1.94%**
- Peso unitario compactado: **1.636 kg/m<sup>3</sup>**
- Peso unitario suelto: **1.272 kg/m<sup>3</sup>**

- **CEMENTO**

Se utilizó cemento Portland Tipo I de la fábrica CEMENTOS DIAMANTE y se le realizaron los siguientes ensayos:

- Gravedad específica: **3**

- **RESIDUO MINERO**

Es un material producido de la excavación al explotar el carbón este yacimiento carbonífero se encuentra en la formación Cerrejón la cual está constituido por arenisca, limonita, arcillolita y mantos de carbón en general. El color de los sedimentos en general es gris variando de tono claro a oscuro. Figura 10.

Las areniscas son de dos tipos calcáreas y feldespáticas. Las primeras son de grano fino a medio compuestas de cuarzo, moscovita y líticos en matriz calcárea, bien cementadas y duras, presentan restos de plantas y materia orgánica en los planos de estratificación. Las segundas son de grano fino y están compuestas por

cuarzo, feldespato, micas y líticos en una matriz arcillosa. Ocasionalmente se presenta cemento calcáreo, duras frecuentemente carbonosas, con tasas de pirita en forma diseminada o en nódulos. La arcillolita es de color gris claro a oscuro, con abundantes restos de plantas, localmente calcárea con predominio de arcillolita hacia la parte inferior de la secuencia en donde se encuentran delgadas capas de caliza. Lo que visualmente se puede determinar que este residuo es una combinación de arcillolitas con porcentajes de cemento calcáreo.

Se determino la granulometría, donde el tamaño máximo de estas partículas son retenidas en el tamiz número cuatro, y contiene un porcentaje de fino que corresponde a un 30% que pasa por el tamiz 200, lo que hace interesante la utilización de este material como aditivo mineral en la mezcla de CCR, el cual la mina El Cerrejón produce 200 millones de toneladas al año de este residuo, además ocasionando impacto ambiental.

➤ Gravedad específica: **3.24**

Figura 10. Residuo minero



### 3.2 CONTENIDO DE AGREGADO

Los agregados utilizados son provenientes de trituradoras ubicadas en la mina de carbón del cerrejón con tamaño máximo de  $\frac{3}{4}$  de pulg, este tamaño ayudará a minimizar los problemas de segregación durante el mezclado, transporte, descargue y extendido del CCR durante la construcción. El porcentaje de finos provee los materiales finos óptimos para una matriz compactada densamente (y últimamente mayor resistencia) y provee la cantidad óptima de pasta para mejorar la trabajabilidad.

Los finos deben ser no plásticos o tener un bajo índice de plasticidad ( $IP < 5$ ) y se permiten hasta el punto que rellenen los vacíos para reducir los requerimientos de agua y mejorar la compactibilidad.

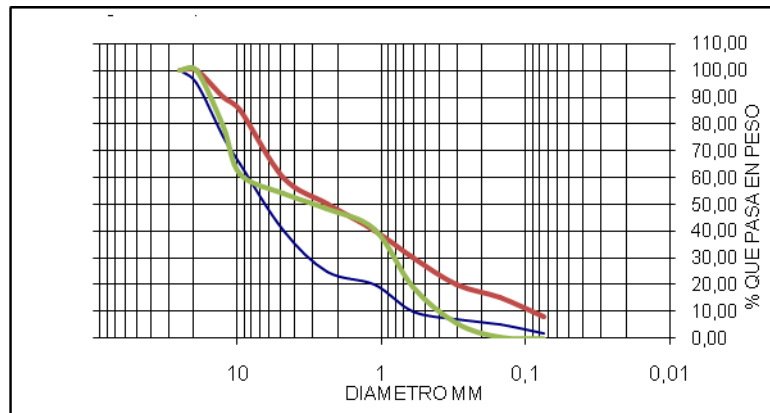
Figura 11. Triturado proveniente del Cerrejón



Muchas son las investigaciones que se han desarrollado acerca de lo que es una buena granulometría de agregados para concreto la mayoría se basan en la capacidad de acomodamiento y compactación de las partículas (compacidad) dentro de un volumen dado, para lograr la máxima densidad y con esto la máxima resistencia. Para el diseño de concretos compactado con rodillo la asociación de

cemento portland (PCA) ha desarrollado curvas granulométricas las cuales proporcionan una gradación ideal para el CCR<sup>2</sup>. Figura 12.

Figura 12. Curvas granulométricas P.C.A



### Gradaciones ideales para CCR según P.C.A

Para obtener un buen concreto, es necesario que la mezcla de arena y de la de piedra logre una granulometría que proporcione masa unitaria máxima puesto que con esta condición el volumen de los espacios entre partículas es mínimo y por consiguiente la cantidad de la pasta para pegarlo y para llenar los espacios entre ellas será el mínimo, lo cual dará lugar a una mezcla de mejores condiciones técnicas y además, económica.

Teniendo en cuenta la curva de la granulometría de los agregados, se ha buscado una proporción de 55/45 (grueso/fino) de agregados como se puede observar en la tabla 3 para el diseño de una mezcla, donde la gradación que corresponde a este porcentaje es la apropiada a la gradación ideal propuesta por la PCA.

<sup>2</sup> [www.Cement.org/water/dams\\_rcc.asp](http://www.Cement.org/water/dams_rcc.asp)

Tabla 3. Granulometría y proporción de los agregados

tamiz	% DE FINOS QUE PASA	% DE GRUESOS QUE PASA	Finos 0.55	Grueso 0.45	Gradación
3/4	100	100	55	45	100
1/2	100	53.15	55	23.918	78.9175
3/8	100	14.2	55	6.39	61.39
4	98	0.01	53.9	0.0045	53.9045
8	87.5	0	48.125	0	48.125
16	73.5	0	40.425	0	40.425
30	34.5	0	18.975	0	18.975
50	10	0	5.5	0	5.5
100	1	0	0.55	0	0.55

### 3.3 CONTENIDO DE AGUA

El contenido del agua es quizás el ingrediente fundamental en la elaboración del concreto compactado con rodillo, debido a que desempeña una función muy importante en estado fresco y endurecido. **Duff Abrams** en el año de 1918, señalando que para un concreto perfectamente compactado, empleando materiales con las mismas características y condiciones de ensayos, las resistencias del concreto tendrán valores más altos con menos cantidades de agua<sup>3</sup>.

Las resistencias del CCR son sensibles al cambio en el contenido de agua en especímenes; si el contenido de agua de especímenes está uno o dos por ciento puntos arriba o debajo del óptimo contenido de humedad, resultará una pérdida de resistencia.

El porcentaje de agua utilizado en la mezcla es el porcentaje correspondiente al valor de la humedad óptima el cual corresponde a la densidad máxima seca

<sup>3</sup> Concreto y mortero, tecnología, propiedades, ensayos de calidad ASOCRETO, segunda edición 1997, Colombia, pagina 128

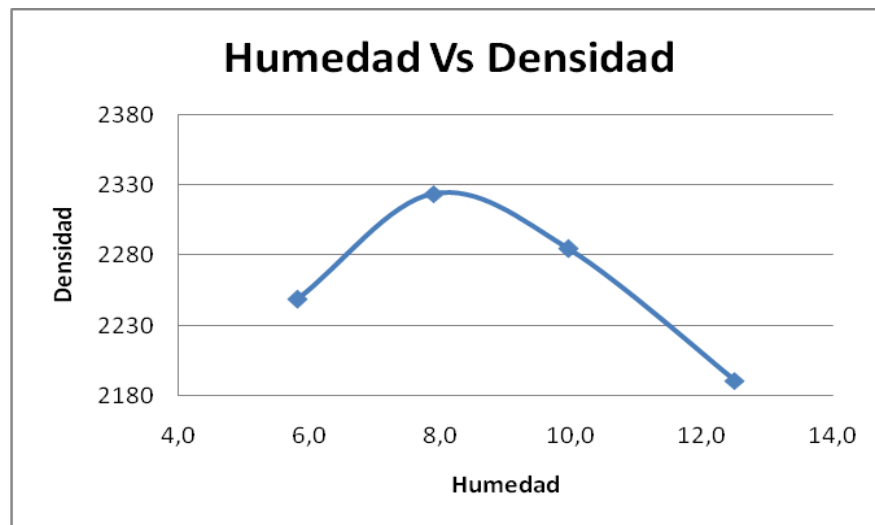
garantizando la máxima energía de compactación del Proctor Modificado<sup>4</sup> (ASTM D 1557). Figura 12.

Desarrollando el ensayo de proctor modificado se obtiene que para una energía de compactación de 2682 ft-lb/in<sup>3</sup>, se obtiene una humedad óptima de 7.9 y una densidad máxima seca de 2237 kg/m<sup>3</sup>. Figura 13

Figura 13. Ensayo proctor modificado



Figura 14. Humedad Vs densidad



<sup>4</sup> Proctor modificado, Rico Rodríguez, Ingeniería de suelos en vías terrestres, Volumen 1, editorial Imusa, Capítulo 4, página 153

Tabla 4. Resultados proctor modificado

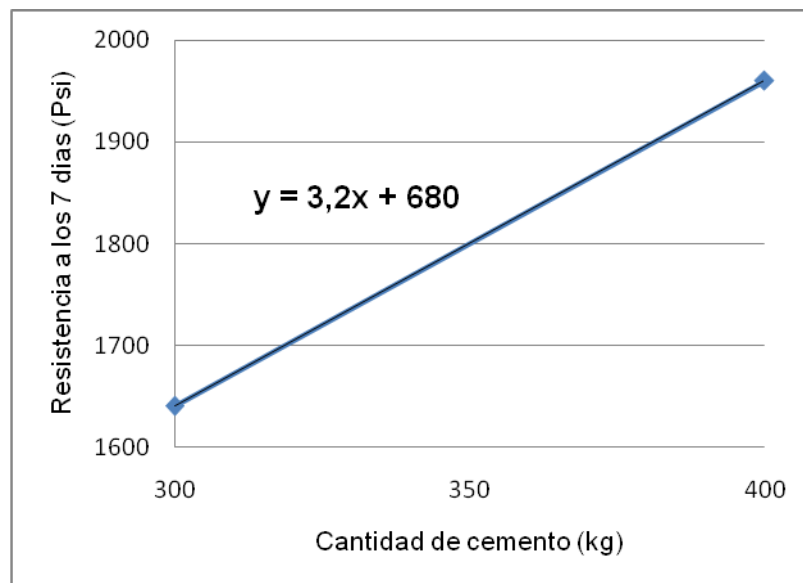
Humedad óptima	Densidad máx. seca	Energía compactación
7.9	2237 kg/m <sup>3</sup>	2682 ft-lb/in <sup>3</sup>

### 3.4 CONTENIDO DE CEMENTO

Inicialmente se toman dos cantidades de cemento correspondientes a 300Kg/m<sup>3</sup> y 400Kg/m<sup>3</sup> con las que se fabrican dos probetas de prueba que se fallan a los 7 días, buscando una resistencia de diseño aproximada a 4500psi a los 28 días.

Interpolando los valores obtenidos a los 7 días figura 15 y teniendo en cuenta que el concreto alcanza aproximadamente el 60% de su resistencia máxima, se toma un valor de 350 kg/m<sup>3</sup> para la fabricación de las probetas y viguetas que corresponde al 15% del total de la mezcla.

Figura 15. Resistencia a la compresión (7 días)



### **3.5 CONTENIDO DE RESIDUO MINERO**

Para los especímenes con residuo estéril como es llamado en el cerrejón se le adiciona un 5% de este material y un 10% de cemento de esta manera determinar el comportamiento del residuo dentro de la mezcla de CCR.

## **4. PREPARACION DE ESPECIMENES PARA CÁLCULO DE RESISTENCIAS**

Se fabricaron dos tipos de mezclas para los especímenes.

Una corresponde a un concreto con adiciones de residuos mineros y otro con los materiales de concreto convencional.

### **4.1 PREPARACIÓN DE CILINDROS PARA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CCR**

Para la fabricación de los cilindros en CCR se tomaron las siguientes especificaciones:

**4.1.1 Cilindros para el ensayo.** Los cilindros para ensayos de CCR son del mismo tamaño que los cilindros convencionales de concreto: 152mm (6 pulg.) de diámetro por 304 mm (12 pulg.) de altura. Figura 16

Antes de llenar los moldes, se colocan sobre una superficie horizontal, rígida y lisa. Se hacen tres probetas por cada patrón que se quiera controlar por cada edad, 7 y 28 días.

**4.1.2 Toma de muestras.** La muestra se tomará en un recipiente limpio no absorbente y estanco, y deberá ser totalmente remezclado en el mismo, antes del llenado de las probetas.

**4.1.3 Llenado de las probetas y compactación del hormigón.** Se procede al llenado de las probetas, colocando el hormigón en 12 capas de aproximadamente 4 cm de altura cada una. Una vez colocada cada capa se la compacta con 55 golpes usando el martillo de Proctor Modificado uniformemente distribuidos sobre su superficie aplicando el mismo esfuerzo de compactación del proctor modificado (ASTM 1557)<sup>5</sup>. En la primera capa, los 55 golpes deben atravesarla íntegramente pero sin golpear el fondo del molde. El llenado de la última capa se hace con un exceso de hormigón.

Algunas variaciones del uso del martillo del Proctor Modificado han sido usadas debido a que el molde cilíndrico es más grande que el molde del Proctor, es necesario hacer un ajuste al procedimiento estándar, para alcanzar el mismo esfuerzo de compactación. En la tabla 5 se muestra el número de capas y caídas del martillo para alcanzar el mismo esfuerzo de compactación.

Finalmente, se enrasa la probeta al nivel del borde superior del molde, mediante una cuchara de albañil, retirando el hormigón sobrante y trabajando la superficie hasta conseguir una cara perfectamente plana y lisa.

Tabla 5. Energía de compactación para cilindros en CCR

ENERGIA DE COMPACTACION						
CILINDRO	# Golpes	# Capas	Peso martillo	Altura caída	Volumen (m <sup>3</sup> )	Energía (ft-lb)/in <sup>3</sup>
Proctor modificado convencional de concreto	56	5	0.0445	0.4572	0.002	2682
	55	12	0.0445	0.4572	0.005	2685

**4.1.4 Trato a dar a las probetas terminadas.** Las probetas deben dejarse almacenadas, sin desmoldar durante 24 horas, en condiciones de temperatura

<sup>5</sup> Norma ASTM 1557

ambiente de 21° C a 6° C, evitando movimientos, golpes, vibraciones y pérdida de humedad.

#### **4.1.5 Manejo y curado de las probetas una vez fraguado el hormigón.**

Después de 24 horas de confeccionadas, las probetas se desmoldan y transportan al laboratorio para su curado, se almacenan a temperaturas de 23° C a 2° C en una cámara húmeda con humedad relativa ambiente donde quedan hasta el momento del ensayo. Figura 16

Figura 16. Cilindros en CCR



## **4.2 PREPARACIÓN DE VIGAS PARA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE CCR**

Se han fabricado unas vigas para desarrollar el Método de la viga simple con carga en los tercios de la luz.

**4.2.1 Vigas para el ensayo.** Las vigas para ensayos de CCR son del mismo tamaño que las vigas convencionales de concreto: 70.6 cm x 16cm x 15cm. Para un volumen de 0.0169 m<sup>3</sup>

Antes de llenar los moldes, se colocan sobre una superficie horizontal, rígida y lisa. Deben hacerse por lo menos tres probetas por cada patrón que se quiera controlar por cada edad, generalmente 28 días.

**4.2.2 Toma de muestras.** La muestra se toma en un recipiente limpio no absorbente y deberá ser totalmente remezclado en el mismo, antes del llenado de las probetas.

**4.2.3 Llenado de las vigas y compactación del hormigón.** Se procede al llenado de las vigas, colocando el hormigón en 6 capas de aproximadamente 3 cm de altura cada una. Una vez colocada cada capa se compacta con 370 golpes usando el martillo de Proctor Modificado, uniformemente distribuidos sobre su superficie aplicando el mismo esfuerzo de compactación del proctor modificado (ASTM 1557)<sup>9</sup>. Tabla 6.

En la tabla 5 muestra el número de capas y caídas del martillo para alcanzar el mismo esfuerzo de compactación.

Finalmente, se enrasa la probeta al nivel del borde superior del molde, mediante una cuchara de albañil, retirando el hormigón sobrante y trabajando la superficie hasta conseguir una cara perfectamente plana y lisa.

Tabla 6. Energía de compactación viga en CCR

ENERGIA DE COMPACTACION						
MOLDE	# GOLPES	# CAPAS	PESO MARTILLO	ALTURA CAIDA	VOLUMEN	ENERGIA
Proctor modificado	56	5	0.0445	0.4572	0.002	2682
viga	370	6	0.0445	0.4572	0.016	2666

**4.2.4 Trato a dar a las vigas terminadas.** Las vigas deben dejarse almacenadas, sin desmoldar durante 24 horas, en condiciones de temperatura ambiente de 21° C a 6° C, evitando movimientos, golpes, vibraciones y pérdida de humedad.

**4.2.5 Manejo y curado de las vigas una vez fraguado el hormigón.** Después de 24 horas de confeccionadas, las vigas se desmoldan y transportan al laboratorio para su curado, se almacenan a temperaturas de 23° C a 2° C en una cámara húmeda con humedad relativa ambiente donde quedan hasta el momento del ensayo.

Figura 17. Elaboración y ensayo a flexión vigas



### **4.3 RESULTADOS DE LAS RESISTENCIAS COMPRESION Y FLEXION A LOS 28 DIAS**

**4.3.1 Probetas.** Al fallar las probetas a compresión se tiene que para probetas en concreto compactado con rodillo que contienen agregado, agua, cemento, la resistencia a la compresión alcanza valores de 4500 psi (31.5 Mpa) a los 28 días.

Para probetas que contiene cemento, agua, agregado y residuo minero se obtiene una resistencia de 3200psi (22.4 Mpa); en la tabla 7 se muestra los porcentaje de los materiales en la mezcla y las resistencias a la compresión correspondientes a los 28 días para un CCR y un concreto hidráulico convencional.

Tabla 7. Resistencia a la compresión cilindros en CCR

<b>Probeta</b>	<b>% cemento</b>	<b>% agua</b>	<b>% A. grueso</b>	<b>% A. fino</b>	<b>% R. minero</b>	<b>Resistencia 28 días (Psi)</b>
CCR sin residuo minero	15	7,9	34,69	42,4	0	4500
CCR con residuo minero	10	7.9	34,69	42,4	5	3200
Concreto convencional	15	12.5	34,69	42,4	0	3000

**4.3.2 Vigas en CCR.** Al fallar las vigas de concreto compactado con rodillos con los mismos porcentajes en las mezclas, se calcula del modulo de rotura R de acuerdo a la norma ASTM C78<sup>6</sup>.

1. Si la fractura se inicia en la superficie a tracción, dentro del tercio medio de la luz libre de la viga, calcule el modulo de rotura de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$R = \frac{PL}{b * d^2}$$

Donde

R= Modulo de rotura, (N/m<sup>2</sup>)

P=Carga máxima aplicada (N)

L= Luz libre entre apoyos (mm)

b=ancho viga (mm)

d=altura viga (mm)

<sup>6</sup> Norma ASTM C78

2. Si la fractura ocurre en la superficie a tracción por fuera del tercio medio de la luz libre de la viga, pero a una distancia no mayor que el 5% de la luz:

$$R = \frac{3 * P * a}{b * d^2}$$

Para las vigas la falla se encontró dentro del tercio medio de la luz libre de la viga, por lo tanto se aplica el primer caso, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 8. Resistencia a la flexión vigas en CCR

VIGA	P (N)	L (mm)	b (mm)	d (mm)	R (Kg/cm <sup>2</sup> )	R (Psi)
1	22540	720	152.4	152.4	46.78	668.3
2	24500	720	152.4	152.4	50.85	726.4
3	25480	720	152.4	152.4	52.89	754.3

Se toma un valor promedio de la resistencia a la flexión de 716 Psi.

En la tabla 8 se consignan los valores de la resistencia a la flexión, compresión y el modulo elástico para cada una de las mezclas diseñadas.

### Calculo del modulo de elasticidad

El módulo de elasticidad o módulo de Young (E) de cualquier material es una medida del comportamiento esfuerzo-deformación del material<sup>7</sup>. En el análisis mecanicista de pavimentos, el módulo de elasticidad del concreto tiene un fuerte efecto sobre la deflexión del pavimento y los esfuerzos en toda la estructura de pavimento.

<sup>7</sup> Portland Cement Association. Diseño de pavimentos de concreto para aeropuertos, primera edición, Imusa, México 1997, pagina 21

A menudo no es conveniente para agencias de carreteras desarrollar pruebas de resistencia a la flexión y pruebas de módulo de elasticidad en probetas de concreto. Estas pruebas pueden ser incómodas, consumidoras de tiempo y caras. En comparación, una prueba de resistencia a la compresión es rápida, conveniente y una medida fácil de la resistencia de materiales cementantes estabilizados y de concreto hidráulico. La resistencia a la compresión medida puede ser utilizada para estimar otras características del material tales como la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad.

$$E_c = 6750 * MR$$

$$E_c = 57000 f'c^{1/2}$$

Donde:

$E_c$ : módulo de elasticidad del concreto en (Psi)

$f'c$ : resistencia a la compresión del concreto a los 28 días (Psi)

$MR$ : módulo de ruptura del concreto (Psi)

Tabla 9. Resistencias y modulo de elasticidad

	<b>CCR Sin residuo minero</b>	<b>CCR con residuo minero</b>
F'c R. compresión 28 días	4500 psi o 31.5 Mpa	3200 psi o 22.4 Mpa
Ec: M. elasticidad concreto	3823676 psi o 26765 Mpa	3224406psi o 22570Mpa
Mr: modulo rotura	716 psi o 5 Mpa	540psi o 4 Mpa

## 5. DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO

Se propone hacer el diseño para un pavimento en concreto compactado en la zona de taller de llantas de la mina El Cerrejón. Figura 18

Figura 18. Taller de llantas



### 5.1 CALCULO DE ESFUERZOS POR MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Se utiliza el software ANSYS<sup>8</sup> estructural que es un modelador de estructuras que utiliza elementos finitos.

El método de elementos finitos se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua a un modelo discreto aproximado. Se usa un elemento finito (solido brick 8 node 45) con 8 nodos y tres grados de libertad en cada nodo.

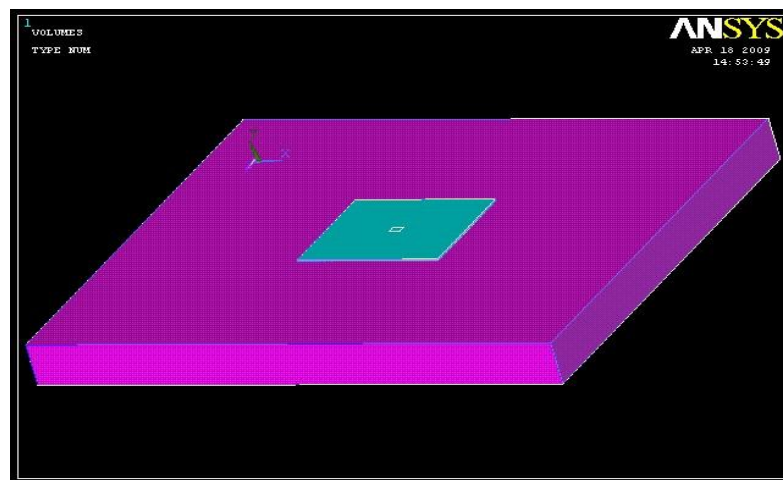
Se configura dos sólidos de dimensiones finitas correspondientes a: Un suelo que corresponde a la subrasante del taller de llantas donde se propone evaluar el

---

<sup>8</sup> ANSYS Multiphysics8.1

pavimento, con dimensiones de 30x30 metros de área y altura de 3 metros y el otro sólido que es una placa en CCR de dimensiones 8x8 metros y profundidad o espesor de la placa variable. Se supone que son placas de CCR separadas por juntas. Figura 19.

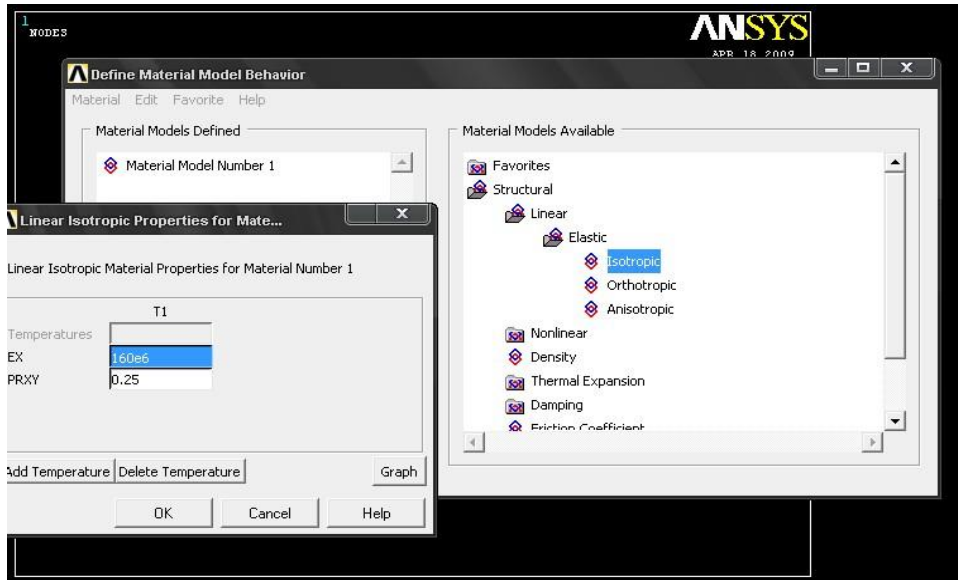
Figura 19. Sólidos de diseño



Se le asignan a los sólidos propiedades de un material elástico isotrópico recomendadas por Montejo Alfonso<sup>9</sup> para modelar con elementos finitos estructuras de pavimentos. De la subrasante se tiene una capacidad portante de 16% por medio de la prueba de CBR (anexo G), lo que proporciona un modulo de elasticidad de 160Mpa. A la placa de CCR se le aplica un modulo de elasticidad de 26785 Mpa calculados en la tabla 9. Se toma un modulo de poisson de 0.25 y 0.15 para cada uno de los sólidos respectivamente figura 20.

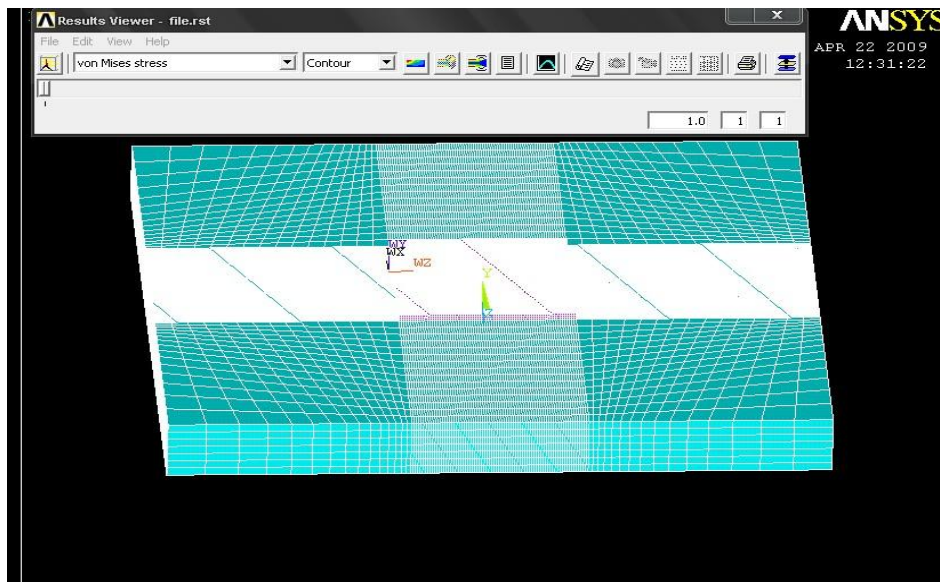
<sup>9</sup> Ingeniería de pavimentos, Montejo Alfonso, tercera edición, tomo I, capítulo 5 páginas 174-175, Bogotá 2006, Universidad Católica de Colombia.

Figura 20. Propiedades para una material elástico isotrópico



Al modelo se le restringe los desplazamientos en X Y y Z en todas las áreas menos en las de la vista superior. Es de vital importancia colocarle mallas a los elementos debido a que es el mecanismo que usa los elementos finitos para discretizar y dar soluciones a cada problema figura 21.

Figura 21. Modelo enmallado.



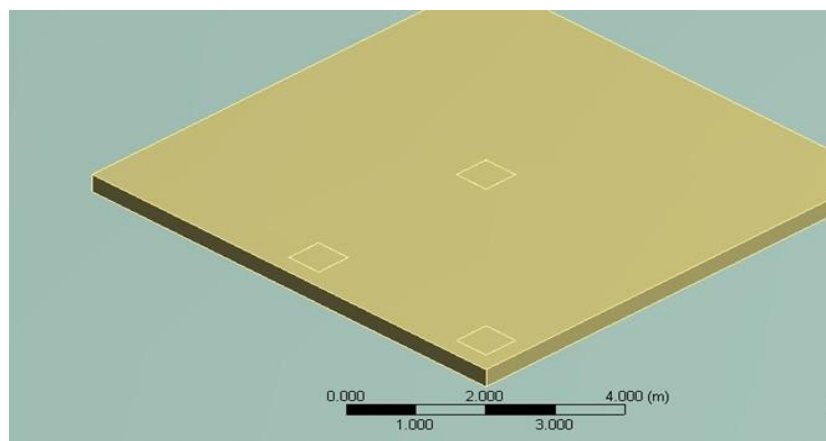
## Carga de diseño

Para la carga de diseño se le aplica la presión que le ejerce una llanta al pavimento en un área de 60 x 60 cm que corresponde a la huella de vehículo de diseño CAT 988H figura 22., el valor de la carga representativa corresponde a 13.75 toneladas por llanta y se varia el lugar de aplicación de la carga. Recomienda la PCA que se debe aplicar la carga en el borde, en una esquina y en la mitad del modelo. Figura 23.

Figura 22. Vehículo de diseño



Figura 23. Cargas aplicadas en diferentes partes de la placa



Una ventaja que se debe reconocer en el método del PCA es que toma el tráfico real que estima circulará sobre el pavimento, sin convertirlo Ejes Sencillos Equivalentes.

Con estos parámetros se calcula la solución del modelo el cual presenta los valores de esfuerzos críticos para el diseño (anexo H), se encuentra que los valores de esfuerzos críticos corresponden a el análisis de cuando se aplico la carga en la esquina de la placa y servirá para realizar el diseño definitivo.

Se anexa el comando del modelo (anexo I). Figura 24

## **5.2 MÉTODO DE LA P.C.A., PARA CÁLCULO DE ESPESORES DE PAVIMENTO**

El diseño se ha determinado basado en parámetros del Método de la pórtland cement association (PCA), que es exclusivamente un método de diseño desarrollado para pavimentos de concreto. Este método se fundamenta en varias teorías de pavimentos como Westergaard, Picket and Ray, así como de elementos finitos. También la experiencia en el comportamiento de varias pruebas e investigaciones como la Arlington Test y diversos proyectos de la misma PCA<sup>10</sup>. Y derivado de lo anterior se generó finalmente este método de diseño.

El método de diseño de pavimentos PCA establece los siguientes criterios:

- **Análisis de Fatiga:** esta sirve par mantener los esfuerzos que se producen dentro de los limites de seguridad, ya que el paso de cargas sobre las losas del pavimentos producen esfuerzos que se convierten en agrietamientos.
- **Análisis de Erosión:** Para limitar los efectos de la deflexión del pavimento en los bordes de las losas, juntas, esquinas y controlar así la erosión de la fundación y de los materiales de las bermas, o sea controlar el bombeo,

---

<sup>10</sup> Diseño de pavimentos de concreto para aeropuertos, primera edición, Imusa, México 1997- pagina 58

desnivel entre losas y deterioro de las bermas aspectos que son independientes de la fatiga.

**Consideraciones fundamentales que son base de diseño de la PCA (1966)<sup>11</sup>son:**

- El espesor de la losa debe ser uniforme. Debido a que ocurren pocas aplicaciones de carga en los bordes de las losas, el efecto de las cargas en los bordes no es crítico. Pero disminuir el espesor en bordes sería impráctico y costoso.
- Los esfuerzos críticos ocurren cuando las ruedas se posicionan en el borde de la junta transversal, directamente debajo el punto donde las repeticiones de carga son más frecuentes los esfuerzos por otras posiciones de carga de las ruedas son pequeños.
- Los máximos esfuerzos a la tracción ocurren en la parte inferior de la losa y directamente bajo carga; los momentos producidos actúan en un plano vertical paralelo al borde de la junta.
- Aunque la previsión de una efectiva transferencia de carga en la sección transversal de las juntas es esencial para prevenir que ocurran fallas, ninguna medida es adoptada para reducir el resultado en los esfuerzos.
- El objetivo del diseño es prevenir la falla por fatiga de flexión que puede darse bajo la acción repetida de cargas. Así pues puede ignorarse el efecto de las cargas de rueda que producen esfuerzos

**Determinación de la fatiga del CCR**

La cantidad de daño por fatiga que ocurre en una losa se estima utilizando la relación propuesta por Miner (1945)<sup>12</sup>. Este método supone que un pavimento de

---

<sup>11</sup> Diseño de pavimentos de concreto para aeropuertos, primera edición, Imusa, México 1997- pagina 58

<sup>12</sup> Miner M.A Cumulative Damage in fatigue transactions, American Society of Mechanical Engineers, Volumen 67, 1945, página 159-164

concreto tiene un tiempo de vida por fatiga finito y puede resistir un número máximo de aplicaciones de carga (N) de una carga de tránsito dada antes de que se presente la fractura. Cada carga individual aplicada por el tránsito (n) decrece la vida del pavimento en una cantidad infinitesimal.

El modelo de fatiga presentado por la PCA (Portland Concrete Association) asume un límite en el nivel de esfuerzos por debajo de 0.45, se asume que el daño por fatiga no ocurre. Esto significa que un número infinito de aplicaciones de esfuerzos debajo de este nivel puede ser aplicado sin causar la falla.

Relación de esfuerzos para un espesor de losa de 35 Cm con carga aplicada en la esquina.

Figura 24 Esfuerzos crítico del modelo

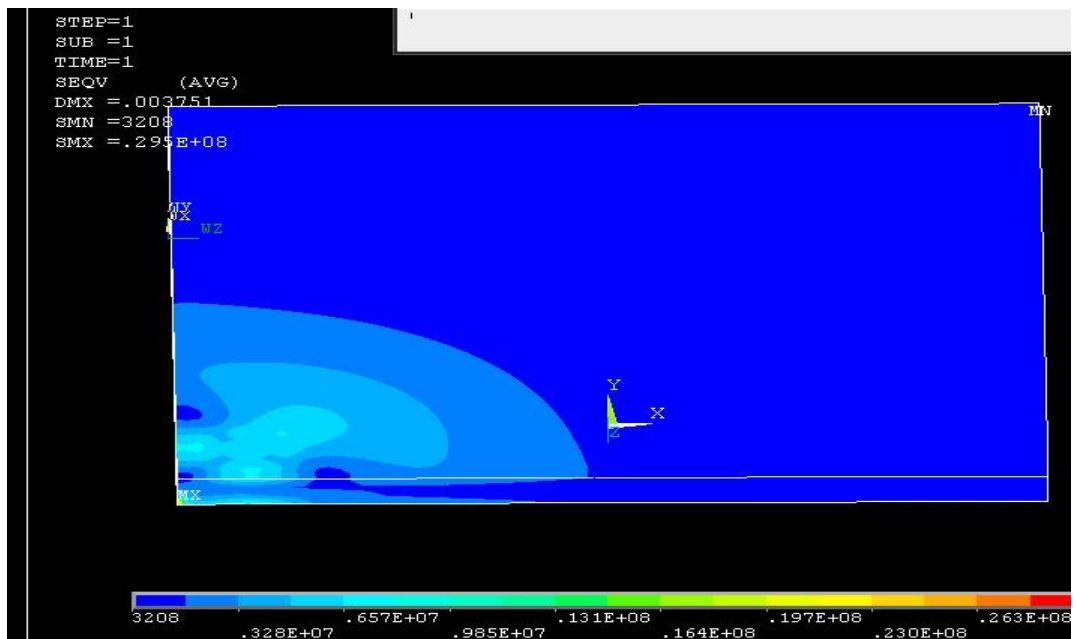
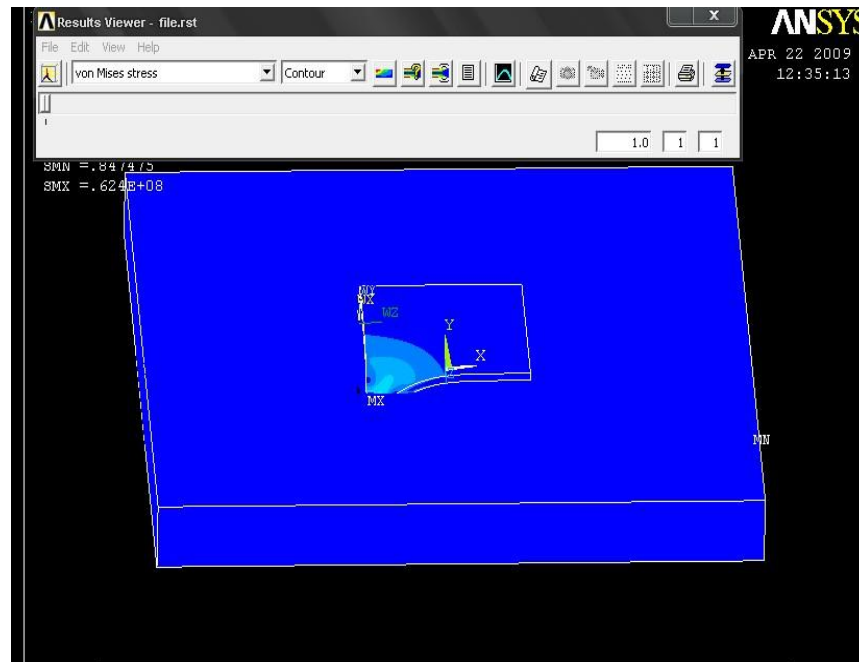


Figura 25. Deformada del modelo



$$SR = \frac{\sigma}{MR}$$

Donde

$\sigma$ : es el esfuerzo critico en la losa debido a una carga dada en Mpa tiene un valor de 2.63 Mpa

MR modulo de rotura del concreto a los 28 días en Mpa

SR: es la relación de esfuerzos

$$SR = 2.6 \text{ Mpa} / 5 \text{ Mpa}$$

SR tiene un valor de 0.526

Aplicando la ley de Miner lo que nos permite tener un número permisible de cargas de **401830** para 50% de agrietamiento en losas

**Ley de Miner**

$$N = \left( \frac{(4.2577)}{(SR - 0.4325)} \right)^{3.268}$$

Para SR ENTRE 0.45 Y 0.55

$$N = 401830$$

El vehículo de diseño tiene una ocurrencia de llegada al taller de llantas cada media hora, las 24 horas del día, y se asume que el crecimiento de esta tasa es constante por lo menos en los 20 años siguientes. Las repeticiones de carga esperadas para esta zona en 20 años son de **350400**.

De esta manera el espesor de 35 cm es apto para un pavimento en este taller.

### **5.3 EJECUCIÓN DE JUNTAS**

Los tipos de juntas más comunes en los pavimentos de concreto son:

1. Juntas transversales de contracción
2. Juntas transversales de construcción
3. Juntas transversales de expansión/aislamiento
4. Juntas longitudinales de contracción
5. Juntas longitudinales de construcción

La zona de taller de llantas donde se propone construir el pavimento en CCR tiene un área de 6400 m<sup>2</sup> que corresponde a una longitud por cada lado de 80 metros, se usaran juntas transversales de construcción cada 3 metros y juntas longitudinales cada 8 metros. Figura 26.

Figura 26. Distribución de juntas vista en planta

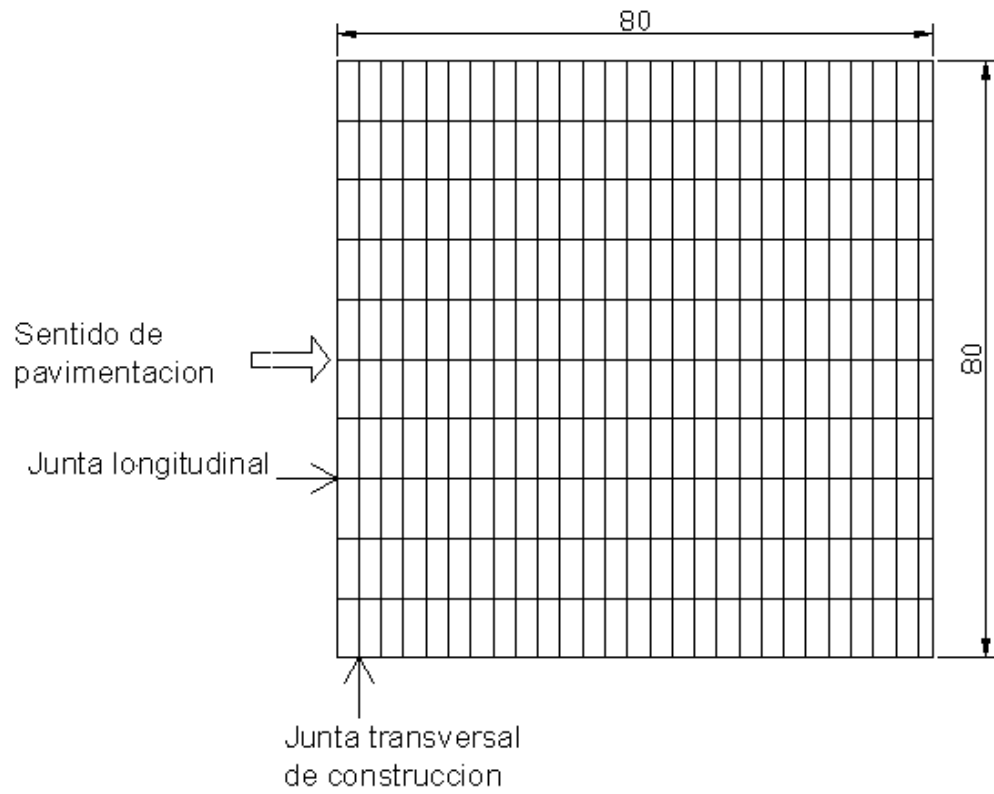


Figura 27. Junta transversal de construcción

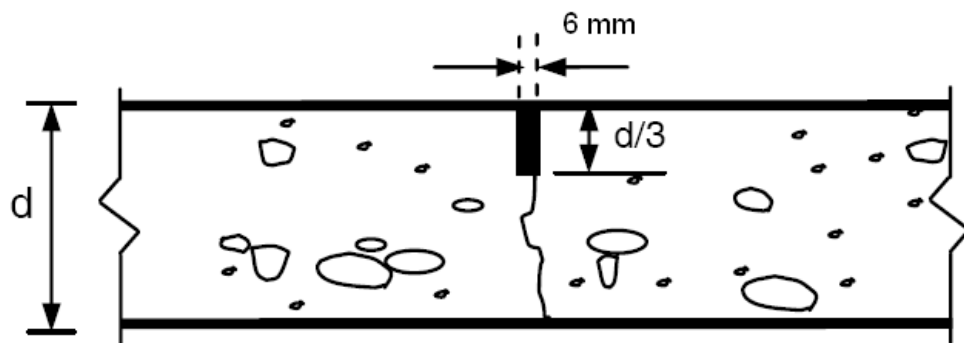
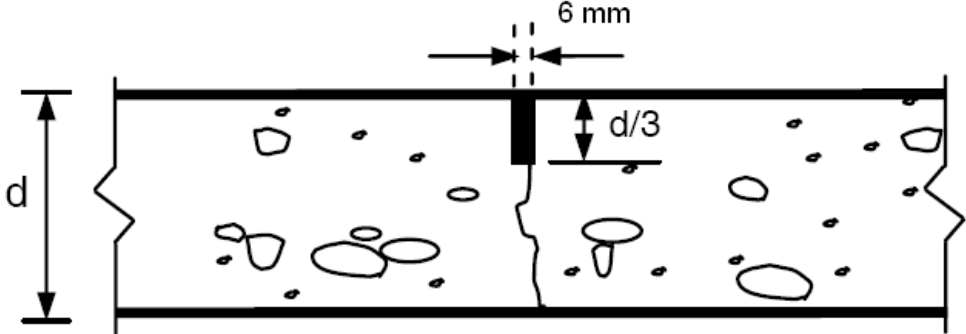


Figura 28. Junta longitudinal



## 6. ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS LOSA EN CCR

### ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

ACTIVIDAD ANALIZADA							
LOSA EN CCR							
UNIDAD	m2						
<b>I. EQUIPOS</b>							
	DESCRIPCION	UND	REND	VR. UNIT.	VALOR		
	FINISHER	HR	360,00	\$ 150.000,0	\$ 416,67		
	COMPACTADOR	HR	120,000	\$ 120.000,0	\$ 1.000,00		
	VOLQUETA	M2		\$ 27.000,0	\$ 27.000,00		
	CARROTANQUE	HR	240,00	\$ 100.000,0	\$ 416,67		
	<b>SUBTOTAL</b>				<b>\$ 28.833,33</b>		
<b>II. MATERIALES EN OBRA</b>							
	DESCRIPCION	UND	CANT	VR. UNIT.	VALOR		
	TRITURADO DE 3/4"	KG	324	\$ 33,00	\$ 10.706,85		
	ARENA	KG	397	\$ 32,00	\$ 12.689,60		
	CEMENTO GRIS	KG	160	\$ 440,00	\$ 70.532,00		
	<b>SUBTOTAL</b>				<b>\$ 93.928,45</b>		
	DESPERDICIO			5,00%	\$ 4.696,42		
	<b>SUBTOTAL</b>				<b>\$ 98.624,87</b>		
<b>III. MANO DE OBRA</b>							
	DESCRIPCION	CANT.	UND	REND	%. PREST.	VR UNIT	VALOR
	AYUDANTE	4,00	DIA	6,50	75%	\$ 25.000,00	\$ 26.923,08
	MAESTRO	1,00	DIA	6,50	75%	\$ 40.000,00	\$ 10.769,23
	<b>SUBTOTAL</b>						<b>\$ 37.692,31</b>
<b>TOTAL COSTO DIRECTO</b>							<b>\$ 165.151,00</b>
<b>IV. COSTOS INDIRECTOS</b>							
	DESCRIPCION	PORCENTAJE					VALOR
	A.I.U	48%					79.272,48
						<b>SUBTOTAL</b>	<b>79.272,48</b>
<b>PRECIO UNITARIO TOTAL</b>							<b>244.423,48</b>

## CONCLUSIONES

- Se propone construir un pavimento en CCR sin residuo minero, espesor de losa de 35 cm con resistencia a la compresión del concreto de 4500psi con un bajo contenido de cemento de 350 Kg/m<sup>3</sup>.
- El CCR se considera una alternativa de construcción para nuevos pavimentos, y la rehabilitación de los existentes.
- Los bajos contenidos de cemento en la mezcla de CCR proporcionan una disminución en el costo del pavimento.
- Se obtuvieron altas resistencias debido al bajo contenido de humedad.
- Dada la importancia creciente que presenta la reutilización total de los materiales excavados en las infraestructuras lineales para minimizar la afección ambiental, se presenta la técnica del CCR para el aprovechamiento de estos residuos mineros.

## BIBLIOGRAFIA

1. Juárez B. E.; Rico R. A. (1992). "Mecánica de Suelos". Tomo I. Fundamentos de la Mecánica de Suelos. Tercera edición. Editorial Limusa. México.
2. Juárez B. E.; Rico R. A. (1992). "Mecánica de Suelos". Tomo II. Teoría y Aplicaciones de la Mecánica de Suelos. Segunda edición. Editorial Limusa. México.
3. Lambe, T. W.; Whitman, R. V., (1995). "Mecánica de Suelos". Segunda edición. Editorial LIMUSA. México.
4. MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras. Reimpresión segunda edición. Universidad Católica de Colombia Ediciones y Publicaciones. Bogotá, Colombia, 2001.
5. ESPECIFICACIONES DE CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO. Londoño Naranjo, Cipriano Alberto. Instituto Colombiano de productores de Cemento.
6. Factibilidad técnica de la construcción de pavimentos de concreto compactado con rodillo en Colombia. universidad del norte, barranquilla. Ariza Lasprilla Rodrigo
7. Construcción de caminos de bajo volumen con concreto compactado con rodillo. Gómez Domínguez, Jorge. México octubre 1998.
8. Instituto de cemento portland Argentino. Aplicación vial del hormigón compactado con rodillo. Bonasea Alfredo José

## Anexo A. Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos



### UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS

FECHA

PROYECTO

Pavimentos en concreto compactado con rodillo

LOCALIZACIÓN

Mina carbon-cerrejon

#### Análisis Granulométrico

	Tamiz	Peso Retenido	% Retenido	% Retenido acumulado	% Que pasa
A. FINO	4	70	7	7	93
	8	55	5,5	12,5	87,5
	16	140	14	26,65	73,5
	30	390	39	4	34,5
	50	295	29,5	1	5
	100	40	4		1
	FONDO	10	1		0
	TOTAL	1000 g			

Modulo de Finura 3

A. GRUESO	1	0	0	0	100
	3/4	615	5,59	5,59	94,41
	1/2	7065	64,22	69,81	30,19
	3/8	2550	23,18	92,99	7,01
	4	770	7	99,99	0,01

TOTAL 11000 g

Tamaño maximo 3/4 "

## Anexo B. Ensayo de Compactación Proctor Modificado



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**  
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**  
**ENSAYO DE COMPACTACION INY-142**

**FECHA**

**PROYECTO**

PAVIMENTOS EN CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO

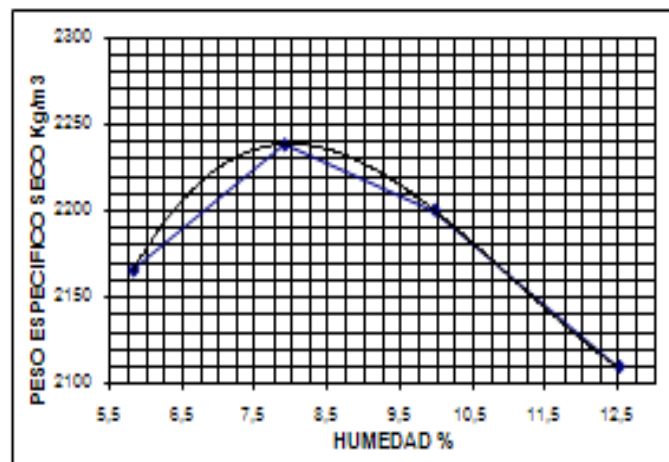
**LOCALIZACION**

MINA CARBON-CERREJON

TIPO DE ENSAYO	MODIFICADO
NUMERO DE CAPAS	5
# GOLPES POR CARA	55
MOLDE No	15
DIAMETRO MOLDE (m)	0,15
ALTURA MOLDE (m)	0,12
VOL. MOLDE (m <sup>3</sup> )	0,00208

PESO TARA (Kg)	8,8	10,6	8,2	7,5	7,4	9,3	8,5	7,6
W TARA + S.H (Kg)	40	43	40	40	40	50	40	40
W TARA + S.S (Kg)	38,3	41,2	37,5	37,8	36,9	46,5	36,5	36,4
PROM. HUMEDAD %	5,82		7,90		9,96		12,50	

PESO MOLDE (Kg)	6,525	6,525	6,525	6,525
W MOLDE + S.H (Kg)	11,285	11,540	11,550	11,455
W DEL S. H. (Kg)	4,760	5,015	5,025	4,930
DENSIDAD H. (Kg/m <sup>3</sup> )	2291	2414	2419	2373
DENSIDAD S. (Kg/m <sup>3</sup> )	2165	2237	2200	2110



**DEN. MAX. Kg/m<sup>3</sup>** 2237

**HUMEDAD OPTIMA** 7,90

## Anexo C. Ensayo de abrasión de agregados en la maquina de los Ángeles



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS**  
**ABRASION DE AGREGADOS EN LA MAQUINA DE LOS ANGELES**  
**INV E-218-219**

**FECHA**

**PROYECTO** PAVIMENTOS EN CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO

**LOCALIZACION** MINA DE CARBON-CERREJON

**DATOS SOBRE GRADACION , CARGA ABRASIVA Y REVOLUCIONES**

TAMAÑO		PESO Y GRADACION DE LA MUESTRA						
PESO	RETENIDO	A	B	C	D	E	F	G
3"	2 1/2"					2500		
2 1/2"	2"					2500		
2"	1 1/2"					5000	5000	
1 1/2"	1"	1250					5000	5000
1"	3/4"	1250						5000
3/4"	1/2"	1250	2500					
1/2"	3/8"	1250	2500					
3/8"	3"			2500				
3"	4"			2500				
4"	8"				5000			
No de esferas		12	11	8	6	12	12	12

PRUEBAS			1	2	
Gradación usada			B	B	
No de esferas			11	11	
No de revoluciones			500	500	
Pa = muestra seca antes del ensayo (kg)			5000	5000	
Pb = peso muestra seca despues del ensayo					
y despues de lavar sobre tamiz No 12 (Kg)			3660	3500	
Pa-----Pb - perdida			1340	1500	
% Desgaste = ( Pa -Pb) / Pa *100			27%	30%	

## Anexo D. Ensayo Equivalente de Arena



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
 LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS  
 EQUIVALENTE DE ARENA INV E- 133**

FECHA \_\_\_\_\_  
 PROYECTO CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO  
 LOCALIZACION MINA-CERREJON

MATERIAL PASA TAMIZ N°4	1	2	3	4
ALTURA DE LA ARCILLA H1(Plg)	3,4	3,6	3,7	3,3
ALTURA DE LA ARENA H2 (Plg)	3,0	3,3	3,3	2,8
EQUIVALENTE DE ARENA (H2/H1) %	<b>88</b>	<b>92</b>	<b>89</b>	<b>85</b>

**EQUIVALENTE DE ARENA 88,5 %**

## Anexo E. Ensayo Agregado Fino



### UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS AGREGADO FINO

**FECHA** \_\_\_\_\_  
**PROYECTO** PAVIMENTOS EN CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO  
**LOCALIZACION** MINA CARBON-CERREJON

GRAVEDADES ESPECIFICAS				
<b>Datos</b>				
<b>A=</b>	Peso del medidor + agua hasta la marca, en el aire	654,3		gramos
<b>B=</b>	Peso de la muestra en condicion s.s.s. en el aire	500		gramos
<b>C=</b>	Peso de la muestra, frasco y agua agregada, en el aire	961		gramos
<b>D=</b>	Peso de la muestra secada al horno, en el aire	490,5		gramos
<b>Calculos</b>				
Gravedad especifica real	=	$\frac{D}{A - C + D}$	=	2,66
Gravedad especifica aparente	=	$\frac{C}{A + B - C}$	=	2,54
Gravedad especifica aparente s.s.s.	=	$\frac{B}{A + B - C}$	=	2,58
PESO UNITARIO				
CALIBRACION DEL MEDIDOR:				
P1=	PESO DEL MEDIDOR+VIDRIO	3050		gramos
P2=	PESO DEL MEDIDOR+VIDRIO+AGUA	5880		gramos
V=	VOLUMEN DEL MEDIDOR	$\frac{P2 - P1}{1.000}$	2,83	dcm.3
<b>Datos</b>				
Pm=	Peso del medidor vacio	2550		gramos
Pc=	Peso del medidor+material s.s.s., compactado	7180		gramos
Ps=	Peso del medidor+material s.s.s., suelto	6150		gramos
	Peso unitario del agregado s.s.s., compactado=	$\frac{Pc - Pm}{V}$	1.636	kg/m3
	Peso unitario del agregado s.s.s., suelto=	$\frac{Ps - Pm}{V}$	1.272	kg/m3
ABSORCION EN %	=	$\frac{B - D}{D} * 100$	1,94	%
PORCENTAJE DE VACIOS=	$1 - \frac{\text{Peso unitario s.s.s., compactado}}{\text{Peso especifico}}$		36,7	%

## Anexo F. Ensayo Agregado Grueso



### UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS AGREGADO GRUESO

FECHA \_\_\_\_\_  
 PROYECTO Pavimentos en concreto compactado con rodillo  
 LOCALIZACION Mina carbon-cerrejon

GRAVEDADES ESPECIFICAS			
<b>Datos</b>			
A=	Peso del medidor en condiciones s.s.s., en el aire	5000	gramos
Pa=	Peso de la canasta sumergida en agua	1800	gramos
Pb=	Peso de la canasta+muestra s.s.s.sumergida en agua	4910	gramos
B=	Peso de la muestra en agua = Pb-Pa	3110	gramos
C=	Peso de la muestra secada en el horno	4905	gramos
<b>Calculos</b>			
Gravedad especifica real	=	$\frac{C}{C - B}$	= 2,73
Gravedad especifica aparente	=	$\frac{C}{A - B}$	= 2,60
Gravedad especifica aparente s.s.s.	=	$\frac{A}{A - B}$	= 2,65 <i>D</i>
PESO UNITARIO			
CALIBRACION DEL MEDIDOR:			
P1=	PESO DEL MEDIDOR+VIDRIO	3050	gramos
P2=	PESO DEL MEDIDOR+VIDRIO+AGUA	5880	gramos
V=	VOLUMEN DEL MEDIDOR	$\frac{P2 - P1}{1.000}$	2,83 dcm.3
<b>Datos</b>			
Pm=	Peso del medidor vacio	2550	gramos
Pc=	Peso del medidor+material s.s.s.,compactado	7103,3	gramos
Ps=	Peso del medidor+material s.s.s.,suelto	5690	gramos
	Peso unitario del agregado s.s.s., compactado=	$\frac{Pc - Pm}{V}$	1.609 kg/m3 <i>E</i>
	Peso unitario del agregado s.s.s., suelto=	$\frac{Ps - Pm}{V}$	1.110 kg/m3
ABSORCION EN %	=	$\frac{(A - C) * 100}{C}$	1,94 %
PORCENTAJE DE V ACIOS	=	$\frac{(D * 1000 - E)}{D * 10}$	39,2 %



## Anexo H. Tablas de Esfuerzos en el Modelamiento

```

***** POST1 NODAL STRESS LISTING *****
PowerGraphics Is Currently Enabled

LOAD STEP=      1  SUBSTEP=      1
TIME=      1.0000  LOAD CASE=    0
NODAL RESULTS ARE FOR MATERIAL    2
    
```

NODE	S1	S2	S3	SINT	SEQV
166	0.41278E+07	0.11979E+07	-0.42816E+06	0.45559E+07	0.39991E+07
167	0.41235E+07	0.26220E+07	-0.65306E+06	0.47766E+07	0.42306E+07
168	-0.31784E+06	-0.44240E+07	-0.49381E+07	0.46202E+07	0.43858E+07
171	0.17322E+06	-0.89823E+06	-0.41128E+07	0.42860E+07	0.38634E+07
172	0.42822E+06	-0.24283E+07	-0.41886E+07	0.46168E+07	0.40356E+07
177	0.20009E+06	-0.31651E+06	-0.40506E+07	0.42507E+07	0.40174E+07
178	0.17322E+06	-0.89823E+06	-0.41128E+07	0.42860E+07	0.38634E+07
179	0.42822E+06	-0.24283E+07	-0.41886E+07	0.46168E+07	0.40356E+07
180	0.33620E+07	30437.	-0.36226E+07	0.69846E+07	0.60510E+07
181	0.23740E+06	-0.49374E+06	-0.22545E+07	0.24919E+07	0.22186E+07
182	0.98310E+06	0.17840E+06	-0.26893E+07	0.36724E+07	0.33435E+07
183	0.41278E+07	0.11979E+07	-0.42816E+06	0.45559E+07	0.39991E+07
184	0.41235E+07	0.26220E+07	-0.65306E+06	0.47766E+07	0.42306E+07
189	0.39280E+06	-0.34566E+07	-0.30880E+08	0.31273E+08	0.26737E+08
190	0.33768E+07	0.16192E+07	-0.46159E+07	0.79926E+07	0.72749E+07
191	0.27666E+07	-80368.	-0.42920E+07	0.70586E+07	0.61509E+07
192	0.33768E+07	0.16192E+07	-0.46159E+07	0.79926E+07	0.72749E+07
193	0.27666E+07	-80368.	-0.42920E+07	0.70586E+07	0.61509E+07
194	0.19460E+07	0.62070E+06	0.45053E+06	0.14955E+07	0.14181E+07
195	0.29797E+07	0.10864E+07	-0.53484E+06	0.35145E+07	0.30467E+07
196	0.29797E+07	0.10864E+07	-0.53484E+06	0.35145E+07	0.30467E+07
197	0.28025E+07	0.25035E+07	-0.65121E+06	0.34537E+07	0.33144E+07
198	-69208.	-0.27186E+06	-0.87027E+06	0.80107E+06	0.72141E+06
199	-0.10304E+06	-0.42101E+06	-0.13983E+07	0.12952E+07	0.11691E+07
200	0.12180E+06	-0.36732E+06	-0.25565E+07	0.26783E+07	0.24704E+07
201	-41071.	-0.44943E+06	-0.28589E+07	0.28178E+07	0.26374E+07
202	-0.66810E+06	-0.10869E+07	-0.15749E+08	0.15081E+08	0.14876E+08
203	0.67681E+06	-92708.	-0.41157E+07	0.47925E+07	0.44579E+07
204	0.16814E+06	-0.47132E+06	-0.27269E+07	0.28951E+07	0.26342E+07
205	0.21299E+06	-0.10646E+06	-0.31894E+07	0.34023E+07	0.32544E+07
206	0.49428E+06	-0.30811E+06	-0.21900E+07	0.26843E+07	0.23865E+07
207	-0.10304E+06	-0.42101E+06	-0.13983E+07	0.12952E+07	0.11691E+07
208	0.12180E+06	-0.36732E+06	-0.25565E+07	0.26783E+07	0.24704E+07
209	0.67681E+06	-92708.	-0.41157E+07	0.47925E+07	0.44579E+07
210	0.21299E+06	-0.10646E+06	-0.31894E+07	0.34023E+07	0.32544E+07
211	0.16814E+06	-0.47132E+06	-0.27269E+07	0.28951E+07	0.26342E+07
212	0.49428E+06	-0.30811E+06	-0.21900E+07	0.26843E+07	0.23865E+07

```

MAXIMUM VALUES
NODE      21601      21601      194      189      189
VALUE    0.89786E+07  0.79516E+07  0.45053E+06  0.31273E+08  0.26737E+08
    
```

## Anexo I. Comando de Modelamiento

```

/PREP7
*SET,a,30
*SET,b,3
*SET,c,30
    
```

```

*SET,d,8
*SET,e,0.35
*SET,f,8
BLOCK,-a/2,a/2,-b/2,b/2,-c/2,c/2,
BLOCK,-d/2,d/2,b/2,b/2+e,-f/2,f/2,
wpoff,0,0,d/2
VSBW,all
*do,i,1,25
wpoff,0,0,-d/25
VSBW,all
*enddo
wpoff,f/2
wpro,,90.000000
VSBW,all
*do,i,1,25
wpoff,0,0,-d/25
VSBW,all
*enddo
et,1,45
!Tierra
MP,EX,1,160E6
MP,PRXY,1,0.25
MP,EX,2,26765E6
MP,PRXY,2,0.15
!Establecer los tamaños de los elementos
LSEL,S,LENGTH,,d/100
LESIZE,all,,1,,,,1
LSEL,S,LENGTH,,e
LESIZE,all,,3,,,,1
!Enmallar Concreto
VSEL,S,LOC,Y,(b/2),(b/2)+e
TYPE,1
MAT,2
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
vmesh,all
!Enmallar Tierra
allsel,all
VSEL,S,LOC,Y,-(b/2),(b/2)
TYPE,1
MAT,1
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
vmesh,all
!Acoplar los nodos del concreto con los de la tierra
nummrg,all
!Aplicar condiciones de frontera
NSEL,S,LOC,X,c/2
NSEL,a,LOC,X,-c/2
NSEL,a,LOC,z,a/2
NSEL,a,LOC,z,-a/2
NSEL,a,LOC,y,-b/2
D,all,,,,,ALL,,,,,
allsel,all

```

```
vplot
!Aplicar presión
asel,s,,5431
asel, a,,5437
asel,a,,5227
asel,a,,5221
SFA,all,1,PRES,3820000
allsel,all
finish
/Solu
solve
FINISH
/POST1
ESEL,S,MAT,,2
/DSCALE,1,1.0
PLESOL, S,EQV, 0,1.0
```