

# Bases estabilizadas (para pavimentos) utilizando tecnología del Concreto Compactado con Rodillo



Juan Carlos Benavides Brenes

Junio 2005

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

# Abstract

Our goal is to verify the possibility of using ballasts in the mixtures for construction of roller compacted concrete (RCC), with the purpose of reducing costs and obtaining a rigid pavement structure, more economical than a flexible pavement structure, but equivalent for the same imposed loads.

For the development of the investigation, three aggregates have been chosen, in function of their low cost and of their geographic location. The aggregates are ballasts from the regions of Guacalillo and Cerro Minas, and river bed material from the region of Guápiles; anticipating these points as strategic for the extraction of raw material, during the execution of possible projects.

All three mixtures, used for making RCC more than satisfy the minimum resistance expectancies, which are necessary design parameters of a flexible pavement structure. The mixture with the best mechanical response was that which was built with material from the region Guápiles, which much more than surpasses the minimum design constraints for resistance, followed by the mixtures made with ballasts from the regions of Guacalillo and Cerro Minas.

Having the mechanical characteristics of our RCC mixtures, we proceeded to design the rigid pavement structures (for each mixture), then each mixture is budgeted and the costs are compared with that of a flexible pavement structure. The results obtained show that rigid structures of RCC made with ballasts are more economical than flexible pavement structures, the mixture that uses river bed material is also of the same cost. Nevertheless, this last mixture can be improved by lowering its cement content to reduce its cost, because its resistance surpasses by far the expected.

# Resumen

La siguiente investigación, pretende comprobar la posibilidad de utilizar lastres en la confección de mezclas de concreto compactado con rodillo, con el fin de reducir sus costos y con estas mezclas obtener una estructura de pavimento rígido, más económica que una estructura de pavimento flexible, equivalente para las mismas cargas impuestas.

Para el desarrollo de la investigación se han elegido tres agregados en función de su bajo costo y de su ubicación geográfica, los cuales son lastres de Guacalillo y Cerro Minas y material de río de la zona de Guápiles, previendo estos puntos como ubicaciones estratégicas para la obtención de materia prima durante la ejecución de posibles proyectos.

Las tres mezclas resultantes de CCR superan las expectativas mínimas de resistencia, necesarias para los parámetros de diseño de la estructura de pavimento flexible. La mezcla con mejor respuesta mecánica es la confeccionada con material de Guápiles (la cual supera por mucho la resistencia mínima de diseño) seguida de las mezclas hechas con lastres Guacalillo y Cerro Minas.

Teniendo las características mecánicas de las mezclas de CCR, se procede a diseñar las estructuras de pavimento rígido (para cada mezcla) y luego se presupuesta cada una y se compara contra el costo de una estructura de pavimento flexible. Los resultados obtenidos, demuestran que las estructuras rígidas cuyo CCR utiliza lastres son más económicas que las estructuras de pavimento flexible, y la mezcla que utiliza material de río es del mismo costo. Sin embargo esta última mezcla se puede mejorar (disminuyendo su contenido de cemento) para reducir su costo ya que su resistencia supera por mucho la esperada.

**Keywords:**

Ballasts, roller compacted concrete (RCC), rigid pavements, flexible pavements.

**Palabras Clave:**

Lastres, concreto compactado con rodillo (CCR), pavimentos rígidos, pavimentos flexibles.

# Contenido

PREFACIO .....	1
RESUMEN EJECUTIVO .....	2
INTRODUCCIÓN.....	4
METODOLOGÍA.....	5
RESULTADOS .....	10
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	25
CONCLUSIONES.....	29
APÉNDICES.....	30
ANEXOS.....	31
REFERENCIAS .....	32

# Prefacio

El concreto compactado con rodillo (CCR), es un tipo de concreto que se ha utilizado por muchos años en la construcción de represas, patios de maniobra, caminos rurales de alto tránsito explotaciones, madereras en Canadá, etc. En un principio su colocación se realizaba con un tractor de orugas o motoniveladora y la densificación con compactadora de rodillo, de ahí que se le diera el nombre de concreto compactado con rodillo.

En los últimos 15 años, la tecnología de colocación ha evolucionado con el uso de pavimentadoras especializadas, ampliando el uso del concreto CCR a calles urbanas, caminos y carreteras, con acabados superficiales de mejor calidad en cuanto a la planicidad, rugosidad y acabado.

Básicamente se trata de un concreto con una relación Agua/Cemento muy baja (concreto convencional  $a/c=0.5$ , CCR  $a/c=0.33$  a  $0.4$ ) por lo que la consistencia del material es muy seca y las resistencias muy altas.

Cabe mencionar que el CCR esta debidamente especificado en el Capitulo 503 del CR 2002

El objetivo de esta investigación es determinar el comportamiento del concreto compactado con rodillo, con la utilización de lastres, sin que se maneje como superficie de ruedo. Es preciso aclarar en este punto que la presente investigación no tiene el objetivo de definir ni investigar sobre la capa que soportará el desgaste (superficie de ruedo) en las estructuras resultantes de pavimento rígido.

Al desarrollar este trabajo, pretende determinar el comportamiento del concreto compactado con rodillo, utilizando lastres, sin que se utilice como superficie de rodamiento. Además obtener un producto sustituto para las capas convencionales de las estructuras de pavimento (base y subbase), que sea de alta calidad y que se adapte a los requerimientos de las especificaciones técnicas

presentes en las normas locales e internacionales.

Analizar los costos de las estructuras de pavimentos equivalentes tanto para soluciones flexibles como rígidas.

Agradezco a todas aquellas personas que hicieron posible la realización de este proyecto, aportando cada quien lo que estaba a su alcance.

En primera instancia, y muy en especial a mi profesor guía: Ing. Alvaro Aguilar Dondi, a los laboratoristas: William Montero, Manfred Ramirez y a los ingenieros: Minor Murillo, Luis Carlos Meseguer y Jorge Milanés.

Dedico este trabajo a quienes me han apoyado siempre durante mi carrera mis padres Ligia y Gerardo, mi hermana Cindy y a Karla.

# Resumen ejecutivo

Con la presente investigación se pretende brindar una pequeña herramienta para todo aquel estudiante de la Escuela de Ingeniería en Construcción interesado en el diseño de estructuras de pavimento, tanto flexibles como rígidas, aunado al análisis y comparación de costos y funcionalidad, entre ellas, para emitir un criterio fundamentado, sobre cuál de ambas opciones es la más conveniente.

El objetivo de la investigación gira en torno a dos puntos principales, en los cuales, se pretende determinar la posibilidad de utilizar lastres en la confección de mezclas de concreto CCR y lograr obtener una estructura de pavimento rígido compuesta de base granular y base estabilizada CCR que sea equivalente en cuanto a la capacidad de soporte a una estructura de pavimento flexible compuesta de base y subbase y capa asfáltica.

Para el desarrollo del proyecto se contó con el laboratorio de materiales de la empresa Holcim, CETEC (Centro de Tecnología del Concreto), lugar en el cual fueron llevadas a cabo todas las pruebas necesarias para la realización del mismo.

Los materiales y herramientas utilizados en el laboratorio son los de uso común y se encuentran especificados en las normas ASTM que se usan en las respectivas pruebas. Sin embargo, en este apartado, cabe destacar la utilización del martillo vibratorio como herramienta sustituta del proctor estándar en la determinación de la humedad óptima y la respectiva densidad máxima.



Figura 1. Fotografía martillo vibratorio, utilizado para la determinación de la densidad máxima y la humedad óptima.

Las materias primas utilizadas para la confección de las mezclas de CCR de este estudio son las siguientes:

**Cemento:** El cemento más apropiado para su uso en la construcción de carreteras con CCR, es aquel que posea un bajo calor de hidratación, poca retracción y elevadas resistencias a largo plazo que puedan contrarrestar el fenómeno de fatiga.

En este caso se emplea cemento Portland tipo I MP – Modificado con Puzolanas, denominado Ecolcem fabricado en la planta HOLCIM en Agua Caliente de Cartago (antes Industria Nacional del Cemento S.A. - INCSA),

**Los agregados** elegidos para probar las mezclas de CCR, fueron tres, y su elección se basó en los bajos costos que tienen con lo cual se pretende también, reducir costos en las mezclas de concreto y en las ubicaciones de sus fuentes de obtención, las cuales se consideran estratégicas para el acarreo en posibles proyectos carreteros.

En primera instancia se tiene una gravilla, obtenida en el Río Sucio de Guápiles, es un material que posee excelentes propiedades mecánicas, originado por lavas, se clasifica como GP, gravilla mal graduada según el sistema SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos). Por esta razón se tuvo que combinar con arena procedente del mismo sitio, para la

confección del concreto. Debe destacarse que el estudio (caracterización de la arena) no es parte del estudio que el presente trabajo realiza.

El segundo material estudiado es un lastre, obtenido en el Tajo El Guacalillo, ubicado en San Rafael de Alajuela, es un material con menores capacidades mecánicas, en comparación con el anterior, se clasifica como SC, arenas arcillosas con presencia de gravas.

Finalmente el tercer agregado elegido para el estudio fue el obtenido en el tajo Cerro Minas, ubicado en Santa Ana, formado por lavas, se clasifica también como SC, y es el que da menores resultados mecánicos de los tres (sin embargo son satisfactorios a la luz de los objetivos propuestos).

El proyecto se ha dividido en varias etapas según la metodología y el cronograma planteados, las cuales se explican en el apartado de metodología, sin embargo es este punto es importante profundizar en el desarrollo de las etapas de laboratorio: **Primera etapa** de laboratorio: en la cual se han hecho las pruebas necesarias conforme a las normas ASTM para obtener las características físicas y granulometrías de los agregados con el objetivo de poder clasificarlos, y para llevar acabo los diseños de mezclas de concreto.

Seguido se tiene la **Segunda etapa** de laboratorio en la cual basado en un diseño teórico de mezcla para el CCR (dado por el Ing. Jorge Milanes de Holcim), se mantiene constante la cantidad de agregados y de cemento y varía sólo la cantidad de agua (humedad) en la mezcla y según los procedimientos para las pruebas del Proctor Estándar y la del Martillo Vibratorio, descritas en las normas D 698 y C 1435 respectivamente, se obtuvo la humedad optima de la mezcla con su respectiva densidad de compactación máxima.

En una **Tercera etapa** de laboratorio, con el diseño teórico y la humedad optima obtenida en la etapa anterior, se elaboraran probetas para la falla en compresión, tensión y flexión, y se procede a fallarlas, a edades de 1,3,7,14,28 días para determinar el alcance de resistencia respecto al paso del tiempo y el máximo de resistencia alcanzada.

**Cuarta etapa:** colocación In Situ de Base de CCR, se hizo una prueba a escala natural

para corroborar que los datos obtenidos en laboratorio se cumplieran en la realidad.



Figura 2: Etapa 4, prueba escala natural, colocación en situ de las mezclas probadas en el laboratorio.

Los resultados obtenidos al final de la investigación, verifican el objetivo inicial, de obtener una estructura de pavimento rígido equivalente en funcionalidad y más económico que su equivalente de estructura flexible.

Cuadro1. Comparación de costos	
Pavimento	Costo Total (\$/m <sup>2</sup> )
Flexible	12,93
Rígido, Guápiles	12,97
Rígido, Guacalillo	12,57
Rígido, Cerro Minas	12,7

# Introducción

El presente trabajo ha tratado de dar una nueva visión respecto a la construcción de carreteras, ya que en nuestro país, por años se ha acostumbrado a utilizar pavimentos flexibles y se han dejado de lado opciones y ventajas que brindan los pavimentos rígidos. Este tipo de pavimentos no se emplean debido a: falta de conocimiento, cultura y costumbre, fobia o simplemente negligencia por parte de algunas autoridades e ingenieros encargados de la construcción de carreteras en Costa Rica.

Por eso se ha propuesto en esta investigación, obtener una estructura de pavimento rígido que sea igual o superior en cuanto a la funcionalidad y capacidad de soporte de una estructura flexible, y que a un mismo tiempo sea menos costoso que este. Para lo cual se ha querido crear una base estabilizada (utilizando tecnología de aplicación como la empleada en la fabricación de CCR) que sea intermedia en resistencia (y a su vez en costo) a lo que actualmente se construye, es decir que sea superior en resistencia a las bases tradicionales, y que a la vez sea menos resistente (esto sin dejar de ser capaz de soportar las cargas impuestas) que las estructuras de pavimento CCR.

Para cumplir con este objetivo de reducción de costos, se ha sugerido la utilización de lastres en la confección de mezclas de Base CCR, lo cual debe ser probado y demostrado.

Para lograr este objetivo se ha formulado el siguiente plan de trabajo:

- Caracterizar las materias primas que se emplearán.
- Determinar propiedades físicas y mecánicas de los agregados propuestos.
- Determinar las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla de concreto obtenida, con la utilización de dichos agregados.
- Diseñar las mezclas de CCR (base) de acuerdo a las condiciones óptimas de

- humedad y cantidad de cemento y las resistencias definidas.

Determinar la capacidad de soporte integral del pavimento que se obtendría.

Hacer pruebas en escala natural.

Documentar, los resultados obtenidos en cuanto a:

Proceso constructivo,

Acabados

Tipos de cura

Propiedades de materias primas y mezcla, y control de calidad.

Analizar y comparar costos de producción y colocación, de las estructuras de pavimento que se utilizan en la actualidad versus la estructura que se obtendrá.

# Metodología

Se utilizó la investigación bibliográfica como medio para obtener la información requerida en la elaboración del marco teórico. Sin embargo las pruebas de laboratorio se convirtieron en la principal herramienta. Con el único propósito de corroborar y alcanzar los objetivos propuestos. Como elemento complementario, se hicieron entrevistas a ingenieros de experiencia en el tema, que permitieron establecer guías en donde se pueda obtener información adicional al respecto.

El trabajo según el cronograma establecido, se desarrolló con la siguiente secuencia de actividades.

**Investigación bibliográfica:** Se procedió a recolectar toda la información necesaria para desarrollar la investigación del proyecto y para la realización del marco teórico del presente informe.

**Planteamiento de metodología a todos los involucrados:** Se dio al inicio del trabajo, y se pretende informar a todos los involucrados en el proyecto (ingenieros de Holcim, laboratoristas, y demás), los pasos a seguir y las tareas y responsabilidades que tengan asignadas

**Abastecimiento de materiales:** Selección y abastecimiento de materiales, agregados y cemento, que serán objeto de estudio, a la planta de Holcim, en Belén.

**Definición y ejecución de pruebas de laboratorio:** Primer acercamiento a la realidad, en el cual se pretendió palpar con resultados de laboratorio lo investigado en la literatura y demostrar incipientemente los objetivos planteados.

**Pruebas de campo:** Comprobación real de la investigación. Con la conclusión de esta etapa se procedió con el recuento y análisis de los resultados obtenidos.

**Análisis de resultados:** Evaluación y comparación de los resultados obtenidos en el

laboratorio con los las pruebas de campo y de estos con base en los objetivos del proyecto.

**Establecimiento de conclusiones:** Inferencias sobre los resultados alcanzados.

# Marco teórico

## Caracterización de agregados

En la primera etapa de investigación se desarrolló el trabajo de laboratorio para la caracterización de los tres agregados elegidos para el proyecto. Con el fin de obtener sus respectivas granulometrías y características físicas de los materiales, que permitieran luego desarrollar los diseños de mezclas de concreto.

Para lo cual se procedió conforme a lo establecido en las normas de la American Society for Testing Materials (ASTM).

Específicamente las normas: D 75, C 136, C 117, C 29, C 127 y C 128.

En las cuales se establecen los procedimientos necesarios para la concreción de la primera etapa de laboratorio. Como lo es: la reducción y la obtención de muestras de laboratorio, mediante el método del cuarteo con la utilización de separadores (splitters).

Obtención de la humedad de la muestra de agregado, lo cual consiste en tomar una pequeña cantidad de agregado en pesarlo, luego se coloca en un horno (a temperatura y tiempo definidos por la norma) para secarla, luego de esto se vuelve a pesar la muestra, y el contenido de humedad en términos porcentuales de la siguiente forma:

$$w\% = \frac{P_h - P_s}{P_s} * 100$$

Donde:

$p_h$ : Peso húmedo de la muestra

$p_s$ : Peso seco de la muestra

$w\%$ : Contenido de humedad en la muestra

Determinación de características físicas de los agregados, (cuyos procedimientos se encuentran definidos en las normas C 127 y C 128 según sea el caso) como lo son: la absorción, gravedad específica, gravedad específica saturada superficie seca. De la siguiente manera:

Caso para agregados finos: Se procede según la norma a pesar una muestra de arena que esté en condiciones de saturada superficie seca, mediante el procedimiento de saturado secado y probado en el cono, y luego se introduce un picnómetro, al cual se le debe extraer el aire que contenga con una bomba de vacíos, luego se pone a secar la muestra en el horno y se vuelve a secar para ser pesada y continuar con las siguientes fórmulas:

$$A\% = \frac{D - A}{A} * 100$$

$$GBS = \frac{A}{B + D - C}$$

$$GSSS = \frac{D}{B + D - C}$$

Donde:

A: Masa de la muestra seca al horno

B: Masa del picnómetro lleno de agua

C: Masa del picnómetro más agua y agregado

A%: Porcentaje de absorción

GBS: Gravedad específica

GBSSS: Gravedad específica saturada superficie seca.

Caso para agregados gruesos: Se debe poner a saturar la muestra durante un día, y luego se debe secar la superficie, para pesar la muestra en una balanza y pesarla en condición sumergida, seguido a esto con las mediciones hechas se procede a realizar los cálculos con las siguientes fórmulas:

$$A\% = \frac{B - A}{A} * 100$$

$$GBS = \frac{A}{B - C}$$

$$GBSSS = \frac{B}{B - C}$$

Donde:

A: Masa muestra seca al horno

B: Peso de la muestra saturada superficie seca

C: Peso muestra saturada sumergida

A%: Porcentaje de absorción

GBS: Gravedad específica

GBSSS: Gravedad específica saturada superficie seca.

Determinación de peso unitario, según el procedimiento de envarillado descrito en la norma ASTM, en el cual se debe rellenar un recipiente debidamente calibrado (en peso y volumen) en tres capas y compactarlo, hasta dejarlo lleno y raso, para luego obtener el peso unitario de la siguiente manera:

$$\gamma = \frac{P}{V}$$

Donde:

P: Peso del agregado en el recipiente lleno compactado y raso

V: Volumen del recipiente

$\gamma$ : Peso unitario del agregado

P: Peso del agregado en el recipiente lleno compactado y raso

V: Volumen del recipiente

$\gamma$ : Peso unitario del agregado

Finalmente para concluir con la primera etapa de laboratorio se debe obtener la granulometría de los agregados con el procedimiento de tamizado descrito en la norma.

Todas las mediciones obtenidas en el laboratorio y los cálculos que de ellas se desprenden muestran en la sección de **Resultados** con sus respectivas tablas y gráficos.

# Diseño de mezcla de CCR

## Determinación de la humedad óptima

La teoría del diseño de mezclas para los concretos convencionales, tiene validez para las mezclas de CCR. Sin embargo, éste posee dos características que hacen que el diseño de la mezcla sea recurrente. La compactación y la baja relación agua/cemento. Es necesario dibujar las respectivas curvas de Próctor para los diferentes diseños.

Como una primera aproximación al diseño final, se parte de una mezcla que obedece al diseño teórico el cual será alterado gradualmente, es decir, se procede a mantener constante la cantidad de agregados y la cantidad de cemento en las mezclas e ir variando la cantidad de agua de dosificación.

Para el trazado de las curvas de densidad en función de la humedad de las mezclas, se ha utilizado el procedimiento de martillo vibratorio descrito en la norma C 1435, la cual consiste en moldear pastillas de CCR e ir variando los contenidos de agua en las mezclas, para obtener sus respectivas humedades. Cada pastilla después de moldeada debe ser pesada y su densidad es obtenida con este peso y el volumen es conocido (dado por la norma).

Se procede entonces a realizar por lo menos cinco mezclas a distintas humedades y tabular los resultados obtenidos de densidad versus humedad y estas tablas se representan gráficamente, para así obtener, por método gráfico, la humedad óptima de compactación y la densidad máxima alcanzada.

A continuación se muestra un ejemplo de la determinación de la humedad óptima y la máxima densidad, por medio de la utilización del método gráfico

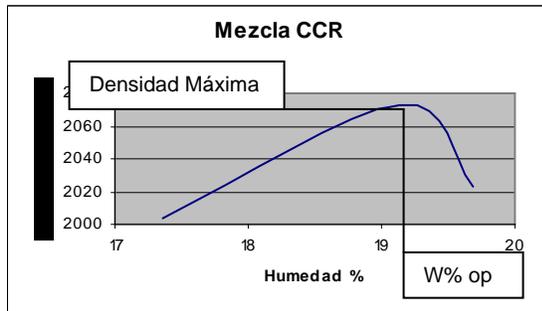


Figura 3. Ejemplo del método gráfico para la determinación de la humedad óptima y la densidad máxima de compactación

## Determinación de resistencias

Una vez obtenidos los diseños definitivos de mezclas de CCR (por humedad óptima), se procede a probarlos y obtener sus resistencias, por medio de probetas de falla (cilindros y vigas).

Se elaboran cilindros para medir los parámetros de compresión (ASTM C 109) y tracción indirecta (ASTM C 496), y vigas (ASTM C 78) para medir la resistencia en flexión.

Se fabrica un número de tres especímenes por cada parámetro de medición. La determinación de esta cantidad de probetas, obedece a un análisis estadístico, en el cual se pretende obtener una probabilidad de acierto de un 80%, con un error de 20%.

De esta manera se obtienen datos del avance de la resistencia ganada conforme transcurre la edad de las probetas, los cuales son tabulados y graficados de manera que se tengan parámetros de: compresión versus edad, tracción versus edad, flexión versus edad, además de relacionar datos de flexión contra compresión, tracción contra compresión y flexión versus tracción.

# Diseño estructuras de pavimento

## Pavimento flexible

Para iniciar con el diseño de una estructura de pavimento flexible según el método AASHTO, se debe obtener la carga en ejes equivalentes de 18 Kips calculada con forme al tránsito vehicular.

Además se deben tener en cuenta variables como:

**Periodo de diseño:** Tiempo total para el que se diseña el pavimento en función de la proyección y el tiempo que se considere apropiado para que las condiciones del entorno se comiencen a alterar desproporcionadamente.

**Vida útil:** tiempo que transcurre entre la construcción del pavimento y el momento en que se alcanza el mínimo de serviciabilidad.

**Confiability:** grado de seguridad o veracidad en el diseño de la estructura de un pavimento, hasta llegar al fin de su periodo de diseño en buenas condiciones.

La obtención del número estructural del pavimento se hace con las variables antes descritas y con la figura 7-1 del manual de la SIECA (Secretaría de Integración Económica Centroamericana), el cual hace uso del método AASHTO (American Associations of State Highway and Transportation Officials).

Una vez obtenido el número estructural de todo el pavimento, se debe fraccionar en las diferentes capas: subbase, base, carpeta. De igual manera, para esto, se debe hacer uso de la figura 7-1 para cada capa.

Luego con las figuras 7-3, 7-4 y 7-5 se obtienen los coeficientes estructurales de las distintas capas, además se deben conseguir los coeficientes de drenaje para las capas de base y subbase, esto con la tabla 7-3.

Una vez obtenidos todos los resultados anteriores se deben calcular las dimensiones de los espesores de las capas de la estructura:

Capa asfáltica:

$$D_1 = \frac{SN_1}{a_1}$$

$$SN_1^* = a_1 D_1$$

Base:

$$D_2 = SN_2 - \frac{SN_1^*}{a_2 m_2}$$

$$SN_2^* = a_2 m_2 D_2$$

Subbase:

$$D_3 = SN_3 - \frac{SN_1^* + SN_2^*}{a_3 m_3}$$

$$SN_3^* = a_3 m_3 D_3$$

Donde:

D<sub>1</sub>: espesor de capa asfáltica

D<sub>2</sub>: espesor de base

D<sub>3</sub>: espesor de subbase

SN<sub>1</sub>: número estructural en la capa asfáltica

SN<sub>2</sub>: número estructural en la base

SN<sub>3</sub>: número estructural en la subbase

a<sub>1</sub>: coeficiente estructural de la capa asfáltica

a<sub>2</sub>: coeficiente estructural de la base

a<sub>3</sub>: coeficiente estructural de la subbase

m<sub>1</sub>: coeficiente de drenaje en la capa asfáltica

m<sub>2</sub>: coeficiente de drenaje en la base

m<sub>3</sub>: coeficiente de drenaje en la subbase

SN<sub>1</sub>: número estructural realmente absorbido por la dimensión de la capa de asfalto

SN<sub>2</sub>: número estructural realmente absorbido por la dimensión de la base

SN<sub>3</sub>: número estructural realmente absorbido por la dimensión de la subbase

del concreto, valor de la pérdida de soporte, módulo de reacción de la superficie en la que se apoya la losa de concreto, resistencia a la flexotracción del concreto.

Para el diseño de pavimento rígido se obtiene el módulo de reacción compuesto de la subrasante, con el uso de la figura 7-29.

Luego con la figura 7-31 se obtiene el valor relativo de deterioro en cada mes del año. Se suman todos los valores de deterioro y se divide el total en el número de meses incluidos y con ese valor se utiliza la figura 7-28. Se consigue así el valor promedio para el espesor asumido, finalmente se debe corregir el valor promedio del módulo de reacción efectiva de la subrasante en función de la pérdida de soporte por medio de la figura 7-32.

## Pavimento rígido

Al igual que para la estructura de pavimento flexible, para el diseño de pavimento rígido, se usará el manual de la SIECA donde se utiliza el método de la AASHTO.

Así como en un pavimento flexible, para el diseño de un pavimento rígido se parte de la carga en ejes equivalentes.

Luego se deben definir y obtener variables como: variación en el índice de serviciabilidad, coeficiente de drenaje, coeficiente de transmisión de carga, modulo de elasticidad

# Resultados

## Caracterización de agregados

### Gravilla Guápiles

Cuadro 2. Determinación de Humedad			
		Pesos Iniciales	
Bandeja	Peso Bandeja (gr)	Bandeja + Agregado (gr)	Agregado (gr)
1	554,36	5463,51	4909,15
2	554,19	4730,35	4176,16
3	550,41	5835,26	5284,85
4	544,68	3599,17	3054,49
<b>TOTAL</b>			<b>14370,16</b>

Cuadro 3. Determinación de Humedad			
		Pesos Iniciales	
Bandeja	Peso Bandeja (gr)	Bandeja + Agregado (gr)	Agregado (gr)
1	554,36	5401,43	4847,07
2	554,19	4650,67	4096,48
3	550,41	5738,17	5187,76
4	544,68	3544,99	3000,31
<b>TOTAL</b>			<b>14131,31</b>

Después de realizar las mediciones anotadas en las tablas anteriores, se obtiene la humedad de la siguiente manera:

$$w\% = \frac{P_h - P_s}{P_s} * 100$$

$$w\% = \frac{14370.16 - 14131.31}{14131.31} * 100$$

$$w\% = 1.66\%$$

Determinación de la densidad por el método de envarillado:

Cuadro 4. Peso Volumétrico	
Peso Recipiente (kg)	2,68
Volumen Recipiente (m3)	0,0092
Peso Recipiente + Agregado (kg)	19,44
Peso Muestra	16,76

$$\gamma = \frac{P}{V}$$

$$\gamma = \frac{16.76}{0.0092}$$

$$\gamma = 1821.74 \text{ kg} / \text{m}^3$$

<b>Cuadro 5. Gravedad Especifica, Gravedad Especifica saturada superficie seca, Absorción</b>	
Peso Bandeja (gr)	558,58
Peso Recipiente sumergido (gr)	798
Peso Bandeja+Muestra saturada su seca+Recipiente Sumergido (gr)	6451
Peso Muestra saturada superficie seca (gr) <b>B</b>	<b>5094,42</b>
Peso Muestra saturada sumergida en agua+Recipiente Sumergido (gr)	3945
Peso Muestra saturada sumergida (gr) <b>C</b>	<b>3147</b>
Peso Muestra Seca al horno + Bandeja (gr)	5540,4
Peso Muestra Seca al horno (gr) <b>A</b>	<b>4981,82</b>

Cálculo de absorción, gravedad específica y gravedad específica saturada superficie seca:

$$A\% = \frac{B - A}{A} * 100$$

$$A\% = \frac{5094.42 - 4981.82}{4981.82} * 100$$

$$A\% = 2.26\%$$

$$GBS = \frac{A}{B - C}$$

$$GBS = \frac{4981.82}{5094.42 - 3147}$$

$$GBS = 2.56$$

$$GBSSS = \frac{5094.42}{5094.42 - 3147}$$

$$GBSSS = 2.62$$

<b>Cuadro 6. Granulometría</b>			
Malla #	Tamaño (mm)	Peso Retenido (gr)	% Pasando
1	25,4	0	100,00%
3/4	19,05	183,31	98,70%
1/2	12,7	3751,24	72,16%
3/8	9,525	4542,35	40,01%
4	4,75	3511,33	15,17%
8	2,36	1033,32	7,85%
Charola	0	1109,76	0,00%
<b>TOTAL</b>		<b>14131,31</b>	

Los datos de esta tabla se encuentran representados en la figura 4.

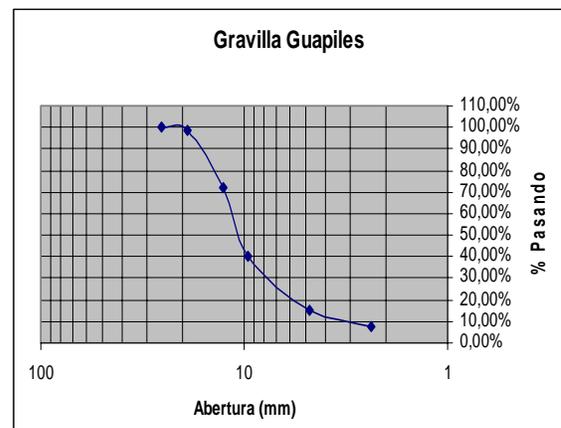


Figura 4. Granulometría Gravel Guápiles.

## Lastre Guacalillo

<b>Cuadro 7. Determinación de Humedad</b>			
		Pesos Iniciales	
Bandeja	Peso Bandeja (gr)	Bandeja + Agregado (gr)	Agregado (gr)
1	545,70	4741,68	4195,98
2	545,10	4281,63	3736,53
3	546,85	5583,31	5036,46
<b>TOTAL</b>		<b>12968,97</b>	

<b>Cuadro 8. Determinación de Humedad</b>			
		Pesos Iniciales	
Bandeja	Peso Bandeja (gr)	Bandeja + Agregado (gr)	Agregado (gr)
1	545,70	4285,17	3739,47
2	545,10	3863,93	3318,83
3	546,85	5027,83	4480,98
<b>TOTAL</b>		<b>11539,28</b>	

Después de realizar las mediciones anotadas en las tablas anteriores, se obtiene la humedad de la siguiente manera:

$$w\% = \frac{P_h - P_s}{P_s} * 100$$

$$w\% = \frac{12968.97 - 11539.28}{11539.28} * 100$$

$$w\% = 11.02\%$$

Determinación de la densidad por el método de envarillado:

<b>Cuadro 9. Peso Volumétrico</b>	
Peso Recipiente (kg)	2,68
Volumen Recipiente (m3)	0,0092
Peso Recipiente + Agregado (kg)	16,62
Peso Muestra	13,94

$$\gamma = \frac{P}{V}$$

$$\gamma = \frac{13.94}{0.0092}$$

$$\gamma = 1515.22 \text{ kg} / \text{m}^3$$

<b>Cuadro 10. Gravedad Especifica, Gravedad Especifica saturada superficie seca, Absorción</b>	
Masa Picnómetro (gr)	165,54
Masa Recipiente (gr)	87,6
Masa Muestra SSS (gr) <b>D</b>	<b>500,04</b>
Masa Picnómetro + Agua (gr) <b>B</b>	<b>663,60</b>
Masa Picnómetro + Agua + Muestra SSS (gr) <b>C</b>	<b>853,45</b>
Masa Muestra Seca al Horno (gr) <b>A</b>	<b>437,69</b>

$$A\% = \frac{D - A}{A} * 100$$

$$A\% = \frac{500.04 - 437.39}{437.39} * 100$$

$$A\% = 14.25\%$$

$$GBS = \frac{A}{B + D - C}$$

$$GBS = \frac{437.69}{663.60 + 500.04 - 853.45}$$

$$GBS = 1.41$$

$$GSSS = \frac{D}{B + D - C}$$

$$GSSS = \frac{500.04}{663.60 + 500.04 - 853.45}$$

$$GSSS = 1.61$$

<b>Cuadro 11. Granulometría</b>			
Malla #	Tamaño (mm)	Peso Retenido	% Pasando
1	25,4	0	100,00%
3/4	19,05	246,58	97,86%
1/2	12,7	1703,88	83,10%
3/8	9,525	1262,8	72,15%
4	4,75	2091,48	54,03%
8	2,36	1296,66	42,79%
16	1,18	981,69	34,28%
30	0,6	801,55	27,34%
50	0,3	810,08	20,32%
100	0,15	667,03	14,54%
200	0,075	559,04	9,69%
<b>Charola</b>	0	1118,49	0,00%
<b>TOTAL</b>		<b>11539,28</b>	

Los datos de esta tabla se encuentran representados en la figura 5.

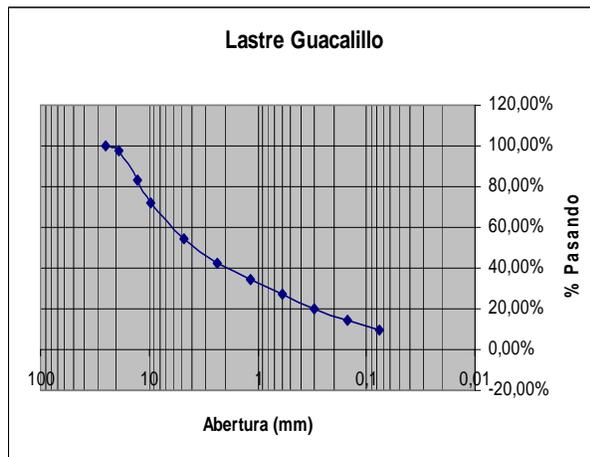


Figura 5. Granulometría Lastre Guacalillo.

## Lastre Cerro Minas

<b>Cuadro 12. Determinación de Humedad</b>			
		Pesos Iniciales	
Bandeja	Peso Bandeja (gr)	Bandeja + Agregado (gr)	Agregado (gr)
1	550,41	5189,00	4638,59
2	554,23	4529,59	3975,36
3	544,60	4682,85	4138,25
<b>TOTAL</b>			<b>12752,2</b>

<b>Cuadro 13. Determinación de Humedad</b>			
		Pesos Iniciales	
Bandeja	Peso Bandeja (gr)	Bandeja + Agregado (gr)	Agregado (gr)
1	550,41	4361,27	3810,86
2	554,23	4346,32	3792,09
3	544,60	4486,82	3942,22
<b>TOTAL</b>			<b>11545,17</b>

Después de realizar las mediciones anotadas en las tablas anteriores, se obtiene la humedad de la siguiente manera:

$$w\% = \frac{P_h - P_s}{P_s} * 100$$

$$w\% = \frac{12752,20 - 11545,17}{11545,17} * 100$$

$$w\% = 9,47\%$$

<b>Cuadro 15. Peso Volumétrico</b>	
Peso Recipiente (kg)	2,68
Volumen Recipiente (m3)	0,0092
Peso Recipiente + Agregado (kg)	19,7
Peso Muestra	17,02

Determinación de la densidad por el método de envarillado:

$$\gamma = \frac{P}{V}$$

$$\gamma = \frac{17.02}{0.0092}$$

$$\gamma = 1850.00 \text{ kg} / \text{m}^3$$

<b>Cuadro 16. Gravedad Especifica, Gravedad Especifica saturada superficie seca, Absorción</b>	
Masa Picnómetro (gr)	165,96
Masa Recipiente (gr)	72,45
Masa Muestra SSS (gr) <b>D</b>	<b>500,03</b>
Masa Picnómetro + Agua (gr) <b>B</b>	<b>664,17</b>
Masa Picnómetro + Agua + Muestra SSS (gr) <b>C</b>	<b>960,03</b>
Masa Muestra Seca al Horno (gr) <b>A</b>	<b>440,33</b>

$$A\% = \frac{D - A}{A} * 100$$

$$A\% = \frac{500.03 - 440.33}{440.33} * 100$$

$$A\% = 13.56\%$$

$$GBS = \frac{A}{B + D - C}$$

$$GBS = \frac{440.33}{664.17 + 500.03 - 960.03}$$

$$GBS = 2.16$$

$$GSSS = \frac{D}{B + D - C}$$

$$GSSS = \frac{500.03}{664.17 + 500.03 - 960.03}$$

$$GSSS = 2.45$$

<b>Cuadro 17. Granulometría</b>			
Malla #	Tamaño (mm)	Peso Retenido	% Pasando
1	25,4	0	100,00%
3/4	19,05	219	98,10%
1/2	12,7	2070,85	80,17%
3/8	9,525	1277,54	69,10%
4	4,75	2094,77	50,96%
8	2,36	1467,29	38,25%
16	1,18	1233,42	27,56%
30	0,6	843,02	20,26%
50	0,3	750,91	13,76%
100	0,15	563,11	8,88%
200	0,075	448,67	4,99%
<b>Charola</b>	0	576,59	0,00%
<b>TOTAL</b>		<b>11545,17</b>	

Los datos de esta tabla se encuentran representados en la figura 6.

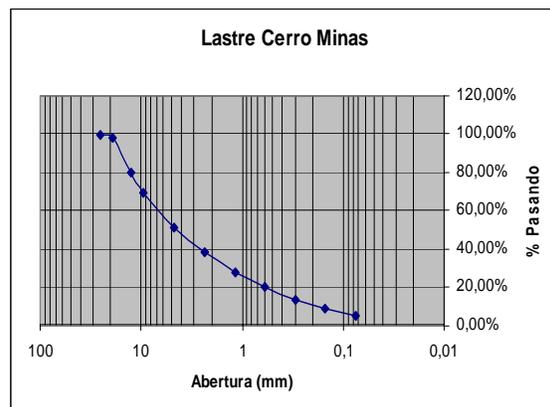


Figura 6. Granulometría lastre Cerro Minas.

# Mezclas de CCR

Al utilizar el mismo procedimiento de moldeo y compactación (ya descrito) para las tres mezclas, se obtienen las curvas de humedad, como se describen a continuación:

## Mezcla Material de Río, Guápiles

Humedad (%)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
5,58	2307,67
6,16	2360,62
6,73	2396,61
7,07	2392,27
7,34	2335,54

Los datos de esta tabla se encuentran representados en el grafico 7.

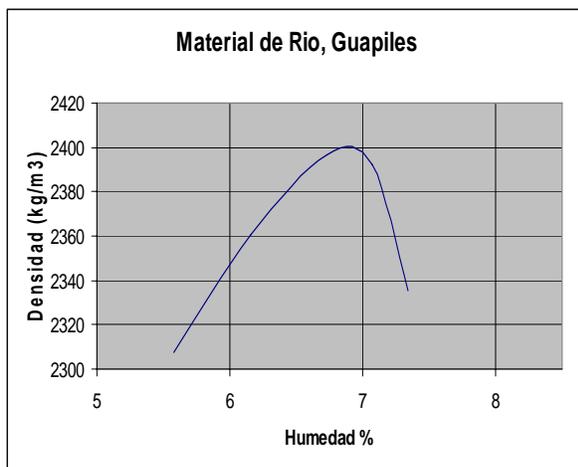


Figura 7. Curva humedad material de río, en Guápiles.

De la figura anterior se obtiene que la humedad óptima de compactación debe ser:

$$w_{op} \% = 6.85$$

Con la cual se obtiene una densidad en el concreto de:

$$\gamma = 2400kg / m^3$$

## Mezcla Lastre, Guacalillo

Humedad (%)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
17,36	2003,83
18,53	2052,53
19,07	2071,47
19,14	2073,28
19,68	2023,34

Los datos de esta tabla se encuentran representados en el grafico 8.

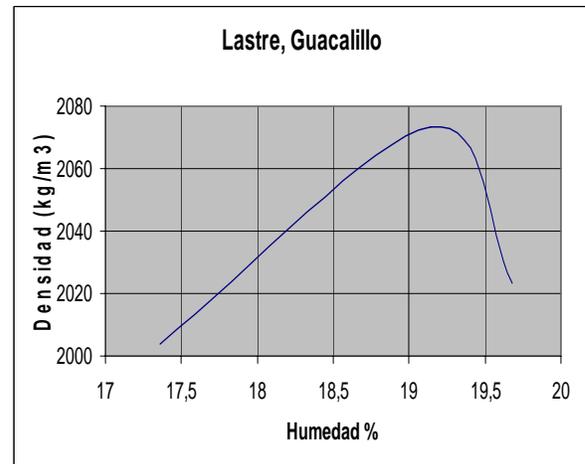


Figura 8. Curva humedad lastre Guacalillo.

De la figura anterior se obtiene que la humedad óptima de compactación debe ser:

$$w_{op} \% = 19.24$$

Con la cual se obtiene una densidad en el concreto de:

$$\gamma = 2075kg / m^3$$

## Mezcla Lastre, Cerro Minas

Cuadro 20. Densidad vrs Humedad (Cerro Minas)	
Humedad (%)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
7,09	2125,44
8,5	2271,25
9,43	2323,72
9,75	2267,83
10,14	2007,47

Los datos de esta tabla se encuentran representados en el gráfico 9.

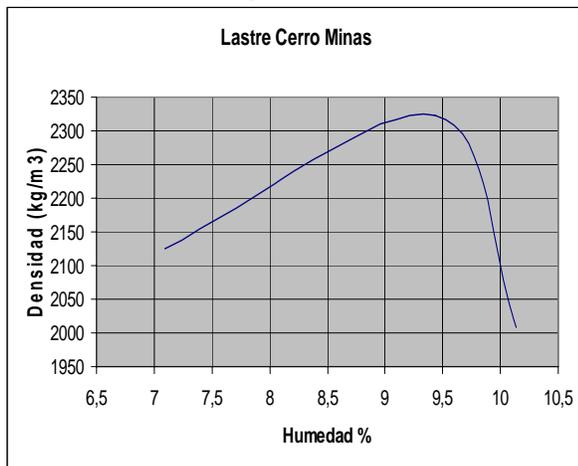


Figura 9. Curva humeada lastre Guacalillo.

De la figura anterior se obtiene que la humedad óptima de compactación debe ser:

$$w_{op} \% = 9.3$$

Con la cual se obtiene una densidad en el concreto de:

$$\gamma = 2325 \text{ kg} / \text{m}^3$$

## Resistencias obtenidas en el laboratorio

Después de haber fallado los especímenes de laboratorio, conforme a lo explicado en el

apartado de resistencias (marco teórico). Se obtienen los siguientes resultados:

## Mezcla Material Río, Guápiles

Cuadro 21. Compresión (kg/cm <sup>2</sup> ) Material Río, Guápiles.				
Edad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Prom
1	103,92	119,95	104,9	<b>109,59</b>
3	112,35	142,65	135,25	<b>130,08</b>
7	173,17	191,38	187,86	<b>184,14</b>
14	241,79	247,91	240,66	<b>243,45</b>
28	250,10	253,19	256,78	<b>253,36</b>

Los resultados de la tabla se encuentran representados en el gráfico 10:

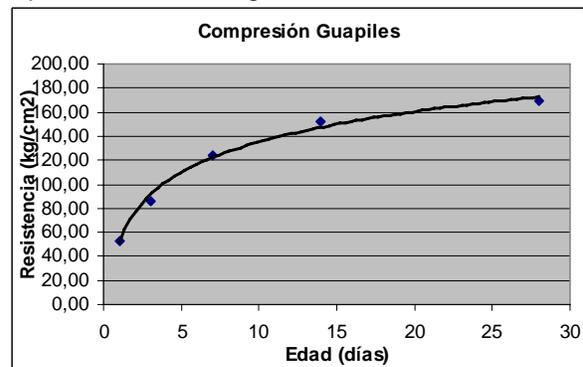


Figura 10. Curva resistencia a la compresión, material de río, Guápiles.

Cuadro 22. Tracción indirecta (kg/cm <sup>2</sup> ) Lastre Río Guápiles.				
Edad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Prom
1	13,22	13,30	13,15	<b>13,22</b>
3	13,61	13,74	13,69	<b>13,68</b>
7	18,89	17,77	18,57	<b>18,41</b>
14	22,54	23,76	23,82	<b>23,37</b>
28	24,58	23,94	25,66	<b>24,73</b>

Los resultados de la tabla se encuentran representados en el gráfico 11:

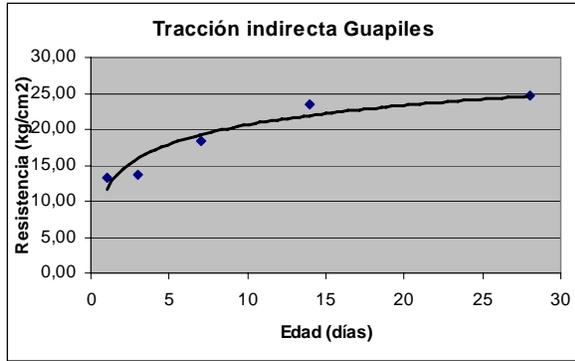


Figura 11. Curva resistencia a la tracción indirecta, material de río, Guápiles.

<b>Cuadro 23. Flexión (kg/cm<sup>2</sup>) Lastre Río Guápiles.</b>				
Edad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Prom
1	12,94	15,46	16,46	<b>14,95</b>
3	20,19	21,41	21,97	<b>21,19</b>
7	38,48	47,26	37,62	<b>41,12</b>
14	41,65	50,23	43,28	<b>45,05</b>
28	45,69	46,64	48,77	<b>47,03</b>

Los resultados de la tabla se encuentran representados en el gráfico 12:

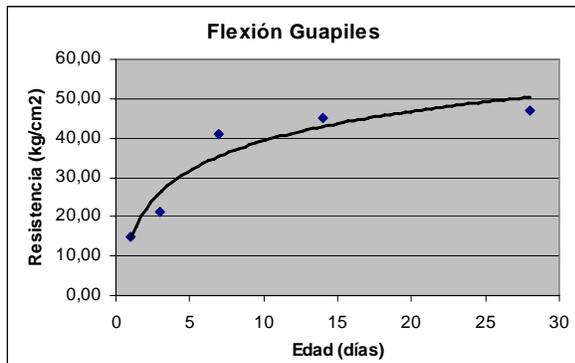


Figura 12. Curva resistencia a la flexión, material de río, Guápiles.

## Mezcla Lastre, Guacalillo

<b>Cuadro 24. Compresión (kg/cm<sup>2</sup>) Lastre Guacalillo.</b>				
Edad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Prom
1	54,56	56,6	57,02	<b>56,06</b>
3	79,52*	89,52*	90,45*	<b>86,50</b>
7	133,81*	135,29*	137,5*	<b>135,53</b>
14	177,8	185,77	180,54	<b>181,37</b>
28	187,39	185,43	185,67	<b>186,16</b>

Los resultados de la tabla 24 se encuentran representados en el gráfico 13:

**Nota:** Los especímenes con edades de 3 y 7 días, tuvieron que ser repetidos, ya que en un inicio presentaron problemas de bajas resistencias. Ver causas y soluciones en análisis de resultados.

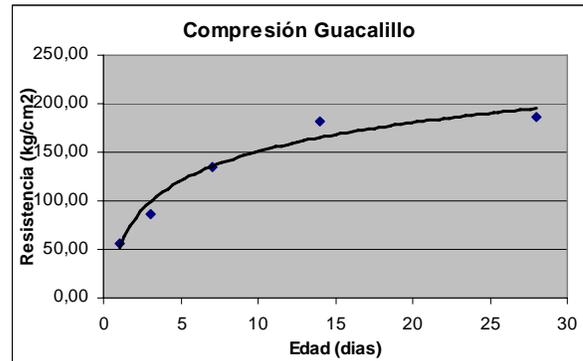


Figura 13. Curva resistencia a la compresión, lastre Guacalillo.

<b>Cuadro 25. Tracción indirecta (kg/cm<sup>2</sup>) Lastre Guacalillo.</b>				
Edad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Prom
1	8,37	7,07	7,42	<b>7,62</b>
3	8,41	7,89	7,64	<b>7,98</b>
7	16,77	16,97	16,65	<b>16,79</b>
14	17,54	18,49	18,12	<b>18,05</b>
28	19,87	18,48	19,25	<b>19,20</b>

Los resultados de la tabla 25 se encuentran representados en el gráfico 14:

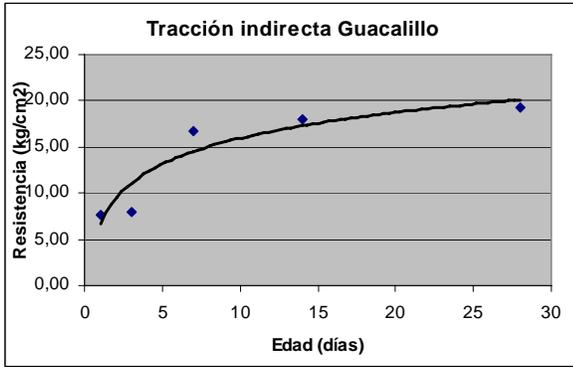


Figura 14. Curva resistencia a la tracción indirecta, lastre Guacalillo.

Edad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Prom
1	11,54	13,67	12,57	<b>12,59</b>
3	18,47	17,89	19,29	<b>18,55</b>
7	22,44	19,46	24,78	<b>22,23</b>
14	34,28	34,98	35,71	<b>34,99</b>
28	35,51	34,78	36,45	<b>35,58</b>

Los resultados de la tabla 26 se encuentran representados en el gráfico 15:

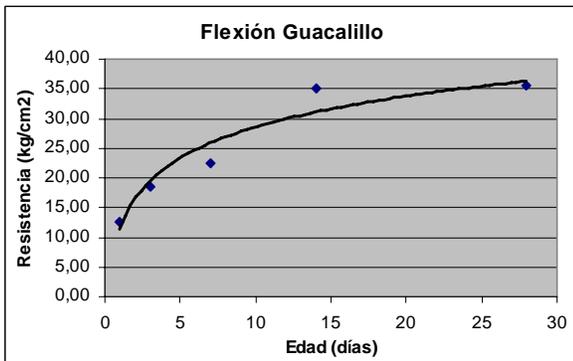


Figura 15. Curva resistencia a la tracción indirecta, lastre Guacalillo.

## Mezcla Lastre, Cerro Minas

Edad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Prom
1	54,84	48,37	55,89	<b>53,03</b>
3	79,52	89,5	90,45	<b>86,49</b>
7	123,75	120,98	126,64	<b>123,79</b>
14	148,47	153,12	155,46	<b>152,35</b>
28	168,76	173,81	166,29	<b>169,62</b>

Los resultados de la tabla 27 se encuentran representados en el gráfico 16:

**Nota:** Los especímenes con edades de 3 y 7 días, tuvieron que ser repetidos, ya que en un inicio presentaron problemas de bajas resistencias. Ver causas y soluciones en análisis de resultados.

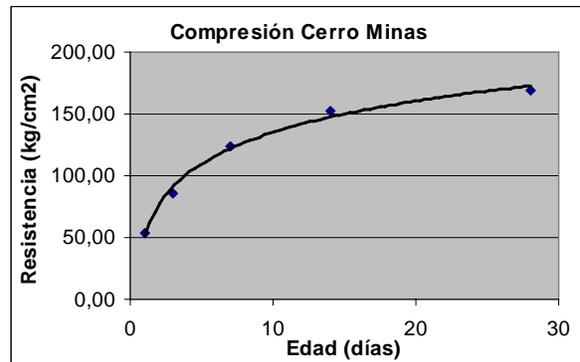


Figura 16. Curva resistencia a la compresión, lastre Cerro Minas.

Edad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Prom
1	7,94	7,81	8,06	<b>7,94</b>
3	10,81	10,99	11,24	<b>11,01</b>
7	13,87	13,25	14,40	<b>13,84</b>
14	14,79	15,51	15,74	<b>15,35</b>
28	15,23	16,55	17,42	<b>16,40</b>

Los resultados de la tabla 28 se encuentran representados en el gráfico 17:

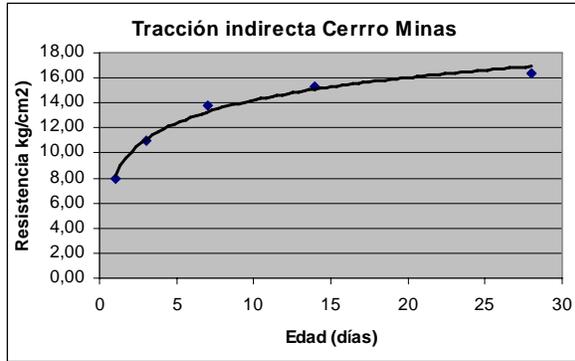


Figura 17. Curva resistencia a la tracción indirecta, lastre Cerro Minas.

Edad	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Prom
1	12,66	15,34	11,04	<b>13,01</b>
3	17,24	18,78	19,51	<b>18,51</b>
7	27,15	25,68	26,09	<b>26,31</b>
14	31,79	32,45	33,84	<b>32,69</b>
28	34,78	33,45	34,78	<b>34,34</b>

Los resultados de la tabla 29 se encuentran representados en el gráfico 18:

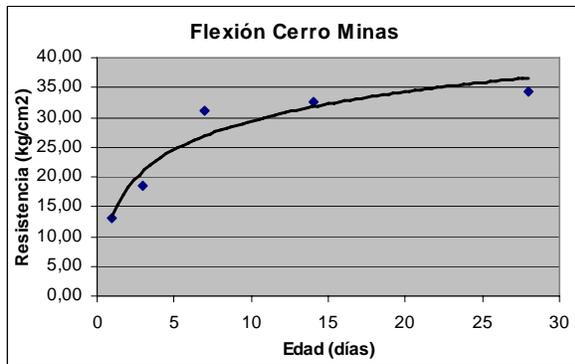


Figura 18. Curva resistencia a la flexión, lastre Cerro Minas.

## Relaciones entre parámetros, material de río, Guápiles

Edad (días)	Compresión	Tracción	Flexión
1	109,59	13,22	14,95
3	130,08	13,68	21,19
7	184,14	18,41	41,12
14	243,45	23,37	45,05
28	253,36	24,73	47,03

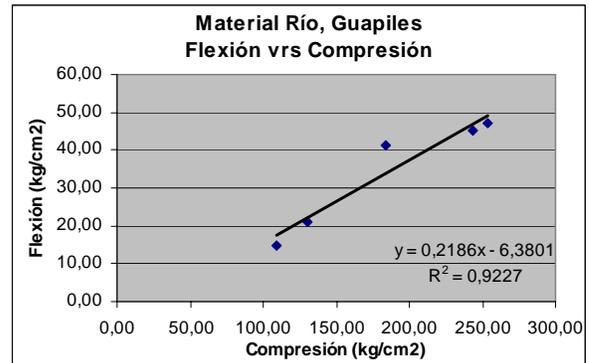


Figura 19. Curva relación compresión flexión, material de río, Guápiles.

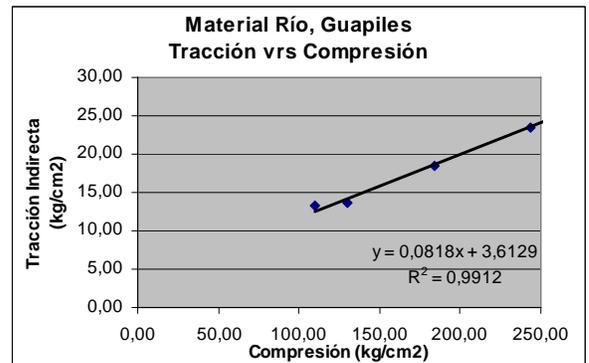


Figura 20. Curva relación compresión tracción, material de río, Guápiles.

## Relaciones entre parámetros

De los resultados anteriores de resistencias, se pueden elaborar las tablas 30, 31 y 32 además de sus respectivas graficas, para cada una de las mezclas probadas, que muestran las relaciones entre los parámetros (compresión, tracción y flexión).

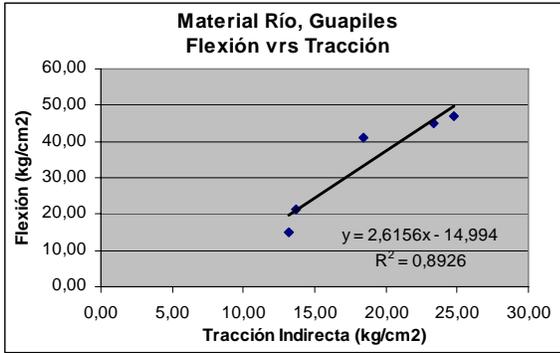


Figura 21. Curva relación tracción flexión, material de río, Guápiles.

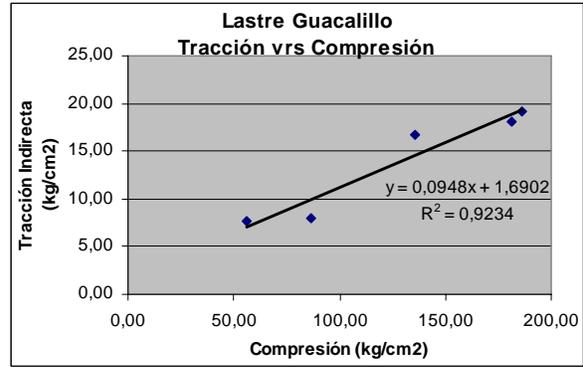


Figura 23. Curva relación tracción compresión, lastre Guacalillo.

### Relaciones entre parámetros, lastre Guacalillo

Edad (días)	Compresión	Tracción	Flexión
1	56,06	7,62	12,59
3	86,50	7,98	18,55
7	135,53	16,79	22,35
14	181,37	18,05	34,99
28	186,16	19,20	35,58

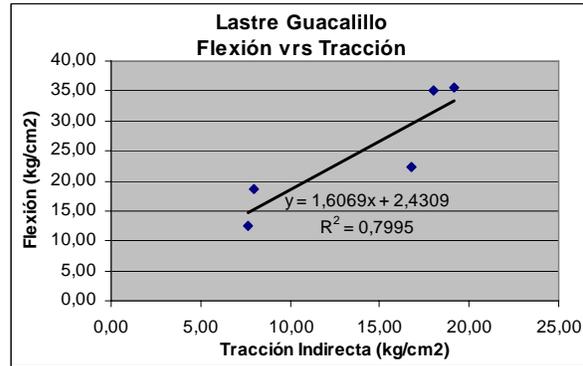


Figura 24. Curva relación tracción flexión, lastre Guacalillo.

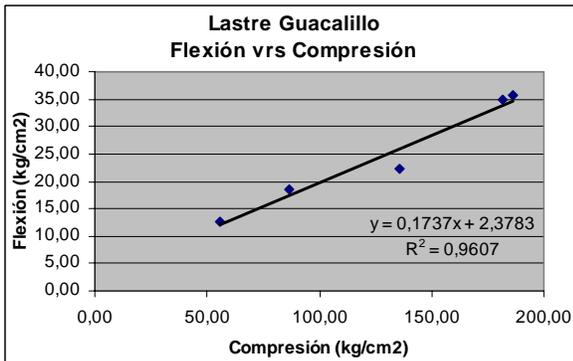


Figura 22. Curva relación compresión flexión, lastre Guacalillo.

### Relaciones entre parámetros, lastre Cerro Minas

Edad (días)	Compresión	Tracción	Flexión
1	53,03	7,94	13,01
3	85,65	11,01	18,51
7	123,79	13,84	31,03
14	152,35	15,35	32,69
28	169,62	16,40	34,34

# Diseño estructuras de pavimento

Para el diseño de las dos estructuras de pavimento propuestas (flexible y rígida) se utilizó como herramienta, el programa de diseño PAS 5.

A continuación se muestran los resultados obtenidos del programa.

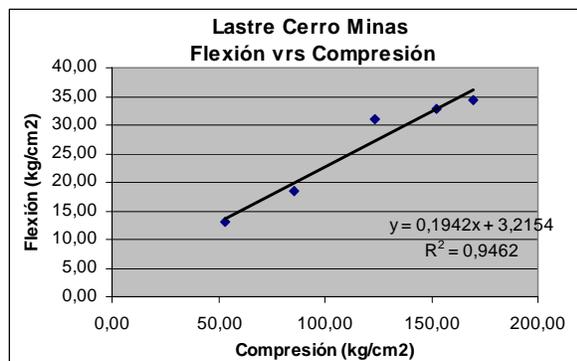


Figura 25. Curva relación compresión flexión, laste Cerro Minas.

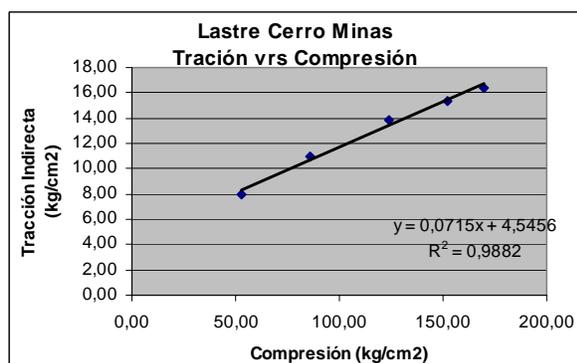


Figura 26. Curva relación tracción compresión, laste Guacalillo.

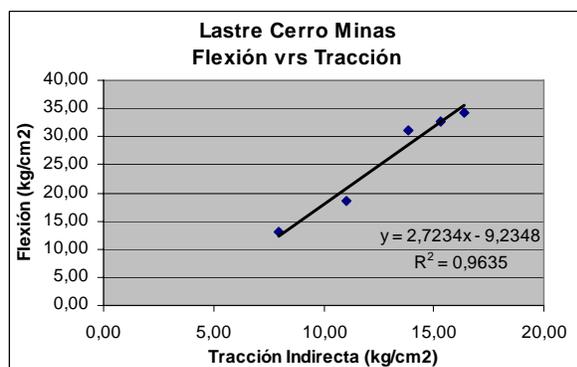


Figura 27. Curva relación tracción flexión, laste Guacalillo.

## Pavimento flexible

Carga en ejes equivalentes (E18)= 1 035 502

Confiabilidad= 90%

Desviación= 0.45

Módulo de resiliencia= 410 Kg/cm<sup>2</sup>

Servicialidad inicial= 4.2

Servicialidad final= 2.25

Coefficiente estructural asfalto= 0.40

Coefficiente estructural base= 0.20

Coefficiente estructural subbase= 0.10

Coefficiente de drenaje asfalto= 1.00

Coefficiente de drenaje base= 1.00

Coefficiente de drenaje subbase= 1.00

Número estructural= 3.75

**Espesor capa asfáltica= 5.00 cm**

**Espesor capa base= 20.00 cm**

**Espesor capa subbase= 34.00cm**

## Pavimento rígido

Carga en ejes equivalentes (E18)= 1 300 529

Confiabilidad= 90%

Desviación= 0.36

Módulo de ruptura= 35 kg/cm<sup>2</sup>

Módulo de elasticidad= 261 550 kg/cm<sup>2</sup>

Transferencia de carga= 3.60

Módulo de reacción subrasante= 8 kg/cm<sup>3</sup>

Coefficiente de drenaje= 1.00

Servicialidad inicial= 4.50

Servicialidad final= 2.25

Módulo de resiliencia subrasante= 410 kg/cm<sup>2</sup>

Módulo de resiliencia base= 1050 kg/cm<sup>2</sup>

**Espesor de capa base= 15.00cm**

**Espesor de capa de CCR = 20.00cm**

# Comparación de costos

Con los datos de espesores de capas, se procede a calcular los costos de producción y colocación de las diferentes estructuras de pavimento.

Como se muestra en las siguientes tablas.

<b>Cuadro 33. Costo producción de mezcla Guápiles</b>		
ITEM	Total (colones)	\$/m3
<i>Materiales</i>		
Cemento	12.000,00	5,05
Lastre	4.276,49	1,80
Mezclado	1.305,15	0,55
<b>SubTotal</b>	<b>22.581,64</b>	<b>9,51</b>
<i>Colocación</i>		
Transporte	1.000,00	0,42
Colocación	1.400,00	0,59
Acabado	1.000,00	0,42
<b>SubTotal</b>	<b>3.400,00</b>	<b>1,43</b>
<b>Costo Total</b>	<b>25.981,64</b>	<b>10,94</b>

<b>Cuadro 34. Costo Total Pavimento CCR Guápiles</b>		
ITEM	Costo/m2 (colones)	Costo \$/m2
Losa de concreto(instalada)	5.196,33	
Base granular	852,75	
Conformación subrasante	110,00	
<b>Total m2</b>	<b>6.159,08</b>	<b>12,97</b>

<b>Cuadro 35. Costo producción de mezcla Guacalillo</b>		
ITEM	Total (colones)	\$/m3
<i>Materiales</i>		
Cemento	12.000,00	5,05
Lastre	4.644,50	1,96
Mezclado	5.000,00	2,11
<b>SubTotal</b>	<b>21.644,50</b>	<b>9,11</b>
<i>Colocación</i>		
Transporte	1.000,00	0,42
Colocación	1.400,00	0,59
Acabado	1.000,00	0,42
<b>SubTotal</b>	<b>3.400,00</b>	<b>1,43</b>
<b>Costo Total</b>	<b>25.044,50</b>	<b>10,55</b>

<b>Cuadro 36. Costo Total Pavimento CCR Guacalillo</b>		
ITEM	Costo/m2 (colones)	Costo \$/m2
Losa de concreto(instalada)	5.008,90	
Base granular	852,75	
Conformación subrasante	110,00	
<b>Total m2</b>	<b>5.971,65</b>	<b>12,57</b>

<b>Cuadro 37. Costo producción de mezcla Cerro Minas</b>		
<b>ITEM</b>	<b>Total (colones)</b>	<b>\$/m3</b>
<i>Materiales</i>		
Cemento	12.000,00	5,05
Lastre	4.958,80	2,09
Mezclado	5.000,00	2,11
<b>SubTotal</b>	<b>21.958,80</b>	<b>9,25</b>
<i>Colocación</i>		
Transporte	1.000,00	0,42
Colocación	1.400,00	0,59
Acabado	1.000,00	0,42
<b>SubTotal</b>	<b>3.400,00</b>	<b>1,43</b>
<b>Costo Total</b>	<b>25.358,80</b>	<b>10,68</b>

Nota: en los precios de la tabla anterior se encuentran contemplados los costos de producción, transporte y colocación de las capas de la estructura de pavimento flexible.

Los precios de los rubros contemplados (producción de mezclas, transporte, colocación, mano de obra) en los presupuestos están basados en los que regían en la fecha de 26/05/05, al igual que la tasa de cambio en dólares.

<b>Cuadro 38. Pavimento CCR Cerro Minas</b>		
<b>ITEM</b>	<b>Costo/m2 (colones)</b>	<b>Costo \$/m2</b>
Losa de concreto(instalada)	5.071,76	
Base granular	852,75	
Conformación subrasante	110,00	
<b>Total m2</b>	<b>6.034,51</b>	<b>12,70</b>

<b>Cuadro 39. Costo total Pavimento Flexible</b>		
<b>ITEM</b>	<b>Costo/m2 (colones)</b>	<b>Costo \$/m2</b>
Carpeta	3.135,00	
Imprimación	110,00	
Riego de liga	110,00	
Base granular	1.137,00	
Sub base granular	1.537,93	
Conformación subrasante	110,00	
<b>Total m2</b>	<b>6.139,93</b>	<b>12,93</b>

# Resistencias, control en sitio

Falla de cilindros a compresión y vigas moldeados durante la realización de la escala natural.

## Tramo material de río procedente de Guápiles

Cuadro 40. Control de sitio. Tramo Guápiles		
Descripción	Parámetros	
	Compresión	Flexión
Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	187,78	45,09
Resist.Lab (kg/cm <sup>2</sup> )	184,14	41,12
Resist Teór.Espér (kg/cm <sup>2</sup> )	157,50	28,00

## Tramo lastre procedente de Guacalillo

Cuadro 41. Control de sitio. Tramo Guacalillo		
Descripción	Parámetros	
	Compresión	Flexión
Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	143,45	35,23
Resist.Lab (kg/cm <sup>2</sup> )	135,53	22,35
Resist Teór.Espér (kg/cm <sup>2</sup> )	157,50	28,00

## Tramo lastre procedente de Cerro Minas

Cuadro 42. Control de sitio. Tramo Cerro Minas		
Descripción	Parámetros	
	Compresión	Flexión
Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	135,33	31,15
Resist.Lab (kg/cm <sup>2</sup> )	123,79	31,03
Resist Teór.Espér (kg/cm <sup>2</sup> )	157,50	28,00

# Humedad y densidad, control en sitio

Cuadro 43. Control de sitio tramo Guápiles			
Punto	w%	%Compact	Densidad (kg/cm <sup>2</sup> )
1	9,8	81,8	1961
2	10,4	81,1	1943

Cuadro 44. Control de sitio tramo Guacalillo			
Punto	w%	%Compact	Densidad (kg/cm <sup>2</sup> )
1	14,4	90,7	1879
2	15,6	89,2	1849

Cuadro 45. Control de sitio tramo Cerro Minas			
Punto	w%	%Compact	Densidad (kg/cm <sup>2</sup> )
1	5,3	101,2	2352
2	6,3	96,6	2048
3	5,9	89,4	2078

# Análisis de resultados

De los resultados obtenidos en laboratorio para la caracterización de los agregados, surgen las siguientes clasificaciones de suelos, según el sistema SUCS:

Para el material de río, procedente de la zona de Guápiles, se clasifica como GP grava mal graduada.

El material del Tajo Guacalillo y del Tajo Cerro Minas, se clasifican como SC arenas arcillosas con grava.

Lo anterior implica que:

El material de Río de Guápiles por tener una mala graduación debe ser combinado con arena procedente del mismo río (Río Sucio), para obtener un adecuado relleno en la pasta del concreto. Por la litología de este material y por el hecho de lograr un mejor y controlado relleno en la pasta, se espera que la mezcla resultante de este material sea la que mejor (de las tres probadas) se desempeñe en cuanto a resistencia, lo cual se puede comprobar al ver los resultados de resistencias en los cuadros de resistencias los cuales van del 21 al 29 y sus respectivas graficas.

En cuanto a los materiales de tajo, Cerro Minas y Guacalillo, se espera un comportamiento mecánico similar entre ellas, que además sea de resistencias menores a las obtenidas con la mezcla de CCR con material de Guápiles, esto debido a que se observa, que la clasificación es equivalente, sin embargo, de las graficas de granulometría (figuras 4, 5 y 6) se observa que el agregado de Guacalillo tiene una mejor distribución granulométrica (ligeramente) y por lo tanto puede aportar mayor resistencia a la mezcla de concreto hecha con él, lo cual se comprueba

al ver los resultados de resistencias en los cuadros 21 al 29.

En cuanto al diseño de mezclas de concreto es importante acotar que para efectos de trabajo y manipulación de la mezcla de CCR la humedad de trabajo (en el campo o en pruebas de laboratorio), debe ser aumentada en 1% o 2% de la humedad óptima determinada en el laboratorio, ya que las mezclas de CCR tienden a perder humedad con rapidez, lo cual podría eventualmente acarrear problemas de laminación, segregación, pulverización, que se verán reflejados en las resistencias. A continuación, análisis de probetas defectuosas:

Los cilindros de compresión con edades de de 3 y 7 días para las mezclas hechas con los lastres de Guacalillo y Cerro Minas, en un principio presentaron problemas de baja resistencia, por lo que se debió moldear y fallar nuevos cilindros.

Dentro de las posibles causas encontradas para la explicación de estas bajas resistencias, las que figuran como las más probables, se tiene que hubo falta de humedad en la confección de las mezclas, lo cual acarrea problemas de pulverización e indirectamente problemas de juntas frías las cuales se notaban a simple vista en algunos los cilindros (ver figura 28) ya que la manipulación del CCR es muy delicada. Además se pudo haber tenido problemas de concentraciones de esfuerzos en el momento de la falla ya que las almohadillas (normadas en la ASTM como sustitución del capeado) estaban desgastadas.



Figura 28. Ejemplo de junta fría en probeta de laboratorio.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se repitieron los cilindros agregando más humedad a la mezcla y manteniendola protegida en su manipulación contra la pérdida de humedad y el moldeo se hizo tratando de imprimirle la suficiente energía para que no se dieran juntas frías.

Además se cambiaron las almohadillas por unas nuevas en el momento de la falla.

Al hacer las correcciones, la nueva falla de cilindros proporcionó nuevos resultados que cumplían con lo esperado.

La respuesta mecánica de los materiales obtenida se mantuvo dentro de lo esperado desde un inicio, tomando como referencia la procedencia composición y granulometría de los agregados. Siendo la mezcla de CCR hecha con la grava y arena de Guápiles la que generó mayor resistencia, seguida por el material de lastre de Guacalillo y por último el lastre de Cerro Minas. Como se puede apreciar en las tablas de resistencias y sus respectivas figuras, de donde se ve satisfactoriamente que las tres mezclas alcanzaron a los 28 días (algunas a los 14 días), los valores esperados de resistencia, en los parámetros medidos compresión, tracción y principalmente el de flexión (ya que es el parámetro de diseño, para las estructuras de pavimento).

En las figuras 19 a 27, se hallan representados los parámetros: de flexión versus compresión, tracción contra compresión y flexión versus tracción, se ve que los coeficientes de correlación de estas graficas se mantienen dentro de un rango permisible estadístico (el resultado más bajo igual a 0.80 y 0.99 para el más alto) lo

cual indica un grado de confiabilidad aceptable, en los resultados de laboratorio. Estas gráficas son de gran interés ya que de estas figuras se pueden obtener las relaciones que existen entre los parámetros (pendientes de las graficas). Siendo estas relaciones una vital herramienta para obtener valores aproximados de flexión a partir de datos de compresión y tracción, en el caso de muestreo de carreteras ya que es muy difícil obtener testigos en forma de vigas para fallar a flexión, se puede entonces llegar a estos valores fallando testigos cilíndricos en compresión y/o flexión.

Para el diseño de cada una de las estructuras de pavimento propuestas, flexible y rígida, se tomó en consideración la misma carga en ejes equivalentes, calculada según datos de conteo de la empresa Holcim.

Una vez obtenidos los diseños se procedió a calcular sus respectivos costos. Se obtiene así un costo mayor en el caso de la estructura flexible de pavimento de \$12.93 por cada metro cuadrado, cuando se compara con los costos de la estructura rígida en cuya confección de mezcla de CCR se hace uso de los lastres de Guacalillo \$12.57 y Cerro Minas \$12.7. En el caso la estructura rígida con material de Guápiles, se ha obtenido un costo ligeramente mayor al de la estructura flexible, sin embargo debe recordarse que las tres mezclas tienen en su dosificación 200 Kg de cemento por cada metro cúbico, y al tener la mezcla de Guápiles un excelente comportamiento mecánico (más alto del que se esperaba), se puede hacer una mejora en la dosificación de esta mezcla para reducir la cantidad de cemento y con esto el costo, garantizando aun así la resistencia mínima necesaria.

Respecto a los resultados de control de campo de humedades y densidades (cuadros 43, 44 y 45). Se tienen compactaciones con muy buenos resultados, del 100% en algunos puntos y superiores a 90% en otros puntos, los puntos con resultados de compactaciones menores a 90% no deben ser alarmadores ya que en el momento de la realización de la escala natural no se utilizó la compactadora de rodillo, la cual habría aumentado los valores.

El proceso constructivo de los pavimentos de CCR se inicia con el mezclado del concreto, el cual puede producirse en mezcladores volumétricos (continuos) o con mezcladores estacionarios, que dosifican con peso (discontinuos). Independientemente del equipo que se utilice, el sistema debe de contar con equipos dosificadores confiables, cuyas desviaciones sean muy bajas, lo que garantiza concretos de calidad. El mezclador debe poseer características tales que produzca concretos homogéneos.



Figura 29. Mezclador.

Una vez dosificada la cantidad de cemento, agua y agregados se inicia el proceso constructivo, al descargar la mezcla resultante en vagonetas que harán su transporte al sitio del proyecto. En este punto se debe tomar en cuenta que para su traslado el equipo debe de contar con sistemas que protejan la mezcla, ya que esta por ser un material de cero revenimiento es muy susceptible a los cambios de humedad y segregación. Lo normal y frecuente que se utilicen lonas para cubrir las mezclas en la góndola, para evitar la evaporación.

Un aspecto importante a considerar en cuanto al transporte se refiere, es la distancia de acarreo, la cual debe ser estudiada detenidamente para calcular el número adecuado de vagonetas que permitan la colocación en

forma continua, para evitar problemas de juntas frías y pérdida de trabajabilidad en la mezcla. La colocación de la mezcla se hace con una pavimentadora del mismo tipo que las que se usan en la colocación de asfalto (como la que se observa en las siguientes figuras).



Figura 30. Pavimentadora (vista frontal).



Figura 31. Pavimentadora (vista posterior).

Seguidamente la vagoneta se aproxima en reversa y se coloca frente a la pavimentadora, poco a poco sube la góndola y ambas (vagoneta y pavimentadora) inician la marcha (la cual también es lenta), durante este proceso debe tenerse cuidado de no derramar la mezcla de concreto.



Figura 32. Movimiento en conjunto de la maquinaria para la colocación de la mezcla de CCR

Durante el recorrido la maquina pavimentadora va compactando la mezcla colocada, a la vez que deja el acabado final de la superficie. En el caso de haber defectos (baches o montículos) en el acabado, los cuales pueden suceder por errores de los operadores o de la máquina, deben ser corregidos de inmediato, escarificando la zona afectada con rastrillos y volviendo a rellenar con mezcla nueva, la cual será compactada con la aplanadora.

Una vez que la superficie se encuentra en perfectas condiciones y que ha transcurrido el suficiente tiempo para que la compactadota se pueda apoyar sobre el concreto, se debe hacer la compactación de la mezcla, la cual debe hacerse iniciando por los extremos y avanzando hacia el centro, apoyando la mitad del rodillo sobre la sección anterior, además se debe tomar en cuenta que la primera entrada de la compactadora debe ser sin vibración, la segunda vez debe vibrarse sólo el rodillo delantero y la tercera debe ser igual que la primera sin vibración.

Durante el proceso de construcción es muy importante mantener el control de compactación y humedad, ya que alcanzar las resistencias planteadas depende de estos parámetros. Para lo cual se utiliza un densímetro nuclear.



Figura 33. Densímetro nuclear.

Una vez terminada la compactación es importante mantener la condición de no desecación superficial para lograr un correcto fraguado del concreto, lo que depende del curado de la mezcla, para evitar que se creen fisuras propias de la retracción. Se puede hacer con diferentes materiales, agua, emulsión asfáltica o membrana de cura.



Figura 34. Curado de la superficie del concreto con membrana de cura.

# Conclusiones

El material procedente del Río Sucio en Guápiles, se clasifica como: GP grava mal graduada.

Los lastres procedentes de los tajos de Guacalillo y Guacalillo se clasifican como: SC arenas arcillosas con grava.

Las tres mezclas de CCR confeccionadas con los agregados probados, alcanzan la resistencia mínima, necesaria para el diseño de la estructura de pavimento rígido,  $35\text{kg/cm}^2$  en flexión a los 28 días de edad.

La mezcla de CCR con mejor respuesta mecánica, es la fabricada con el agregado procedente de Guápiles, seguida por la fabricada con los lastres de Guacalillo y Cerro Minas.

Las estructuras de pavimento rígido cuya mezcla de CCR es fabricada con los lastres de Cerro Minas y Guacalillo tienen un costo menor que las estructuras de pavimento flexible.

La estructura de pavimento rígido cuya mezcla utiliza el material de Río de Guápiles tiene un costo mayor que las estructuras de pavimento flexible.

La mezcla de CCR fabricada con material de Río de Guápiles debe ser optimizada para obtener un costo menor en su producción y una disminución en las resistencias.

# Apéndices

A continuación se muestra el material que sirvió para calcular las propiedades buscadas en las pruebas realizadas.

# Anexos

A continuación se anexa parte del material que sirvió para llevar a cabo este documento. Mucho de este material se menciona en partes claves del documento, como las normas ASTM o los métodos AASHTO, por lo cual se adjuntan.

# Referencias

1995. **ACI CAPITULO DE COSTA RICA. ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS CON HORMIGON COMPACTADO CON RODILLO CCR.** Costa Rica: Editorial Ministerio de Obras Publicas y Transportes.
- Kraemer, C. 1991. **CURSO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRAULICO (TOMOS I II Y III ).** Madrid: Editorial Universidad Politécnica de Madrid.
- Salazar, A. 1998. **GUIA PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS DE RIGIDOS.** México: Editorial Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto.
- Villemagne, M.  
Palliere A.  
Retour P. 2000. **CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS.** Colombia: Editorial Instituto del Concreto.
2002. **GUIA PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS DE RIGIDOS.** Guatemala: Secretaria de Integración Centroamericana.
- Cárdenas R. 2003. **PROPIEDADES MECANICAS Y PRACTICAS CONSTRUCTIVAS DEL CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO PARA PAVIMENTOS (CCRV).** Informe de trabajo de graduación para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. Costa Rica.