



**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**ANÁLISIS DEL MODELO DE CÁLCULO RACIONAL DE
DISEÑO DE MEZCLAS RCC (ROLLER COMPACTED CONCRETE)**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO CIVIL

REALIZADO POR:

**Br. MAURICIO A. DÁVILA
Br. MILAGROS A. RODRÍGUEZ**

TUTOR:

ING. JUAN M. HOLMQUIST

FECHA:

Caracas, Junio de 2016



**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

Este Jurado, una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con el resultado: Dieciocho (18)

JURADO EXAMINADOR

Nombre: Ing. Guillermo Bonilla **Nombre:** Ing. Vincenzo Bonadío **Nombre:** Ing. Juan M. Holmquist

Firma: _____ **Firma:** _____ **Firma:** _____

REALIZADO POR:

**Br. MAURICIO A. DÁVILA
Br. MILAGROS A. RODRÍGUEZ**

TUTOR:

ING. JUAN M. HOLMQUIST

FECHA:

Caracas, Junio de 2016

DEDICATORIA

*A mis Padres y Hermanos. Luego de tres años separados, siguen siendo
el impulsor para seguir adelante: a ustedes, ésto y más.*

Mauricio A. Dávila H.

*A mi familia, quienes han sido mi apoyo incondicional y mi motivación
principal en muchas circunstancias.*

Milagros A. Rodríguez M.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por darnos las fuerzas necesarias para afrontar con valor los retos que día a día se imponen ante nosotros, tanto a nivel académico como personal. Gracias a ello hoy se cumple una nueva meta.

A nuestros padres, hermanos, abuelos y tíos por su apoyo. Por siempre tener una palabra de regocijo para nosotros, por su comprensión, sacrificios y preocupaciones; entre muchas otras cosas gracias por demostrarnos cuan privilegiados somos de llamarles familia.

Al Ing. Luis Eloy Feo Carchidio, nuestro tutor a distancia, siendo él la cabeza principal de este trabajo, brindando todo el apoyo requerido junto al Ing. Juan Manuel Holmquist Peña, tutor académico, quienes además de aportar sus conocimientos y experiencias, nos guiaron y acompañaron con atención, esmero y compromiso durante estos últimos meses.

A Alfredo Duque, quien dedicó gran parte de su tiempo en transferirnos sus conocimientos, anécdotas y experiencias. Gracias por haber tenido disposición y paciencia, y por prestar ayuda absoluta en los momentos más necesitados.

Gracias a Ingeniería Geotécnica Prego, C.A. por haber aportado los equipos, materiales, accesorios e instalaciones necesarias para darle vida a este proyecto. En especial agradecemos al personal del laboratorio: Christian, Gustavo y Jean Carlos, por su apoyo e inagotable cooperación en los aspectos técnicos de nuestro Trabajo Especial de Grado.

A Rafael Rodríguez y Carmen de Rodríguez, gracias por el cariño, por el ánimo y por recibirnos en su hogar con las puertas abiertas sin duda alguna.

A Alejandra Rodríguez, por su tiempo y su paciencia, gracias por tener la disposición para ayudarnos cuando era necesario.

A Stefanie Bianculli, por su paciencia y palabras de motivación en el transcurso de este trabajo. A ella y su familia, miles de gracias.

A todos ¡Gracias! de una forma u otra su aporte hizo posible la realización de este Trabajo Especial de Grado.

ÍNDICE GENERAL

| | Pág. |
|--------------------------------------|------|
| DEDICATORIA..... | I |
| AGRADECIMIENTOS..... | III |
| ÍNDICE GENERAL..... | V |
| ÍNDICE DE FIGURAS | IIX |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | XI |
| SINOPSIS..... | XIII |
| CAPÍTULO I | |
| INTRODUCCIÓN..... | 15 |
| 1.1- Planteamiento del Problema..... | 16 |
| 1.2- Antecedentes..... | 20 |
| 1.3- Objetivo General..... | 21 |
| 1.4- Objetivos Específicos | 21 |
| 1.5- Alcances..... | 21 |
| 1.6- Limitaciones | 22 |
| CAPÍTULO II | |
| MARCO TEÓRICO | 23 |
| 2.1- Concepto..... | 23 |
| 2.2- Precedente Histórico..... | 23 |
| 2.3- Filosofías de Diseño | 24 |
| 2.3.1- Aspectos Generales..... | 24 |
| 2.3.2- Filosofía de Suelos | 25 |
| 2.3.3- Filosofía de Concreto | 26 |
| 2.4- Aplicaciones | 29 |
| 2.5- Ventajas y Desventajas..... | 29 |
| 2.6- Materiales | 31 |
| 2.6.1- Aspectos Generales..... | 31 |
| 2.6.2- Cemento | 31 |
| 2.6.3- Agua..... | 31 |
| 2.6.4- Agregados | 32 |
| 2.6.5- Aditivos..... | 34 |

| | |
|--|-----------|
| 2.6.6- Puzolana..... | 34 |
| 2.7- Proporción de Mezcla..... | 35 |
| 2.7.1- Aspectos Generales..... | 35 |
| 2.7.2- Consideraciones Básicas..... | 35 |
| 2.8- Preparación de Muestras..... | 40 |
| 2.9- Energía de Compactación..... | 41 |
| 2.10- Control de Calidad..... | 42 |
| 2.11- Precedentes Nacionales..... | 43 |
| 2.11.1- Presa El Guapo..... | 43 |
| 2.11.2- Presa de Cuira..... | 47 |
| | |
| CAPÍTULO III | |
| MARCO METODOLÓGICO..... | 51 |
| 3.1- Enfoque de la Investigación..... | 51 |
| 3.2- Tipo de Investigación..... | 51 |
| 3.3- Diseño de Investigación..... | 51 |
| 3.4- Población y Muestra..... | 52 |
| 3.5- Recolección de Datos..... | 53 |
| 3.6- Equipos y Accesorios Utilizados..... | 54 |
| 3.7- Variables..... | 56 |
| 3.7.1- Variables Dependientes..... | 56 |
| 3.7.2- Variables Independientes..... | 56 |
| 3.7.3- Parámetros Constantes..... | 57 |
| 3.8- Materiales Utilizados..... | 57 |
| 3.9- Metodología de Diseño..... | 58 |
| 3.9.1- Calidad de Pasta..... | 58 |
| 3.9.2- Cantidad de Pasta..... | 59 |
| 3.10- Dosificaciones..... | 64 |
| 3.11- Fases de Ejecución..... | 64 |
| 3.11.1- Preparación de Agregados..... | 64 |
| 3.11.2- Preparación de Mezclas y Probetas..... | 66 |
| 3.12- Ensayos..... | 68 |
| 3.12.1- Para obtener Resistencia..... | 68 |
| 3.12.2- Para obtener Densidad Real..... | 70 |

CAPÍTULO IV

| | |
|---|-----------|
| RESULTADOS Y ANÁLISIS | 73 |
| 4.1- Análisis General | 73 |
| 4.2- Evaluación de comportamiento mecánico..... | 77 |
| 4.3- Evaluación de la resistencia según el contenido de cemento | 77 |
| 4.4- Evaluación de la densidad de la mezcla | 78 |

CAPÍTULO V

| | |
|---|-----------|
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 81 |
| 5.1- Conclusiones | 81 |
| 5.2- Recomendaciones | 83 |

BIBLIOGRAFÍA

| | |
|----------------------------------|----|
| Referencias Bibliográficas | 85 |
| Referencias Electrónicas..... | 87 |

ANEXO A

| | |
|--|-----------|
| CONCEPTOS FUNDAMENTALES O GLOSARIO..... | 89 |
|--|-----------|

ANEXO B

| | |
|----------------------------------|-----------|
| HOJAS DE CÁLCULO | 93 |
| Anexo B.1- Diseño 1 (D-001)..... | 95 |
| Anexo B.2- Diseño 2 (D-002)..... | 97 |
| Anexo B.3- Diseño 3 (D-003)..... | 99 |
| Anexo B.4- Diseño 4 (D-004)..... | 101 |

ANEXOS C

| | |
|------------------------------------|------------|
| RESULTADOS DE DISEÑOS | 103 |
| Anexo C.1- Diseño 1 (D-001) | 105 |
| Anexo C.2- Diseño 2 (D-002) | 107 |
| Anexo C.3- Diseño 3 (D-003) | 109 |
| Anexo C.4- Diseño 4 (D-004) | 111 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|------|
| Figura 1.1- Diagrama de fase del RCC..... | 18 |
| Figura 1.2- Polígono de Vacíos. | 19 |
| Figura 1.3- Curvas de Relación agua/cemento (w/c') vs. Resistencia a la Compresión (f'c) para distintas edades. | 20 |
| Figura 2.1- Curvas de Laboratorio Humedad-Densidad para mezclas CCR, sujetas a varias energías de compactación. | 25 |
| Figura 2.2- Equipo utilizado para realizar Proctor Modificado. | 26 |
| Figura 2.3- Equipo utilizado para realizar Ensayo VeBe. | 27 |
| Figura 2.4- Curvas de Resistencia RCC que pueden ser desarrolladas con varias proporciones de cemento para agregados de buena calidad. | 33 |
| Figura 2.5- Curvas de Resistencia RCC que pueden ser desarrolladas con varias proporciones de cemento para agregados de menor calidad. | 33 |
| Figura 2.6- Método de preparación de cilindros vs Trabajabilidad relativa..... | 40 |
| Figura 2.7- Falla del aliviadero de La Presa de Tierra El Guapo (1999). | 43 |
| Figura 2.8- Bandas Granulométricas de los agregados para mezcla RCC. | 46 |
| Figura 2.9- Reconstrucción de Presa El Guapo con RCC (2007). | 47 |
| Figura 3.1- Compresor SULLIVAN..... | 54 |
| Figura 3.2- “Bailarina” TOKU JET-06. | 54 |
| Figura 3.3- Compresor Hidráulico. | 55 |
| Figura 3.4- “Trompo” Mezclador..... | 55 |
| Figura 3.5- Moldes Cilíndricos (“Conchas”)..... | 56 |
| Figura 3.6- Curva Granulométrica usada. | 58 |
| Figura 3.7- Polígono de Vacíos | 63 |
| Figura 3.8- Resultado Ensayo Proctor Modificado (18-02-2016)..... | 65 |
| Figura 3.9- Material Tamizado y Sellado por tamaño..... | 66 |
| Figura 3.10- Colocación de las capas de RCC en las “conchas”..... | 67 |
| Figura 3.11- Enrasado de la superficie de las probetas. | 68 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.12- Probeta C-3 (Diseño D-001)..... | 69 |
| Figura 3.13- Compresión de Probeta C-03 (Diseño D-001)..... | 69 |
| Figura 3.14- Falla de Probeta C-3 (Diseño D-001). | 70 |
| Figura 3.15- Medición de Peso Sumergido | 71 |
| Figura 3.16- Recolección de Datos en Planillas de Registro..... | 71 |
| Figura 4.1- Gráfica Resistencia vs. Relación a/c para 7 días. | 74 |
| Figura 4.2- Gráfica Resistencia Vs. Relación a/c' para 28 días. | 75 |
| Figura 4.3- Gráfica Resistencia Vs. Relación a/c' para 56 días. | 75 |
| Figura 4.4- Gráfica Resistencia Vs. Relación a/c' para 90 días. | 76 |
| Figura 4.5- Resistencia a Compresión Vs. Relación a/c' para todas las edades..... | 76 |
| Figura 4.6- Gráfica de Resistencia RCC para Diferentes Proporciones de Cemento.... | 77 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|---|------|
| Tabla 2.1- Factores característicos para las filosofías de RCC (Hansen, K.D., 1991).. | 38 |
| Tabla 2.2- Contenido de agua, arena y aire atrapado, y proporción de mortero por unidad de volumen para varios tamaños máximos. | 38 |
| Tabla 2.3- Parámetros de Mezcla de Presa El Guapo (2006)..... | 44 |
| Tabla 2.4- Bandas límites de Curva Granulométrica utilizada (El Guapo)..... | 45 |
| Tabla 2.5- Bandas límites de Curva Granulometría (Cuira)..... | 48 |
| Tabla 2.6- Dosis de Cálculo vs Dosis Real (Cuira)..... | 49 |
| Tabla 3.1- Muestra de la investigación..... | 53 |
| Tabla 3.2- Datos de Curva Granulométrica usada..... | 58 |
| Tabla 3.3- Especificaciones de Vacíos (Cuira) | 61 |
| Tabla 3.4- Combinaciones de Vértices Posibles | 62 |
| Tabla 3.5- Cantidad de materiales por metro cúbico (m ³) de mezcla..... | 64 |
| Tabla 4.1- Condiciones Controladas | 73 |
| Tabla 4.2- Resistencia a Compresión (Mpa) | 73 |
| Tabla 4.3- Resistencia a Compresión (Kgf/cm ²) | 74 |
| Tabla 4.4- Densidad Máxima Teórica | 74 |
| Tabla 4.5- Ensayo Rice..... | 78 |

SINOPSIS

En el diseño de mezclas de Concreto Compactado con Rodillo “CCR” (o RCC, por sus siglas en inglés) existen una gran cantidad de variables que no se encuentran normalizadas. Por ello es importante establecer un proceso estandarizado y una respuesta predecible, para así evitar un trabajo complejo de ensayo y error al momento de trabajar con dicha mezcla.

Apartando las variables externas (temperatura, lapsos de manejo, etc.), las propiedades de los materiales que componen el RCC son pieza fundamental en su proceso de cálculo. El cemento y los agregados deben cumplir con ciertos parámetros para garantizar su resistencia a la compresión y la capacidad a ser trabajado por capas.

Asimismo, la energía de compactación aplicada debe tomarse en cuenta para minimizar los vacíos y, a su vez, evitar la fatiga del material. Se han propuesto diversos métodos de confección de probetas, no hay un patrón de energía que los unifique. El nivel de energía utilizado en estos métodos se aproxima al utilizado en el ensayo Proctor Modificado (ASTM-D1557).

Existen distintos diseños de mezclas exitosos, de los que se pueden desprender infinidad de conclusiones. Con un modelo de cálculo, creado por el ingeniero Luis Eloy Feo, participante en el diseño de mezcla de RCC de la presa de Cuira, se desprenden varios temas de investigación posibles; como el ajuste de variables empíricas que se utilizan en el procedimiento de cálculo; la profundización en el control de calidad de los materiales, experimentando con ciertos tipos de ensayos para evaluar cuales arrojan resultados más óptimos. Así como también la validación del modelo en términos generales, ensayando probetas de concreto.

Es por ello que el Trabajo Especial de Grado que a continuación se presenta evaluó ciertas consideraciones que deben ser tomadas en cuenta a la hora del diseño de mezcla RCC. Determinando la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas, preparadas y ensayadas en la ciudad de Barcelona, Estado. Anzoátegui, con distintas dosificaciones y siguiendo los parámetros utilizados en la única obra realizada en el país con este material: la reconstrucción de la Presa de El Guapo.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Las técnicas del RCC han hecho que presas de gravedad construidas con este material sean una alternativa económicamente competitiva, comparada con las presas de concreto convencional y presas de tierra. De las obras ya realizadas, se derivan lecciones que se han aprovechado sucesivamente en la metodología de construcción, adecuación de plantas, equipo y comportamiento estructural obtenido, generando así una constante que, paso a paso, ha incrementado el nivel de confianza y el camino a la “perfección” en la construcción de uno de los proyectos de ingeniería más exigentes de la industria: una presa.

El RCC es el desarrollo más importante en el diseño y construcción de presas de los últimos años. Éste proviene de especialistas en tecnología del concreto y en ingeniería geotécnica para la construcción de presas. Sin embargo, este método también es aplicado en la construcción de pavimentos.

Los retos que actualmente enfrenta este material son diversos. Entre los grandes desafíos en el desarrollo de ingeniería de las presas, se encuentran la rentabilidad y la determinación de factores constructivos.

La resistencia a la compresión, la capacidad para ser trabajado y de garantizar la unión intercapas son algunas de sus propiedades más importantes. Para el Modelo de Cálculo Racional de Diseño de Mezcla RCC propuesto, la curva en la cual se refleja la resistencia en función de la relación “a/c” (agua/cemento) es tomada de la guía 207.5R.11 publicada por ACI. Sin embargo, esta curva carece de detalles en la forma como se construyeron los diversos puntos de ensayo y por esta razón, con el presente proyecto se pretende justificar que la misma es válida para llevar a cabo los cálculos del diseño de mezcla.

En el desarrollo de las actividades incluidas en el presente Trabajo Especial de Grado se hace una recopilación de información de las medidas y soluciones adoptadas para el diseño de mezclas de RCC, con la finalidad de ubicar al lector en el estado del arte del material.

Es importante reconocer que hay mucho por aprender acerca de las mezclas de RCC, por lo que se requiere realizar más investigaciones con una cantidad mayor de pruebas en laboratorios, a fin de una mejor utilización y adaptación de esta nueva tecnología.

1.1- Planteamiento del Problema

El uso del RCC ha permitido que muchas obras civiles, especialmente presas y pavimentos, sean económicamente viables debido al reducido costo derivado del rápido método de construcción. También ha proporcionado la oportunidad de rehabilitar o reforzar presas ya construidas que tienen problemas de funcionalidad.

Al momento de diseñar mezclas de RCC han surgido dos filosofías o aproximaciones. La mayoría de los expertos aplican un enfoque similar al diseño del concreto convencional, y otros apuestan por un enfoque geotécnico. Sin embargo, ninguno de estos criterios está basado en un método racional de cálculo que abarque distintas variables y defina un proceso estandarizado para conseguir un diseño de mezcla “óptimo”.

En Julio 2016 se llevará a cabo en la ciudad de Shandong, China, la 4^{ta} Conferencia Internacional GeoChina, donde el Ingeniero venezolano Luis Eloy Feo presentará una propuesta de cálculo inédita, un método racional basándose en comportamiento geomecánico y en experiencias exitosas con el uso de RCC en presas.

El modelo de cálculo parte de las tres propiedades fundamentales que gobiernan la respuesta del RCC luego de ser compactada la mezcla, denominados vacíos totales (V_t), vacíos llenados ($\%V_F$) y vacíos del agregado mineral (V_{MA}) (Figura 1.1).

Para V_t el valor máximo se establece en 4% para el cual el RCC garantiza sus propiedades mecánicas, y el nivel mínimo se establece en 1% dado que es un valor alcanzable en laboratorio con el nivel de energía seleccionado.

Los valores para V_{MA} han ido variando a lo largo de los años, utilizándose antiguamente valores entre 18% y 20%, y en ocasiones, valores hasta de 28%. En la actualidad, según se avanza en la tecnología del concreto compactado, este rango está restringido a valores comprendidos entre 22% y 24%.

El parámetro V_F , depende de los dos anteriores, según la fórmula:

$$\%V_F = \frac{V_p}{V_{MA}} = 1 - \frac{V_t}{V_{MA}}$$

“Sólo el cumplimiento simultáneo de los tres parámetros, garantizará la obtención de un producto similar al establecido en el diseño” (Feo, L. 2015).

En términos generales, los parámetros mencionados son estimaciones iniciales que deberán ir ajustándose conforme se depure el método de cálculo y se compare con experiencias exitosas.

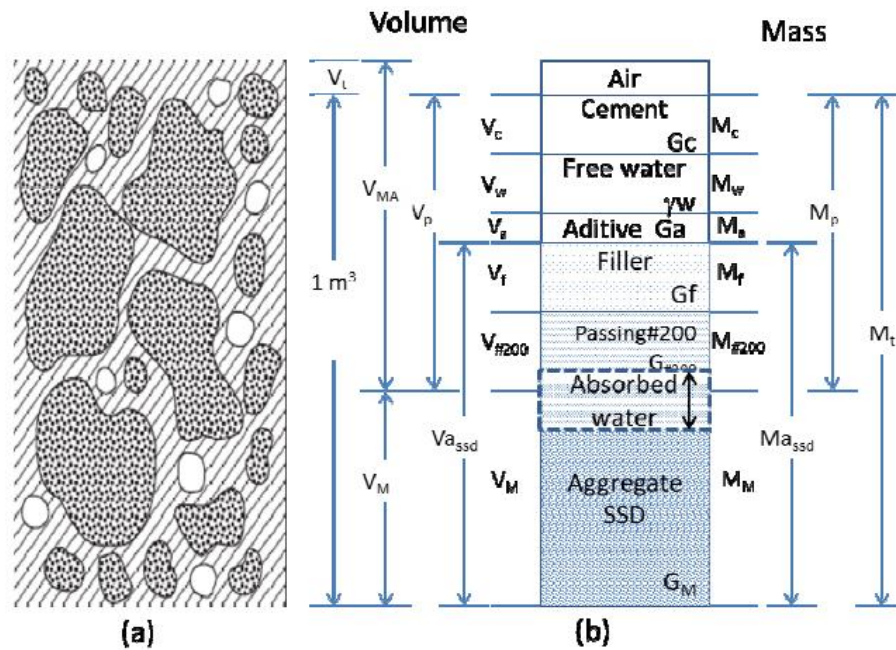
De la Figura 1.1, se desprenden igualmente las siguientes relaciones:

$$\text{Masa Unitaria} = U_W = \frac{M_t}{\text{Volumen Total}} = \frac{M_t}{1 + V_t}$$

$$\%Pasta_{masa} = P_p = \frac{M_p}{\text{Masa total}}$$

Agrupando y combinando las demás relaciones que se pueden derivar de la Figura 1.1, se logran obtener tres funciones para la masa unitaria $U_W = f(P_p)$:

$$U_W = \frac{(1 - \%V_t)}{\frac{(1 - P_p)}{G_M} + \frac{P_p}{G_p}} \quad U_W = \frac{(1 - \%V_{MA})}{(1 - P_p)} \cdot G_M \quad U_W = \frac{\%V_F}{\frac{P_p}{G_p} + \frac{\%V_F}{G_M} \cdot (1 - P_p)}$$



| | | |
|---|--|---|
| V_i = vacíos totales | V_{MA} = vacíos agregado mineral | $\% V_f$ = vacíos llenados = V_p/VMA |
| $V_M; M_M$ = volumen y masa mineral | $V_p; M_p$ = volumen y masa de pasta | $V_{a_{ssd}}; M_{a_{ssd}}$ = volumen y masa de agregado, saturado con superficie seca (incluye el Filler) |
| $V_c; M_c$ = volumen y masa de cemento | $V_w; M_w$ = volumen y masa de agua libre | $V_a; M_a$ = volumen y masa de aditivo |
| $V_f; M_f$ = volumen y masa de suplemento mineral | $V_{\#200}; M_{\#200}$ = volumen y masa pasa #200 | M_t = Masa total |
| $1+V_t$ = volumen total | G_i = masas específicas de cada componente = M_i/V_i | G_{SSD} = masa específica de agregados compuestos (Saturados con Superficie Seca) |

Figura 1.1- Diagrama de fase del RCC.

Fuente: Feo, Luis. E, 2015 “*Método Racional de Diseño para Mezclas de RCC*”. Artículo de “4ta Conferencia Internacional GeoChina”, Shandong, China, 2016.

Si estas funciones son graficadas en el plano $U_w - P_p$ para los valores máximos y mínimos de las propiedades de vacíos ya mencionados, se logra obtener un polígono de vacíos. Donde la “cantidad óptima” de masa por unidad de volumen (U_w) será el centroide del polígono resultante, considerando que pueden existir 9 combinaciones posibles de los 10 vértices reflejados en la Figura 1.2.

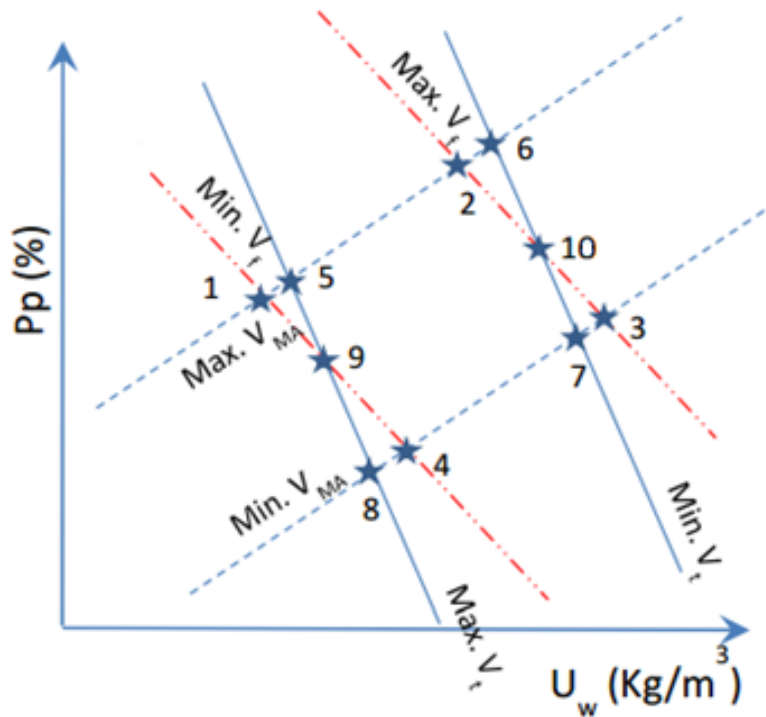


Figura 1.2- Polígono de Vacíos.

Fuente: Sánchez-Leal, F. 2010. “Manual Digital Seminario Suelos y Mezclas Asfálticas”, RAMCODES. Supertraining RAMCODES 2010. Barquisimeto, Venezuela.

La calidad de la pasta a su vez, debe responder a las propiedades mecánicas que se espera que presente la mezcla; para ello se hace uso de la relación agua/cemento ($\alpha=w/c'$) y la resistencia a la compresión ($f'c$), reflejada en una curva del *American Concrete Institute* ACI 207.5R-11 “Resorte del RCC” (Figura 1.3).

El proceso de cálculo comienza con la selección del agregado a usar y una resistencia de diseño, con la cual se entra en la curva de la Figura 1.3 para conocer la relación $\alpha=w/c'$. Se procede a realizar ajustes por tipos de agregados y cemento, recalculando una nueva dosis.

Para realizar el ajuste por las propiedades de los finos, es necesario estimar un %Pasta inicial, con lo que se realiza todo el proceso y se obtiene cantidad óptima, entrando en un ciclo iterativo hasta que el %Pasta estimado sea igual al %Pasta calculado.

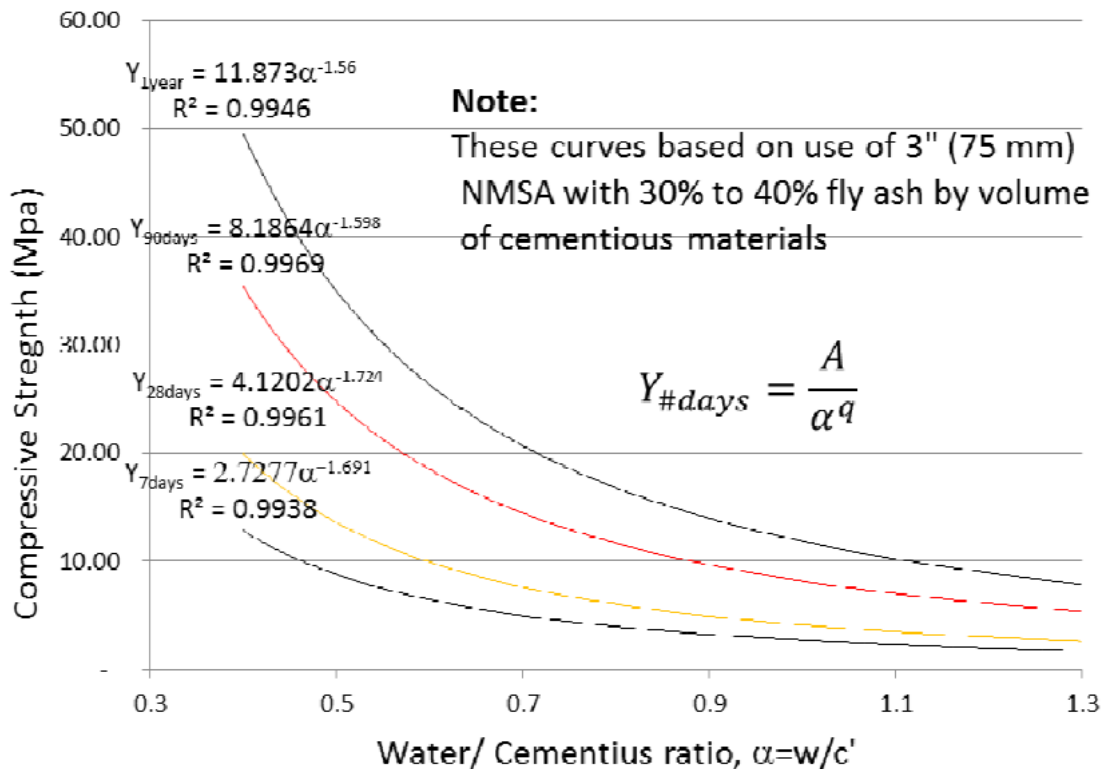


Figura 1.3- Curvas de Relación agua/cemento (w/c') vs. Resistencia a la Compresión ($f'c$) para distintas edades.

Fuente: 207.5R-11 "Report on Roller-Compacted Mass Concrete", ACI Committee 207, USA, 2011.

Para esta curva no se especifica el grado de compactación a la cual fueron sometidas las muestras, mas sí hace referencia al ensayo ASTM C-1435 (Martillo Vibrador) para la confección de las probetas. Por lo que se asume correcta esa relación para los parámetros de vacíos establecidos en el modelo. Sin embargo, hace falta corroborar dicha consideración.

1.2- Antecedentes

Actualmente, la Universidad Católica Andrés Bello no cuenta con Trabajos Especiales de Grado basados en ensayos con mezclas de RCC o en el diseño de la misma, por lo cual se recurrió a la búsqueda de proyectos realizados en otros países, que a pesar de no presentar una relación estrecha con un modelo de cálculo racional para realizar el diseño de mezcla, servirán de apoyo para llevar a cabo el presente proyecto.

Por su parte, en Venezuela sólo existe una obra realizada con RCC y es la presa de El Guapo en el Estado Miranda. Adicional a ello, se encuentra en construcción la presa de Cuira en la misma entidad, también con este material.

Ambos procesos de diseño se hicieron sin contar con un método racional, sino bajo instrucciones de asesores expertos en el tema. De estas primeras experiencias el diseño de mezcla fue exitoso, lo que motivó a consolidar el método racional de cálculo.

1.3- Objetivo General

Analizar el método racional de cálculo de diseño de mezclas de RCC, evaluando el comportamiento mecánico de probetas cilíndricas.

1.4- Objetivos Específicos

- Evaluar el comportamiento mecánico de probetas cilíndricas de RCC, sobre la base de su resistencia a la compresión ($f'c$), con variación de relación agua/cemento ($\alpha=a/c'$).
- Validar el uso de la curva Resistencia a la Compresión vs Relación a/c' tomada de la guía 207.5R.11 publicada por ACI (American Concrete Institute, 2011), u obtener una relación equivalente.

1.5- Alcances

En esta investigación se elaborará una curva Resistencia a la Compresión vs. Relación Agua/Cemento ($f'c$ vs. a/c'), que valide su utilización en el diseño de mezclas RCC propuesto por el Ing. Luis Eloy Feo.

Para el desarrollo de este trabajo se realizaron probetas cilíndricas con una sección transversal de radio 15 cm y una altura igual a 30 cm, las cuales cumplen con parámetros ya establecidos en el modelo de cálculo; estos son: un nivel de energía fijo, adaptado a la norma ASTM C1557 (Proctor Modificado), y control de vacíos en las probetas.

1.6- Limitaciones

La dificultad principal que se tuvo fue el tiempo de curado de la mezcla. Pues la curva correspondiente a 365 días de curado, no fue incluida en el Trabajo Especial de Grado por no disponer del tiempo suficiente. Es por ello que se tomó la decisión de realizar la curva para 56 días de curado, aunque ésta no se encuentre en el ACI 207.5R.11. Sin embargo, las probetas para 365 días fueron preparadas igualmente para que al transcurrir el lapso requerido sean ensayados

En el artículo de Luis Eloy Feo se especifica que es necesario el ajuste de variables externas que afectan la producción y el resultado final de la mezcla de RCC, siendo éstas el tiempo máximo en el cual puede ser trabajada una mezcla luego de combinados sus componentes, y el control de las condiciones de humedad y temperatura a las que se realizan las mezclas de diseño.

El nivel de energía de compactación y medición de densidades fueron fijadas según las recomendaciones realizadas por Ernest Schrader, en la Presa de Cuira (2013). Por su parte, la humedad de la mezcla fue fijada cercana a la de los agregados, entre +0,5% y +1,5% de la humedad óptima del ensayo Proctor Modificado, ASTM D-1557.

Adicionalmente, se deseaba estimar el tiempo VeBe para así validar que los resultados fuesen menores a 45 segundos, como se establece en la guía 207.5r.11 de la ACI. Para corroborar esta afirmación era necesario disponer del equipo consistómetro, el cual no se tuvo y por ello se prescindió de este objetivo. No obstante, la medición de esta característica y su relación con las propiedades de vacío, deja abierta la posibilidad de futuras investigaciones.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1- Concepto

El Concreto Compactado con Rodillo (RCC por sus siglas en inglés) es una mezcla de concreto de consistencia seca, asentamiento nulo y bajo contenido de pasta, que se coloca de forma continua y se compacta usando un rodillo, que suele ser vibratorio. Esta mezcla debe cumplir con una humedad adecuada que permita la operación de los equipos de colocación, y a la vez garantice la uniformidad de la pasta dentro de la mezcla.

La rapidez de la puesta en obra, el relativamente bajo contenido de cemento y la utilización de aditivos minerales, explican el motivo por el cual este material es económicamente interesante para la industria de la construcción.

2.2- Precedente Histórico

Su origen como material se remonta a fines del Siglo XIX, donde los antecedentes internacionales señalan que éste se utilizó por primera vez en Estados Unidos en 1893. Sin embargo, no incursionó en la construcción de pavimentos hasta 1930 y 1940, teniendo lugar en Suecia y Estados Unidos, respectivamente.

En presas, la primera colocación de RCC fue entre los años de 1960 y 1961, en la ejecución del núcleo de la ataguía de la presa de Shihmen, Taiwán. Con una cantidad de cemento más puzolana, en partes iguales, entre 107 y 120 kg/m³. Paralelamente en el año 1961, se utilizó en la construcción del paramento aguas arriba cubierto con láminas metálicas de la presa Alpe Gera, en Italia. En 1962 se introduce el término “rollcrete” por J. Lowe III, en la Conferencia de la ASCE en Omaha, Nebraska.

Por varios años, se fue utilizando esta técnica en ciertas zonas de presas, llegando a reemplazar protecciones de enrocados y vertederos. Sin embargo, no fue hasta el año 1984 cuando se culmina la Presa de Willow Creek, USA. Con 51 metros de altura se convertía en la primera presa construida en su totalidad con RCC. NMSA 76 mm, 4% a 10% de pasante por el tamiz N° 200, capas de 25 cm a 35 cm compactadas con rodillo vibratorio y una

cantidad mínima cementante de 66 kg/m^3 con 30% de ceniza volante. Se llegó a la cantidad de 315.000 m^3 de RCC.

En Sudamérica el país pionero fue Brasil, donde se construyó la Presa de Saco De Nova Olinda en el año 1986, la cual cuenta con 138.000 m^3 de RCC que fueron colocados en 110 días, con una cantidad de cemento proporcional a 70 kg/m^3 .

Al año siguiente se construyó en Argentina la Presa de Urugua-í, con una altura de 78 m y 600.000 m^3 de RCC colocados en 270 días, cuya mezcla contaba con material cementante de 60 a 90 kg/m^3 , y contó con la incorporación de polvo de roca, entre 6% y 10%.

Los resultados que se obtuvieron de estas experiencias dieron lugar a la expansión mundial de la técnica por su bajo costo y la velocidad de construcción, principalmente, dando pie a nuevas propuestas y criterios de diseños.

2.3- Filosofías de Diseño

2.3.1- Aspectos Generales

Por su naturaleza, este material responde a varios métodos de diseño, basados en dos filosofías o aproximaciones. La Filosofía de Suelos o Geotécnica y la Filosofía de Concreto. Según el método utilizado el tratamiento de los agregados será diferente, por lo tanto las aproximaciones de dosificación de mezclas también lo serán.

Usando la teoría de suelos, se considera el material como un suelo estabilizado con un material cementante, se desarrollan curvas Densidad vs. Humedad con diferentes grados de compactación, se determina el grado de humedad óptima y la densidad máxima teórica. (Alvarado, 2014).

Aplicando métodos de diseño de concreto se toma en cuenta, principalmente, la relación agua/cemento ($\alpha = a/c$); por lo cual se observa que la consistencia de la mezcla es más fluida con respecto a las mezclas fundamentadas en la filosofía de suelos, debido a que existe mayor cantidad de pasta que de áridos.

2.3.2- Filosofía de Suelos

En la filosofía de suelos el RCC es considerado como un suelo procesado o un agregado enriquecido con cemento, cuyo diseño de mezcla se basa en la relación Humedad-Densidad. Para agregados específicos y un contenido de material cementante se deberá determinar el contenido óptimo de humedad para un esfuerzo de compactación en el laboratorio, el cual corresponderá al esfuerzo o densidad aplicable por los rodillos en el campo. Bajo esta filosofía, la pasta (mezcla de cemento, finos y agua) no consigue rellenar todos los vacíos en los agregados, después de realizar la compactación.

Los principios de compactación desarrollados por Ralph R Proctor a inicios de 1930 demuestran que para un esfuerzo de compactación dado existe un contenido óptimo de humedad y por tanto una máxima densidad seca. De igual forma reflejan que al incrementar el esfuerzo de compactación se obtiene una máxima densidad seca (Mayor) y un menor contenido de humedad óptima.

A continuación se muestran curvas de compactación para tres esfuerzos de compactación en un agregado de roca caliza de Austin Texas, siendo el mayor el correspondiente al Proctor Modificado (ASTMD 1557)

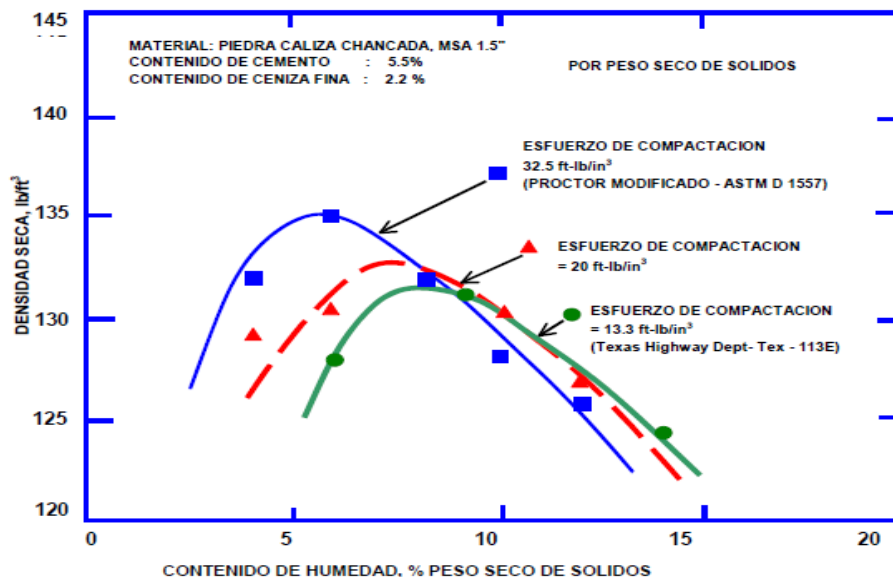


Figura 2.1- Curvas de Laboratorio Humedad-Densidad para mezclas CCR, sujetas a varias energías de compactación.

Fuente: “Diseño de Mezclas de CCR Utilizando Conceptos de Compactación de Suelos”.

Dichos principios son aplicados a las proporciones de mezclas de RCC con aproximación a suelos. Debido a que empíricamente se ha encontrado que el uso racional de los equipos actuales de compactación, usualmente disponibles en la industria, asemejan al nivel de energía del Proctor Modificado, este ensayo tiende a ser la referencia más adecuada para adaptar diseños de RCC en laboratorio. Consiste en la preparación de un material a varios contenidos de humedad, el cual será compactado usando una energía especificada en un recipiente de volumen conocido. El proceso de compactación expulsa el aire de la masa del suelo, reordenando sus partículas a una configuración más densa.

El ensayo de compactación Proctor Modificado utiliza $56.000 \text{ ft-lbf/m}^3$ (2.700 kN-m/m^3) frente a $12.300 \text{ ft-lbf/m}^3$ (600 kN-m/m^3) para el ensayo Proctor Estándar (Terry Arnold, 2010).



Figura 2.2- Equipo utilizado para realizar Proctor Modificado.

Fuente: <http://www.avaluoselsalvador.com/p/laboratorio-de-suelos-y-materiales.html>.

2.3.3- Filosofía de Concreto

La Filosofía del Concreto considera que la mezcla RCC es un verdadero concreto cuya resistencia y otras propiedades siguen la relación Agua-Cemento establecida por Abrams en 1918. Suponiendo agregados resistentes y limpios, la resistencia del concreto completamente consolidado es inversamente proporcional a la relación Agua-Cemento. Usando menos agua con una constante cantidad de cemento, se produce un concreto con mayor resistencia a la compresión y propiedades relacionadas (Alva y Escalaya, 2009).

Esta filosofía se basa en el concepto de que existe suficiente pasta en la mezcla de RCC, la cual rellenará todos los vacíos en el agregado, haciendo que la mezcla se compacte

completamente, produciendo así un concreto con asentamiento nulo. Sin embargo, la mezcla RCC no debe contener un exceso de pasta, ya que esto produciría un asentamiento mensurable o un exceso de pasta en la superficie con sólo algunas pasadas del rodillo vibratorio.

Para determinar el contenido de agua presente en la mezcla se utilizará el Ensayo VeBe (ASTM C1170), con la finalidad de alcanzar el tiempo deseado en el que la pasta empiece a aparecer en la superficie de la mezcla de RCC. Cabe destacar que este ensayo es utilizado para medir la consistencia del concreto, y ésta se mide como el tiempo necesario para que una determinada masa de concreto se consolide por vibración, en un molde de forma cilíndrica. La mesa vibratoria destinada para ello debe operar a una frecuencia y amplitud fija.



Figura 2.3- Equipo utilizado para realizar Ensayo VeBe.
Fuente: <http://proetisa.com/proetisa-productos.php?ID=278>.

El Ensayo VeBe podría ser un posible punto de demarcación entre las dos aproximaciones, ya que las mezclas RCC diseñadas utilizando la aproximación a concreto, tienen un VeBe o tiempo de compactación vibratoria de 45 segundos o menos, mientras que las mezclas resultantes de una aproximación a suelos tienen un tiempo VeBe mayor de 45 segundos

Un tiempo VeBe de 45 segundos indica que hay suficiente pasta para rellenar todos los vacíos de los agregados. Para la mayoría de las mezclas con aproximación a suelos, la mezcla no consolida después de un minuto de vibración.

Tabla 2.1- Factores característicos para las filosofías de RCC (Hansen, K.D., 1991)

| FACTOR | SUELO (GEOTECNIA) | CONCRETO |
|---|---|--|
| Base para el diseño de mezclas | Humedad óptima / Densidad Máxima Seca | Descenso de la relación agua / cemento y la consolidación |
| Características de los vacíos | Todos los vacíos no son rellenados - contactos partícula a partícula | Vacíos rellenados con la pasta y su exceso |
| Porcentaje teórico de la densidad de aire-libre | Usualmente menor que el 98 % | Mayor que el 98% |
| Consistencia (Tiempo VeBe o VC) | 45 segundos o más | 45 segundos o menos |
| Otros Nombres | Rollcrete, relleno estabilizado, suelo cemento de agregado grande, RCC pobre | Método CCR de alta pasta, RCD (Japón) |
| Materiales | Gradado o en bruto (Natural) | Muy bien gradado para minimizar los vacíos |
| Granulometría del agregado, cantidad de finos (Tamiz No. 200) | Superior del 10% del peso total | Menos finos, especialmente si hay gran contenido de ceniza volante |
| Contenido de Cemento + Puzolana | Usualmente menor que 120 kg/m ³ | Mayor que 120 kg/m ³ |
| DISEÑO | | |
| Cohesión | Valores bajos- menores que 200 lb/pulg ² (1,4 Mpa) | Valores altos-mayores que 200 lb/pulg ² (1,4 Mpa) |
| Permeabilidad | Depende del contenido de vacíos en la mezcla y de la construcción (grado de compactación y segregación) | Depende de las propiedades y la cantidad de pasta |
| Resistencia a la compresión | Alto por peso unitario de cemento - mayor en la parte superior de la capa | Decrece con mayor cantidad de agua - mayor en el fondo de la capa |
| Concepto de control de infiltración | Membrana aguas arriba | Presa de gravedad entera |
| CONSTRUCCIÓN | | |
| Mezclado | Comúnmente amasador (pugmill) | Amasador (pugmill) o tambor |
| Tendido | La segregación es más de un problema | La segregación es menos de un problema |
| Compactación | Vibratorio o aplanadora de neumáticos pesada | Rodillo vibratorio |
| Principal acción o rodillo | Compactación | Consolidación |
| Espesor de capas compactadas | Generalmente 0,3 m. Más posibilidad de vacíos en el fondo | 0,3 a 0,75 m, posibilidad de pasta en la superficie y ligera posibilidad de vacíos en el fondo |

2.4- Aplicaciones

El RCC puede ser considerado para su aplicación en áreas donde el concreto con asentamiento nulo puede ser transportado, colocado y compactado utilizando equipos de construcción para movimientos de tierra y enrocados. Los proyectos ideales donde es utilizado el RCC involucran la colocación de grandes áreas de material, con poco o ningún reforzamiento incluido y pocas o ninguna discontinuidad, tales como pilas.

La utilización del RCC debe considerarse cuando sea económicamente competitivo contra otros métodos de construcción. Para grandes trabajos de rellenos, plataformas, pavimentos, fundaciones masivas, bases de losas, ataguías, reparaciones de emergencia y protección superficial para presas y terraplenes. Pero donde mayor uso se le ha dado es en la construcción de presas, puesto que el producto es una presa menos costosa con la misma seguridad de una presa de concreto convencional (U.S Army Corps of Engineers, 2000).

2.5- Ventajas y Desventajas

El RCC fue desarrollado inicialmente para producir un material que presente las propiedades estructurales del concreto con las características de colocación de los materiales de terraplén. El resultado fue un material que, cuando está diseñado y construido correctamente como una estructura de gravedad, debería ser más económico que rellenos de tierra y estructuras de concreto convencionales (U.S Army Corps of Engineers, 2000).

Las ventajas en la construcción de presas RCC son extensas, pero también hay algunas desventajas que deben ser reconocidas. Algunas ventajas se destacan principalmente con ciertos tipos de mezclas, diseños estructurales, métodos de producción, clima, entre otras condiciones. De igual formas ciertas desventajas aplican sólo a condiciones particulares y diseño del sitio. Cada proyecto de RCC debe ser evaluado a fondo, basado en el valor técnico y económico (ACI 207.5R-2011).

Las técnicas de construcción con este material han hecho que las presas de gravedad de RCC sean una alternativa económicamente competitiva, comparada con las presas de concreto convencional y las de materiales sueltos, debido a factores como:

- **Costos:** Los costos históricos de construcción de presas RCC y de concreto convencional demuestran que el costo por metro cúbico de RCC es

considerablemente menor que el de concreto colocado convencionalmente, aproximadamente en el rango de 25 a 50 por ciento menos. La diferencia en el porcentaje de ahorro por lo general depende del costo de los agregados y del material cementante, la complejidad de colocación y la cantidad total de concreto colocado. Los ahorros asociados al RCC son debidos, principalmente, a la disminución en los costos de encofrados, colocación, compactación y la reducción de tiempos de construcción.

- **Rápida Construcción:** La rápida técnica de construcción, comparada con la de presas de concreto y enrocado, y la reducción de la cantidad de materiales representan el mayor ahorro en presas de RCC. El proceso de construcción fomenta una colocación continua de material, ocasionando una velocidad de producción alta. Estas velocidades de producción disminuyen significativamente el periodo de construcción de una presa.

Cuando se compara con una presa de enrocado o una de concreto convencional, el tiempo de construcción de proyectos grandes, se reduce en varios meses o inclusive hasta años.

Otro beneficio de la rápida construcción es la reducción de costos de administración, los beneficios tempranos del proyecto, la posible reducción o supresión de obras de desvío, y el posible uso de la presa en sitios donde la construcción sea limitada por temporadas. Básicamente, la construcción con RCC ofrece ventajas económicas en todos los aspectos con la construcción de la presa que están relacionados con el tiempo (U.S Army Corps of Engineers, 2000).

- **Otras ventajas.** En comparación con las presas de enrocado, el menor volumen de presas de gravedad de RCC hace que los bancos de materiales para la construcción sean menores, y que sea un factor determinante en la selección del sitio. Además, los bancos de materiales son más pequeños y puede ser más ambientalmente aceptable. La presa de gravedad de RCC es de por sí más resistente a la erosión interna y al desbordamiento (U.S Army Corps of Engineers, 2000).

Aunque es casi una rutina para las presas de RCC, diseñadas de manera eficiente, ser la alternativa menos costosa en comparación con otros tipos de presa, hay condiciones que

pueden hacer que el RCC sea más costoso. Éste puede no ser apropiado cuando el material agregado no está convenientemente disponible, la roca de fundación es de mala calidad o no está cerca de la superficie, o cuando las condiciones de fundación pueden conducir a un asentamiento diferencial excesivo (ACI 207.5R-2011).

2.6- Materiales

2.6.1- Aspectos Generales

Una amplia gama de materiales han sido utilizados en la producción de RCC, el método para estudiarlos es similar al utilizado para el concreto convencional. Para la selección de dichos materiales se debe tener en cuenta que éstos afectan significativamente la velocidad de hidratación y el desarrollo de la resistencia. Sin embargo, las limitaciones de materiales de las estructuras de gravedad de RCC frecuentemente son menos exigentes, debido a que existen distintas opciones de calidad de los materiales y de las características de rendimiento posteriores.

2.6.2- Cemento

El Cemento Portland Tipo II es utilizado comúnmente en RCC, debido a sus características de baja generación de calor a edades tempranas y a largo plazo. El uso de Cemento Portland Tipo III no es práctico para RCC, porque acorta el tiempo disponible para la compactación y aumenta la generación de calor a edades tempranas. Baja velocidad en el desarrollo de la resistencia de algunos cementos, da como resultado una mayor resistencia para un determinado contenido de cemento. En cualquier proyecto a desarrollar, el cemento que se debe usar en la realización de mezcla de RCC debe ser de bajo contenido de álcalis, menor al 1%.

2.6.3- Agua

La fuente de agua, sea subterránea o superficial puede tener un efecto significativo sobre el rendimiento del RCC. El requerimiento principal para el agua en estas mezclas es que ésta debe presentar baja cantidad de álcalis, ácidos o material orgánico, debido a que pueden inhibir la adecuada ganancia de resistencia e influir en el tiempo de fraguado.

2.6.4- Agregados

Al igual que para el concreto convencional, una fuente apropiada de agregados es uno de los factores más importantes para determinar la calidad y economía del concreto compactado con rodillo. Sin embargo, en situaciones de emergencia, cuando la baja calidad del agregado no afecte las especificaciones del diseño, o donde las propiedades específicas del material se consigan con el uso de agregados de baja calidad; éstos podrán ser utilizados. Es importante que los cambios con respecto a la clasificación o la calidad sean sustentados por pruebas de laboratorio o de campo.

2.6.4.1- Agregado Grueso: El tamaño máximo nominal del agregado (NMSA) que ha empleado y compactado U.S Army Corps of Engineers (USACE) en la construcción de RCC es de 75 mm (3pulg.). Sin embargo, las clasificaciones pueden variar significativamente de los utilizados para el concreto convencional.

El uso de grandes agregados aumenta enormemente la probabilidad de segregación durante el transporte y esparcimiento y rara vez reduce significativamente el costo. El utilizar un agregado mayor a los 75mm (3pulg.) debe justificarse mediante una investigación, la cual demuestre que el agregado más grande puede ser manejado sin segregación, puede ser compactado, y que su uso en realidad se traducirá en menor costo.

2.6.4.2- Agregado Fino: Cuando se utiliza un bajo contenido de material cementante en el RCC, la cantidad de material necesario que pase la malla N° 200 es mayor que lo aceptable para el concreto convencional. Un mayor porcentaje de finos se utiliza para aumentar el contenido de pasta en la mezcla para llenar los vacíos y contribuir a la trabajabilidad. Los agregados finos se componen generalmente de limos no plásticos de origen natural y finos manufacturados. Aunque el mayor beneficio de la utilización de finos es el control de la segregación, en muchos casos el uso de finos aumenta la demanda de agua, reduciendo así su resistencia.

Debe cuidarse la selección de los agregados con finos plásticos versus no plásticos. Cuando en los agregados existen finos plásticos debe evaluarse los efectos de pérdida de resistencia, demanda de agua, y la durabilidad, ya que determinan la factibilidad de cumplir

los requisitos estructurales de diseño. Cuando se utilizan puzolanas para sustituir los finos naturales, mejora la trabajabilidad, la relación agua/cemento decrece, y la resistencia a largo plazo podría aumentar (U.S Army Corps of Engineers, 2000).

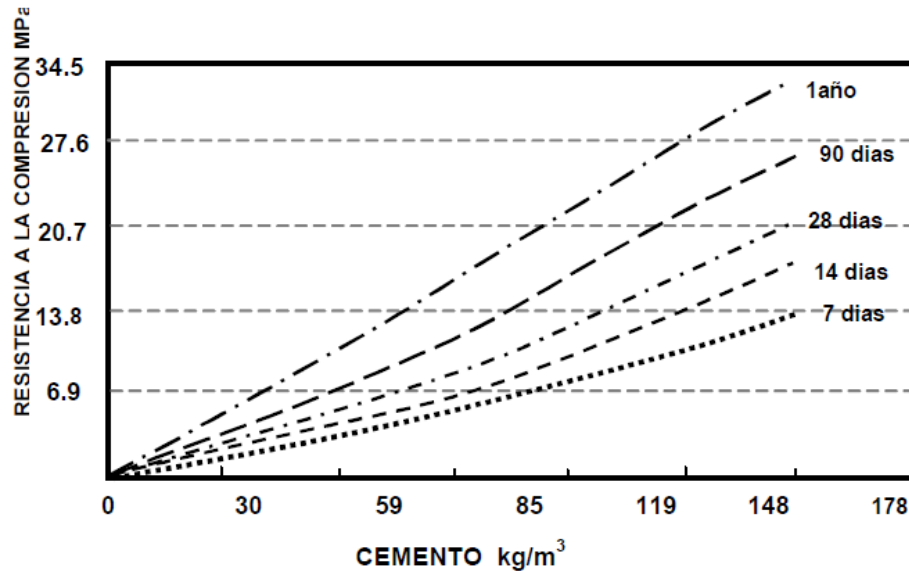


Figura 2.4- Curvas de Resistencia RCC que pueden ser desarrolladas con varias proporciones de cemento para agregados de buena calidad.

Fuente: “ACI 20.5R-9, cit. p. Diseño de Mezclas de RCC Utilizando Conceptos de Compactación de Suelos”.

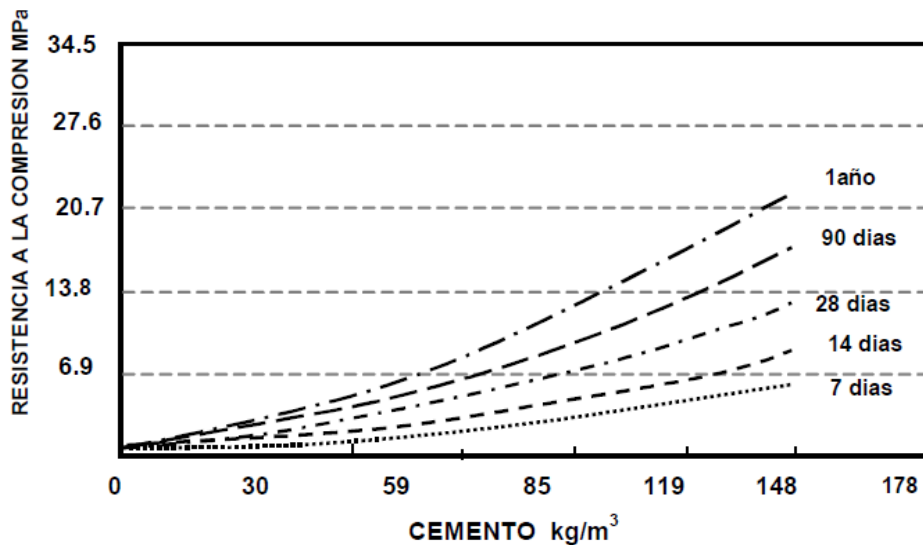


Figura 2.5- Curvas de Resistencia RCC que pueden ser desarrolladas con varias proporciones de cemento para agregados de menor calidad.

Fuente: “ACI 20.5R-9, cit. p. Diseño de Mezclas de RCC Utilizando Conceptos de Compactación de Suelos”.

2.6.5- Aditivos

Los aditivos químicos se han utilizado en las mezclas de RCC para cambiar la configuración de sus propiedades y, en algunos casos, para alterar el contenido de agua. La eficacia de aditivos químicos puede depender de la trabajabilidad de la mezcla, la granulometría de agregados, y el tipo de material cementante. Los aditivos químicos en RCC son comúnmente utilizados para retardar el tiempo de fraguado para reducir las juntas frías y así mejorar la unión entre capas (Wenquanet 1997, cit. p. ACI 207.5R-2011).

Aditivos tipo A (Reductor de agua) ASTM C494, y tipo D (Reductores de agua y retardantes) ASTM C494M; son los aditivos químicos más comúnmente utilizados. Aditivos reductores de agua, utilizados en dosis muy altas, han demostrado reducir la demanda de agua, incrementar la resistencia, retardar el fraguado y promover la trabajabilidad en algunas mezclas RCC (Hopman y Salas 1998, cit. p. ACI 207.5R-2011).

Los aditivos de aire incorporado no son comúnmente usados en mezclas de RCC debido a la dificultad en generar vacíos de aire del tamaño y distribución apropiada cuando la mezcla tiene una consistencia de asentamiento nulo (ACI 207.5R-2011).

2.6.6- Puzolana

Son sustancias naturales o artificiales, que reducidas a polvo y amasadas con cal, proporcionan a ésta propiedades aglutinantes. La selección de puzolana apropiada para el RCC debe basarse en conformidad con la norma ASTM C618 u otra norma aplicable, en su costo y su disponibilidad. En casi todos los proyectos de RCC en los que se ha utilizado puzolana, se ha usado ceniza fina clase F, debido principalmente al efecto de sus partículas esféricas sobre la manejabilidad y compactibilidad (Escalaya, 2006).

El uso de puzolana es bastante común para proyectos de RCC y generalmente reduce costos y baja la generación de calor. Pero es el diseñador quien debe evaluar el material a utilizar para el proyecto y las proporciones adecuadas para la construcción de la presa, según sus especificaciones.

En Venezuela este material no se encuentra disponible debido a la ausencia de volcanes en el país, por lo cual no se tienen depósitos naturales del mismo. Tampoco existen canteras ni hornos industriales de donde se pueda extraer puzolana artificial, y su importación

se traduce en un aumento innecesario del presupuesto, por lo que es común prescindir del material y el presente trabajo no fue la excepción.

2.7- Proporción de Mezcla

2.7.1- Aspectos Generales

Las proporciones de la mezcla de RCC dependen, en gran parte, de los requisitos de resistencia y las exigencias de durabilidad de la estructura, es decir, la vida útil de la presa. Sin embargo, también pueden verse influenciadas por las especificaciones particulares del proyecto tales como la disponibilidad y transporte del material, y los equipos de compactación.

Existen muchos tipos de presas de RCC, y por ende, distintos diseños, ya que éste dependerá de las condiciones y características de cada proyecto. Por lo que sería perjudicial establecer un único diseño de mezcla para todos los casos.

No obstante, se han establecido consideraciones básicas que deben tomarse en cuenta al momento de diseño de la mezcla de RCC, a las cuales se les hace mención en el “Roller-Compacted Concrete EM 1110-2-2006 - U.S Army Corps of Engineers, 2000”.

2.7.2- Consideraciones Básicas

2.7.2.1- Resistencia

En la mayoría de las situaciones, para cualquier combinación de materiales, la resistencia de la mezcla dependerá del contenido de cemento que ésta tenga. Las proporciones necesarias de los materiales deben ser determinados con ensayos previos de laboratorio para estudiar el comportamiento de la mezcla.

Las mezclas con altos contenidos de cemento son usadas para asegurar la estanqueidad de la presa, disminuyendo la permeabilidad y futuras filtraciones. Suelen tener entre 60 kg y 90 kg por 1 m³ de mezcla, más la cantidad de cenizas volantes y retardantes partiendo de 150 kg a 225 kg por 1 m³, traduciéndose en un incremento considerable de los costos que usualmente son requeridos para alcanzar la resistencia deseada.

Por otra parte, las mezclas de bajo contenido de cemento poseen entre 65 kg a 105 kg por m³, sin la necesidad de retardantes o cenizas volantes. Estas mezclas son más económicas, pero suelen tener un módulo de elasticidad mucho más bajo y a su vez alta velocidad de fluencia que reduce las tensiones térmicas.

Como ya se definió anteriormente, la pasta es la combinación de finos (pasante tamiz #200), cemento y agua. Toda mezcla de RCC, aproximadamente, necesita la misma cantidad de pasta. Durante los primeros años de experiencia con RCC, se utilizaban valores entre 18% y 20% del volumen total. Con el paso del tiempo, estos valores se han restringido de 22% a 24%. Sin embargo, para altas cantidades de pasta los problemas de segregación se hacen mayor, y para valores por encima de 21% la eficiencia de los materiales de cementación disminuye; siendo la eficiencia la resistencia a la compresión por cada kg de material cementante. Para bajos contenidos de cemento, se deben agregar finos no plásticos para mantener un adecuado contenido de pasta.

2.7.2.2- Agregados

En comparación con las especificaciones del concreto convencional, para el RCC suelen ser más flexibles. Debe garantizarse resistencia mecánica a la abrasión y erosión del material, así como la sanidad frente a agentes químicos presentes en el agua y estabilidad ante agentes atmosféricos.

Adicionalmente, es importante evaluar la reactividad potencial que pudiese existir entre los componentes químicos del material, silicatos usualmente, y los álcalis del cemento, hidróxidos de sodio y potasio, por lo general. El producto de esta reacción puede originar expansiones dañinas en el concreto, perdiendo sus propiedades mecánicas.

Los métodos estandarizados para determinar la susceptibilidad de esta combinación, comúnmente el ensayo ASTM C-227, no resulta práctico de utilizar por lo extremista que pudiera ser, siendo, o muy lento para obtener resultados confiables, o muy severo eliminando posibles fuentes de material. Hay que considerar que el contenido de cemento es mucho menor en comparación con el concreto convencional,

por lo que se debe ser muy juicioso para decidir la aplicabilidad de estas normas al RCC (U.S Army Corps of Engineers, 2000).

Como se dijo anteriormente, mientras mayor sea el tamaño máximo del material (NMSA), mayor será la probabilidad de segregación durante la manipulación, la extensión y compactación de la mezcla. Se debe procurar el mayor tamaño posible, tomando en consideración esta premisa.

En el caso de los finos no hay limitaciones de cuantía para los no plásticos en el RCC. Hay diseños que poseen finos plásticos hasta 6% de la pasta, valor inadmisibles para concreto convencional, principalmente por el aumento de presupuesto en cemento, por lo que se debe tener un criterio juicioso para esta toma de decisiones.

A estos factores se suma la evaluación del espacio disponible en planta, sabiendo que se debe disminuir las pilas de acopio del material, estudiando el número de materiales individuales que razonablemente se pueden manejar por lotes. Y el estudio de lugares de préstamo en la zona local.

2.7.2.3- Contenido de Agua

Los requisitos aproximados de agua y el contenido de aire atrapado para la mezcla se muestran en la Tabla 2.2 para diversos NMSA. El contenido de agua tabulado es un promedio a partir de mezclas de concreto convencional. La demanda de agua para RCC que contiene una combinación de agregado específico mostrará generalmente poco cambio en un amplio rango de contenidos de material cementante. También se muestra en esta tabla, intervalos aproximados de tiempo VeBe modificados correspondientes a los rangos de los contenidos de agua.

Tabla 2.2- Contenido de agua, arena y aire atrapado, y proporción de mortero por unidad de volumen para varios tamaños máximos.

| | | Tamaño Máximo (NMSA) | | | | | |
|--|------------------|----------------------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|
| | | 19mm | | 50mm | | 75mm | |
| | | Promedio | Rango | Promedio | Rango | Promedio | Rango |
| Agua (Kg/m ³) | VeBe < 30seg | 150 | 133 - 181 | 122 | 107 - 140 | 107 | 85 - 128 |
| | VeBe > 30seg | 134 | 110 - 154 | 119 | 104 - 125 | 100 | 97 - 112 |
| Contenido de Arena (% de Vt) | Arena Triturada | 55 | 49 - 59 | 43 | 32 - 49 | 34 | 29 - 35 |
| | Arena Redondeada | 43 | 38 - 45 | 41 | 35 - 45 | 31 | 27 - 34 |
| Pasta (Vp/Vm) | | 0.41 | 0.27 - 0.55 | 0.41 | 0.31 - 0.56 | 0.44 | 0.33 - 0.59 |
| Aire Atrapado en fracciones de 37.5 mm (%) | | 1.5 | 0.1 - 4.2 | 1.1 | 0.2 - 4.1 | 1.1 | 0.5 - 3.3 |

Fuente: "Roller-Compacted Concrete EM 1110-2-2006 (2011)".

2.7.2.4- Durabilidad

Todos los componentes de la mezcla juegan un papel importante en esta consideración. Utilizando agregados densos con una cantidad apropiada de cemento, el RCC tendrá una excelente resistencia a la abrasión y la erosión, a las reacciones entre álcalis y agregados, y a la presencia de sulfatos.

Sin embargo, la resistencia de RCC a los efectos de aguas agresivas, productos químicos, gases o sencilla lixiviación de los componentes solubles de agua, es principalmente una función de permeabilidad del concreto y, como las mezclas de RCC están diseñadas con bajo contenido de cemento, son relativamente permeables (U.S Army Corps of Engineers, 2000).

2.7.2.5- Trabajabilidad

Un paso crítico en el diseño de mezclas de RCC es establecer el nivel deseado de trabajabilidad del RCC. Ésta es la propiedad que determina la capacidad del RCC para ser colocado y compactado con éxito sin segregación perjudicial. Se ve afectada por los mismos factores que afectan a la trabajabilidad del concreto convencional y se incorporan los conceptos de compactibilidad, maleabilidad y cohesión.

Distintamente el efecto de cada factor no será el mismo para el RCC, por lo que la trabajabilidad no puede ser medida, por ejemplo, en función del ensayo de asentamiento. Éste no es significativo para el RCC, ya que una mezcla hecha correctamente el valor de asentamiento es nulo.

Por encima de todo, la principal característica que se debe considerar es la capacidad de la mezcla para garantizar la unión intercapas, dado que debe haber uniformidad y completa adherencia.

Para las mezclas más viables, la consistencia de la misma puede ser medida usando un aparato de VeBe modificado. En los antecedentes estudiados por el Cuerpo de Ingenieros se evidencia que se han utilizado mezclas de RCC con consistencias VeBe que van desde aproximadamente 12 a 25 segundos. No obstante, también hay las que superan los 30 segundos y poseen un alto rendimiento.

Para pruebas de pequeña escala, un rodillo de empuje manual es útil para evaluar la viabilidad de mezcla. En tramos de prueba de mayor magnitud e importancia, se requiere el uso de transporte de tamaño completo y el equipo de compactación. Las áreas de prueba deben ser lo suficientemente grande para acomodar el equipo de tamaño completo y para que la operación se estabilice. Las proporciones de mezcla se pueden ajustar entonces aún más, si es necesario, y, los tiempos de VeBe modificados finales pueden ser establecidos para controlar la producción de RCC (U.S Army Corps of Engineers, 2000).

2.7.2.6- Generación de Calor

No menos importante, a esta consideración ya se le hizo mención anteriormente cuando se explicó el por qué del uso de Cemento Portland Tipo II.

También llamado calor de hidratación, no es más que el calor generado por la reacción química entre el agua y el cemento. En estructuras de grandes volúmenes, como lo es una Presa, si este calor no se disipa rápidamente, puede ocurrir un aumento considerable de la temperatura del RCC. Este aumento de temperatura puede ser perjudicial, pues después del endurecimiento a altas temperaturas, el enfriamiento no

uniforme de la masa de concreto hasta la temperatura ambiente puede crear tensiones de tracción indeseables.

Las temperaturas de colocación, que se espera que afecten las propiedades fresco y endurecido de la mezcla de RCC, se deben tomar en consideración tanto como sea posible durante los estudios de dosificación mezcla.

2.8- Preparación de Muestras

Hay numerosos métodos para la preparación de los cilindros de RCC en fase de laboratorio, que han demostrado ser representativos de las condiciones reales de colocación sobre el terreno. Los procedimientos de preparación que se han utilizado incluyen los instrumentos y herramientas necesarias para su ejecución. La eficacia de los diferentes métodos varía dependiendo de la trabajabilidad de la mezcla de RCC.

La eficacia de cada método, representado como un porcentaje de la resistencia máxima alcanzable, en el rango aproximado de contenido de humedad se muestra en la siguiente figura:

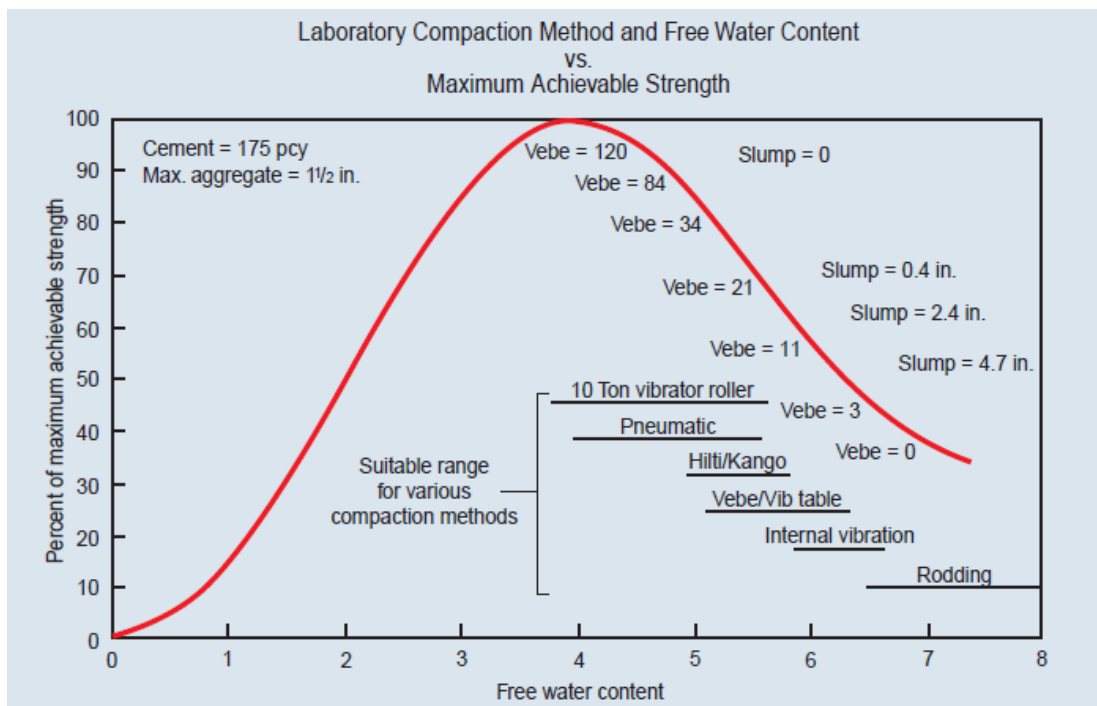


Figura 2.6- Método de preparación de cilindros vs Trabajabilidad relativa..

Fuente: “Roller-Compacted Concrete Density: Principles and Practice”. Water Resources. Arnold, Terry

Debe tenerse en cuenta que la curva anterior se basa en las definiciones de concreto convencional utilizando el contenido de agua libre, es decir, el contenido de humedad sin incluir el agua absorbida del agregado. El contenido real de agua será más alto cuando ésta sea incluida.

Sin embargo, de los métodos de confección de cilindros sólo se encuentran estandarizados dos, ASTM C 1435, martillo vibrador, y ASTM C 1176, la mesa vibratoria. Ambos métodos carecen de un patrón de energía de compactación que los unifique

Para fines de este Trabajo Especial de Grado, los cilindros de RCC a ser ensayados se elaboraron de acuerdo al primer caso, “ASTM C1435-99, Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer”, procedimiento descrito más adelante en el Capítulo III.

2.9- Energía de Compactación

Esta energía debe ser una representación totalmente equivalente a la que sería aplicada en campo, dependiendo únicamente de los equipos usualmente utilizados para la compactación. Por lo que no puede ser tomada a la ligera.

Se debe considerar igualmente que un exceso de energía en la compactación de geomateriales puede fatigar el material. La energía mayormente usada y más conocida al momento de compactación en suelos, es la correspondiente al ensayo Proctor Modificado, ASTM D1557. Ésta es caracterizada por la aplicación de un valor de 2.700 kN-m/m³, o en términos de masa, 275.510 kg-m/m³ ± 5.900 kg/m/m³.

Es recomendable ajustar la energía de confección de las probetas de ensayos a un nivel de energía equivalente al mencionado. Dependerá del tipo de instrumento que se disponga y requiere el conocimiento de la masa, frecuencia y amplitud de impactos del mismo, quedando pendiente establecer la cantidad de capas y el tiempo de compactación de cada capa.

2.10- Control de Calidad

Teóricamente el porcentaje de pasta no debe cambiar luego de ser calculado el valor óptimo del mismo. Sin embargo, el valor de la densidad si pudiera cambiar; la coordenada horizontal del polígono de vacíos se refiere a la densidad de la probeta una vez compactada, y en consecuencia, con vacíos.

Para cada %Pasta existe un polígono, y las fórmulas para su construcción dependen directamente del %Pasta asumido y la relación agua/cemento. Básicamente, se trata de una herramienta gráfica que ayuda a explicar cómo interactúan las variables.

Luego de haber sido compactadas las probetas, se deben satisfacer los porcentajes de vacíos: V_t , V_{AM} y V_F . Este último parámetro, V_F , es un concepto aplicado en el ligante asfáltico, y aun no se le ha encontrado sentido en el RCC.

Es por ello que se requiere conocer la Densidad Máxima Teórica (DMT) de la mezcla una vez preparada, para verificar estos factores. Los expertos en RCC han apuntado por el uso del presurímetro (ASTM C231-14) para hallar la DMT. En este caso la variable conocida es el volumen (Tamaño de la olla) y se determinan los vacíos atrapados, sin embargo es un ensayo complejo que aún requiere de adaptación para su uso.

Se ha planteado el ensayo Rice (ASTM D-2041), realizándose en estado suelto del RCC. Realmente es un ensayo diseñado para asfalto, y es tan riguroso el control de la energía utilizada que hasta la densidad del bloque de madera donde se realiza está especificada. La formulación del mismo está basada en el ligante asfáltico, por lo que se desconocen las limitaciones que pudiera tener para el RCC.

Hasta la fecha no existe un proceso normalizado para determinar la DMT de las mezclas RCC, siendo requerida la adaptación de ensayos ya existentes para la estandarización de los mismos. Y de esta manera, poder determinar exactamente la DMT de cada diseño, o mezcla, sin depender de los pesos específicos de los materiales y dosificaciones que pueden variar entre diseño.

En relación a la medición de densidad in situ, es relevante mencionar que recientemente se aprobó la norma ASTM D-7698 (2011) para el uso de “Electrical Density Gauge” en geomateriales. La gran desventaja que tiene, en el caso de control de calidad de movimiento de tierras, es que requiere ser calibrado para cada fuente o sitio de préstamo, y

eso ocurre en forma impredecible en los trabajos de movimiento de tierras. En el caso de RCC, esta desventaja se anula porque sólo se calibraría esporádicamente, al cambiar un diseño o una fuente de agregado. No obstante, la precisión de este ensayo es igual o con gran similitud al Densímetro Nuclear, también utilizado para medir la densidad en mezclas in situ.

2.11- Precedentes Nacionales

2.11.1- Presa El Guapo

En Venezuela se ha tenido poca experiencia con este tipo de mezcla, y la única infraestructura realizada con RCC es la Presa de El Guapo, donde se utilizó este material para la reconstrucción de la misma, luego que su aliviadero fallara por las fuertes lluvias de Diciembre de 1999.

Ingeniería Geotécnica Prego C.A., dirigida por los Ingenieros Juan Manuel Holmquist y Luis Eloy Feo, es contratada por el Consorcio Camargo-Correa (Brasil), para la evaluación final de los sitios de préstamos, el diseño definitivo de la mezcla de RCC para fines constructivos y para el control de calidad durante la fase ejecutoria.

Para aquel entonces, en Venezuela no existía experiencia práctica en el uso de RCC. Sin embargo, ya para 2003 había 47 presas en Brasil hechas con RCC, llegando a un volumen 9.000.000 m³ de material colocado.



Figura 2.7- Falla del aliviadero de La Presa de Tierra El Guapo (1999).

Fuente: <http://www.rescate.com/guapo.html>.

La mezcla fue elaborada con una humedad total de aproximadamente 7%, y las características de los materiales para el diseño fueron:

- Cemento: Portland Tipo II de la fábrica Cemex de Venezuela, con bajo contenido de álcalis (contenido máximo permitido 1%), y la temperatura en los lugares de almacenamiento no sería superior de 75°C.
- Agregado: Gravas y arenas tamizados, lavados total o parcialmente, en condiciones de saturación con superficie seca y en proporciones que satisfacen los requisitos granulométricos del proyecto.
- Agua de mezcla: Fresca, limpia y libre de contenidos dañinos como aguas negras, aceite, ácidos, álcalis, mica, sales, materia orgánica, u otras sustancias nocivas. El agua mineral reúne los requisitos químicos estándar de la norma ASTM C94.

Tabla 2.3- Parámetros de Mezcla de Presa El Guapo (2006)

| Mezcla | Uso Primario | Tamaño Máximo del Agregado (mm) | Cemento Tipo II o I-II (kg) | Agua (kg) | Agregados (kg) |
|--------|---|---------------------------------|-----------------------------|-----------|----------------|
| 1 | En la Presa y la ataguía aguas abajo de RCC (7 Mpa, Resistencia a la compresión a los 90 días) | 51 o 63 | 75 | 106 | 2200 |
| 2 | En las dos capas superiores a la Presa o donde lo indique el MARN (15 Mpa, Resistencia a la compresión a los 90 días) | 51 o 63 | 120 | 115 | P21150 |

Fuente: Cortesía Ingeniería Geotécnica Prego C.A.

Los límites de la curva granulométrica de los agregados utilizados fueron los siguientes:

Tabla 2.4- Bandas límites de Curva Granulométrica utilizada (El Guapo)

| Tamiz U.S. Standard | | %Pasante (En peso, lavado) | | |
|---------------------|--------------|-------------------------------|----------|--------|
| | | Combinado | +13 mm | -20 mm |
| 76 mm | 3 pulgadas | 100 | 100 | |
| 63 mm | 2 ½ pulgadas | 99 – 100 | 98 – 100 | |
| 51 mm | 2 pulgadas | 95 – 100 | 85 – 100 | |
| 38 mm | 1 ½ pulgadas | 87 – 96 | 60 – 87 | |
| 25 mm | 1 pulgada | 71 – 87 | 10 – 54 | 100 |
| 20 mm | ¾ pulgada | 62 – 80 | 0 – 28 | 98-100 |
| 13 mm | ½ pulgada | 51 – 67 | 0 – 2 | 75-95 |
| 9.5 mm | 3/8 pulgada | 44 – 58 | | 65-85 |
| 4.75 mm | #4 | 34 – 46 | | 50-68 |
| 2.36 mm | #8 | 27 – 37 | | 40-55 |
| 1.18 mm | #16 | 20 – 29 | | 30-43 |
| 0.60 mm | #30 | 14 – 22 | | 21-33 |
| 0.30 mm | #50 | 9 – 16 | | 14-24 |
| 0.15 mm | #100 | 6 – 11 | | 9-16 |
| 0.075 mm | #200 | 2* - 7* | | 3*-10* |

Fuente: Cortesía Ingeniería Geotécnica Prego. C.A.

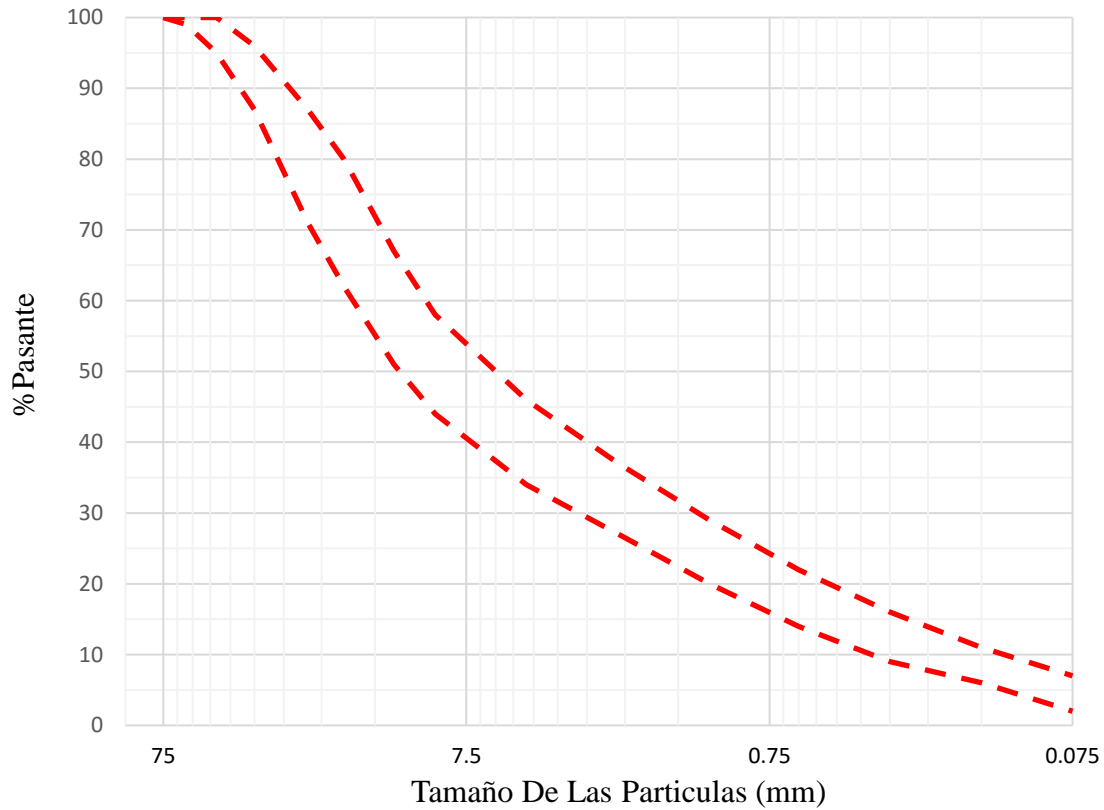


Figura 2.8- Bandas Granulométricas de los agregados para mezcla RCC.
Fuente: Cortesía Ingeniería Geotécnica Prego. C.A.

Para la confección de las probetas de ensayo se usaron los equipos disponibles en el momento:

- Compresor SULLIVAN
- Compactadora KAWASAKI KPT-5
- Moldes rígidos para toma de cilindros de concreto convencional.



Figura 2.9- Reconstrucción de Presa El Guapo con RCC (2007).
Fuente: <http://hernandezfoto.zenfolio.com/p262298640/h640A001D#h653ead36>

2.11.2- Presa de Cuira

Hasta Mayo de 2015 la empresa Ingeniería Geotécnica Prego C.A. participó en el diseño de mezcla RCC para la Presa Cuira, ubicada en el Estado Miranda, la cual tendrá una altura máxima de 135 m y un volumen estimado de RCC cercano a 1.000.000 m³.

Los aspectos deseados al realizar cada una de las probetas:

- Buen aspecto y clara unión entre capas.
- Resistencia mínima de 7 Mpa en compresión a los 7 días.
- Densidad mínima de 96% de la DMT.
- Buen tiempo de fraguado inicial y final.

La granulometría debía cumplir con lo indicado en la Tabla 2.5:

Tabla 2.5- Bandas límites de Curva Granulometría (Cuira)

| Malla (Apertura) | %Pasante min. | %Pasante máx. |
|-------------------|---------------|---------------|
| 50 mm (2") | 100 | 100 |
| 37,5 mm (1 1/2") | 86 | 96 |
| 25 mm (1") | 75 | 85 |
| 19 mm (3/4") | 67 | 77 |
| 12,5 mm (1/2") | 58 | 68 |
| 9,5 mm (3/8") | 53 | 63 |
| 6,25 mm (1/4") | 46 | 57 |
| 4,75 mm (No.4) | 41 | 51 |
| 2,36 mm (No.8) | 31 | 41 |
| 1,18 mm (No.16) | 24 | 34 |
| 0,600 mm (No.30) | 18 | 28 |
| 0,300 mm (No.50) | 13 | 23 |
| 0,150 mm (No.100) | 9 | 19 |
| 0,075 mm (No.200) | 8 | |

Fuente: Cortesía Ingeniería Geotécnica Prego C.A.

Por medio de la calibración del patrón compactación fue posible determinar el tiempo de compactación preciso para obtener la densidad promedio requerida de la mezcla húmeda (96% de la densidad máxima teórica)

Se concluyó un tiempo de compactación de 17 segundos por capa, con los siguientes equipos:

- Compresor SULLIVAN
- Compactadora S/N de 18 kg
- Moldes rígidos para toma de cilindros de concreto convencional.

A continuación, se presenta una tabla comparativa de las proporciones de los materiales para la mezcla de RCC de la Presa de Cuira en su dosis real y la arrojada por el “Método Racional de Diseño para Mezclas de RCC”:

Tabla 2.6- Dosis de Cálculo vs Dosis Real (Cuira)

| | Dosis de cálculo | Dosis real |
|----------------------------|-------------------|------------------|
| | (por m3) | |
| Grava 1 (SSD) | 588,67 Kg | 587,62 Kg |
| Grava 2 (SSD) | 635,76 Kg | 634,63 Kg |
| Arena triturada (SSD) | 1.130,25 Kg | 1.128,24 Kg |
| Agua | 117,75 Kg | 117,29 Kg |
| Cemento | 75,03 Kg | 80,00 Kg |
| a/c | 1,569 | 1,466 |
| Res. promedio (Mpa) | Predicción | Real |
| 28 días | 7,43 | 7,43 |
| 90 días | 14,13 | 10,23 |
| 180 días | 17,18 | <i>Pendiente</i> |
| 1 año | 20,23 | <i>Pendiente</i> |

Fuente: Feo, Luis. E, 2015 “Método Racional de Diseño para Mezclas de RCC. Artículo de “4ta Conferencia Internacional GeoChina”, Shandong, China, 2016

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1- Enfoque de la Investigación

El enfoque de la investigación fue cuantitativo, debido a que se pretende elaborar la curva Resistencia a la compresión Vs. Relación Agua/Cemento con el fin de validar un método racional de cálculo de diseño de mezclas RCC. Lo cual permitió obtener características, comportamientos y conocimientos. Según Gómez, M (2006): “El enfoque cuantitativo utiliza la recolección y el análisis de datos para contestar preguntas de investigación y probar hipótesis establecidas previamente, y confía en la medición numérica, el conteo, y en el uso de la estadística para intentar establecer con exactitud patrones en una población”. (p.60)

3.2- Tipo de Investigación

El tipo de investigación empleado en el presente proyecto fue de tipo exploratoria, ya que se pretendió validar uno de los instrumentos utilizados dentro del método racional de diseño para mezclas de RCC propuesto.

Los estudios exploratorios se realizan cuando el objetivo es examinar un tema o problema de investigación poco estudiado, del cual se tienen muchas dudas o no se ha abordado antes. Es decir, cuando la revisión de la literatura reveló que tan solo hay guías no investigadas e ideas vagamente relacionadas con el problema de estudio, o bien, si deseamos indagar sobre temas y áreas desde nuevas perspectivas. Baptista, Fernández y Sampieri, 2006 (p.100).

3.3- Diseño de Investigación

La investigación fue de carácter experimental, ya que se alteran variables de forma intencional con la finalidad de analizar sus posibles resultados.

El término experimento se refiere a “un estudio en el que se manipulan intencionalmente una o más variables independientes (supuestas causas-antecedentes), para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes (supuestos efectos-consecuentes), dentro de una situación de control para el investigador” Baptista, Fernández y Sampieri, 2006 (p.160)

Creswell 2005, cit. p. Baptista, Fernández y Sampieri, 2006 (p.160) denomina a los experimentos como estudios de intervención, porque un investigador genera una situación para tratar de explicar cómo afecta a quienes participan en ella en comparación con quienes no lo hacen.

Es indispensable que todo trabajo de investigación finalice en un conjunto de conclusiones y/o recomendaciones que puntualicen, a manera de síntesis, los planteamientos básicos que tuvieron lugar en el transcurso de dicha investigación, con el objeto de transmitir de forma clara los resultados obtenidos y así funcionen como verdaderos aportes teóricos.

3.4- Población y Muestra

La población entendida como “la totalidad del fenómeno a estudiar donde las unidades de población poseen una característica común la cual se estudia y da origen a los datos de la investigación” Tamayo y Tamayo, 1997(p.114); estuvo conformada por sesenta (60) probetas cilíndricas de diámetro 15 cm y altura 30cm.

La muestra “es una parte de la población en estudio, seleccionada de manera que en ella queden representadas las características que distinguen a la población de la que fue tomada” Moreno, 2000. (p.9). En el presente caso la muestra se fraccionó en quince (15) probetas por cada relación agua/cemento, y a su vez en doce (12) para cada edad, lo que significa que se realizaron tres (3) cilindros por cada punto a graficar: dos se ensayaron a compresión, y el tercero fue un testigo en caso de obtener un resultado erróneo.

Para dar origen a las curvas a validar, Resistencia a la compresión Vs. Relación agua/cemento, se realizaron en total 60 cilindros.

A continuación se presenta una tabla en la que se especifica la cantidad de probetas confeccionadas por diseño y por curva realizada:

Tabla 3.1- Muestra de la investigación

| Diseño | D-001 | D-002 | D-003 | D-004 | Total |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| Curva 1 (7 Días) | 3 | 3 | 3 | 3 | 12 |
| Curva 2 (28 Días) | 3 | 3 | 3 | 3 | 12 |
| Curva 3 (56 Días) | 3 | 3 | 3 | 3 | 12 |
| Curva 4 (90 Días) | 3 | 3 | 3 | 3 | 12 |
| Curva 5 (*) (365 Días) | 3 | 3 | 3 | 3 | 12 |
| Sub-total | 15 | 15 | 15 | 15 | 60 |

(*): Los cilindros para esta edad se ensayarán posteriormente y en consecuencia los resultados no entran en este Trabajo Especial de Grado.

3.5- Recolección de Datos

“Las técnicas de recolección de datos son las distintas formas o maneras de obtener la información necesaria para la ejecución del proyecto.” (Arias 1999).

Fue aplicada la técnica de observación directa para la recolección de datos. Mediante una prensa para ensayos a compresión de concreto se obtuvieron los datos de resistencia de cada una de las probetas (32 en total, descontando el testigo en cada caso). Los resultados obtenidos fueron registrados de forma manual en planillas, con la finalidad de recopilar toda la información necesaria para la construcción del gráfico estudiado.

3.6- Equipos y Accesorios Utilizados

- Compresor SULLIVAN.



Figura 3.1- Compresor SULLIVAN.

Fuente: Propia.

- Bailarina TOKU JET-06 (Peso 18 Kg, tasa de impacto de 600 golpes/min y amplitud de impacto 5 ½”, es decir, 140 mm).



Figura 3.2- “Bailarina” TOKU JET-06.

Fuente: Propia.

- Máquina para ensayos de compresión de concreto



Figura 3.3- Compresor Hidráulico.
Fuente: Propia.

- Mezcladora de concreto tipo trompo (Diámetro 850 mm y 910 mm de profundidad).



Figura 3.4- “Trompo” Mezclador.
Fuente: Propia.

- Moldes cilíndricos de altura 30 cm, diámetro 15 cm y volumen 5.301 cm³ aproximadamente (Figura 3.1).



Figura 3.5- Moldes Cilíndricos (“Conchas”).
Fuente: Propia

3.7- Variables

3.7.1- Variables Dependientes

- Resistencia a la compresión ($f'c$)
- Dosis de materiales (kg)
- Densidad Máxima Teórica (DMT)

3.7.2- Variables Independientes

- Relación agua/cemento ($\alpha=a/c$)
- Cantidad de Pasta (%)
- Resistencia del Cemento (kgf)
- Edades de curado (Días)

3.7.3- Parámetros Constantes

- Humedad Óptima de Agregado
- Dimensiones de probetas
- Energía de compactación ($\text{kg}\cdot\text{m}/\text{m}^3$), definida por el equipo seleccionado (Bailarina Toku Jet-06), el número de capas (3) y el Tiempo de compactación (17 seg)

3.8- Materiales Utilizados

- **Agua:** cumple los requisitos de las Especificacion Normalizada para Concreto Premezclado (ASTM C94).
- **Cemento:** Portland tipo II. Resistencia a los 7 días $215 \text{ Kg}/\text{cm}^2$.
- **Agregado:** Se utilizó Granzón proveniente de un préstamo de la Refinería de Puerto La Cruz (Saque Lomar, Anaco), logrando una granulometría intermedia entre las bandas especificadas en la Presa de El Guapo. Peso Específico SSD promedio (material combinado): $2539 \text{ Kg}/\text{m}^3$.

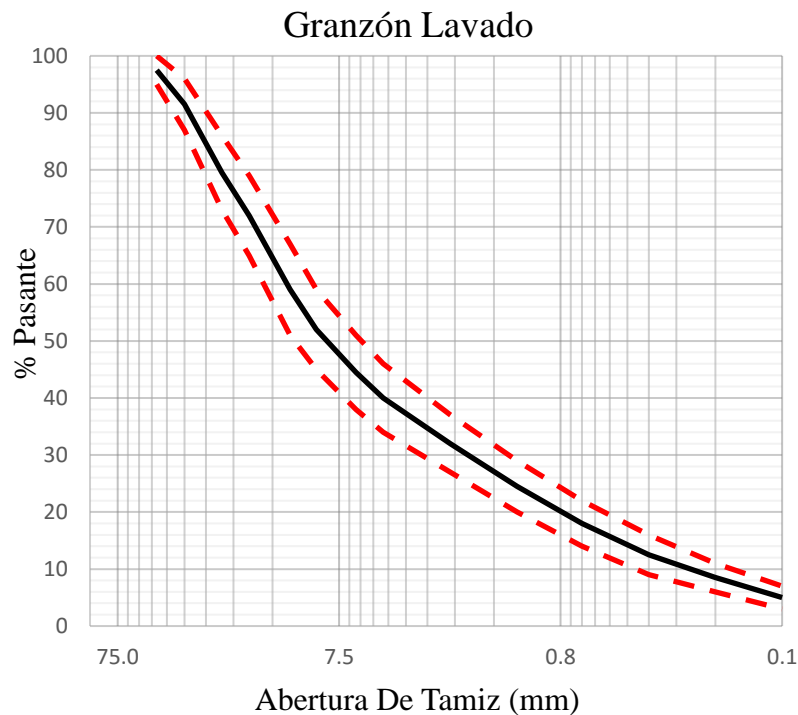


Figura 3.6- Curva Granulométrica usada.
Fuente: Propia

Tabla 3.2- Datos de Curva Granulométrica usada

| Nº Tamiz | Abertura de Tamiz (mm) | Pasante Máximo (%) | Pasante Mínimo (%) | Pasante Promedio (%) |
|----------|------------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| 2" | 50,0 | 95 | 100 | 97,50 |
| 1 1/2" | 37,5 | 87 | 96 | 91,50 |
| 1" | 25,4 | 73 | 86 | 79,50 |
| 3/4" | 19,1 | 65 | 79 | 72,00 |
| 1/4" | 6,3 | 38 | 51 | 44,50 |
| # 4 | 4,75 | 34 | 46 | 40,00 |
| # 8 | 2,36 | 27 | 37 | 32,00 |
| # 16 | 1,18 | 20 | 29 | 24,50 |
| # 30 | 0,6 | 14 | 22 | 18,00 |
| # 50 | 0,3 | 9 | 16 | 12,50 |
| # 100 | 0,15 | 6 | 11 | 8,50 |
| # 200 | 0,075 | 3 | 7 | 5,00 |

3.9- Metodología de Diseño

3.9.1- Calidad de Pasta

Para garantizar las propiedades mecánicas esperadas de la mezcla, la calidad de la pasta se basa fundamentalmente en la resistencia a la compresión y la relación agua/cemento (α). Todo el proceso de cálculo se resume en pocos pasos, incluyendo la combinación de agregados y la selección de la resistencia de diseño. Para esta última, se toma como referencia los parámetros establecidos en la guía ACI 214R-02 “Evaluación de los Resultados de Pruebas de Resistencia del Concreto”, para mayorar la resistencia de diseño respecto a la resistencia nominal, considerando el control de calidad deseado y la fracción defectuosa admisible.

Luego de ser corregida la resistencia de diseño, se entra en la Figura 1.3 en la curva correspondiente, según la edad de diseño, y se despeja un valor inicial de “ α ”. Ésta será

corregida posteriormente por tamaño máximo y tipo de agregado, según las tablas de ajuste del Manual de Concreto Estructural según Norma COVENIN 1753.

Igualmente, las curvas de dicha figura corresponden a valores obtenidos con cemento tipo II. De ser usados otros tipos, se requiere un ajuste considerando una relación proporcional entre las resistencias de los concretos en función de las resistencias de los cementos, medidos éstos en morteros normalizados de acuerdo a la norma ASTM C190/C109M.

Para efectos de este Trabajo Especial de Grado, no fueron necesarios estos procedimientos de ajuste, dado que no se trabajó con resistencias de diseño sino directamente con distintas relaciones α .

Por otra parte, resulta imposible en ciertas ocasiones evitar la presencia de finos plásticos en los agregados, causando una demanda adicional de agua y en consecuencia aumento de la cantidad de cemento. Esta cuantía se incrementa proporcional al porcentaje de pasante del tamiz #200 y al Índice Plástico de éstos, dando un valor máximo admitido de $IP = 25$. Sin embargo, el material usado carece de finos plásticos, siendo innecesaria también esta corrección.

3.9.2- Cantidad de Pasta

Una vez listas estas consideraciones, se parte de un %Pasta asumido y de la relación α establecida para calcular dosificaciones preliminares. A continuación se presentan las ecuaciones utilizadas, siendo las letras de P a V variables auxiliares:

$$G_{cSSD} = \frac{1}{\sum_i^n \frac{\%Agregado}{G_{SSD}(i)}} \quad (1)$$

$$P = \frac{\%Filler + \%Pasante_{\#200}}{(1 + \%Absorción)} \quad (2)$$

$$Q = \frac{1}{G_c} + \frac{\alpha}{\gamma_w} \quad (3)$$

$$R = \alpha + 1 - G_{SSD} * Q \quad (4)$$

$$S = G_{C_{SSD}} * \left(1 + \frac{M_a}{G_a}\right) \quad (5)$$

$$T = M_a + S \quad (6)$$

$$U = S * P + M_a - \%Pasta * T \quad (7)$$

$$V = \%Pasta * R - (\alpha + 1) + G_{C_{SSD}} * Q * P \quad (8)$$

$$M_c = \frac{U}{V} \quad (9)$$

$$V_{a_{SSD}} = 1 - M_c * Q - \frac{M_a}{G_a} \quad (10)$$

$$M_{a_{SSD}} = V_{a_{SSD}} * G_{C_{SSD}} \quad (11)$$

$$M_w = M_c * \alpha \quad (12)$$

$$M_{Filler} = \%Filler * M_{a_{SSD}} \quad (13)$$

$$M_{\#200} = \frac{\%Pasante_{\#200}}{(1 + \%Abs)} * M_{a_{SSD}} \quad (14)$$

El material trabajado fue único, es decir, no fue combinado con ningún otro material, en consecuencia la ecuación N°1 es simplemente el peso específico del mismo: 2539 Kg/m³. Para este trabajo se prescindió del uso de llenante (filler) y aditivos, anulando cualquier intervención en las fórmulas anteriores.

Continuando con el método racional, se procede a calcular los siguientes parámetros:

$$DMT = \frac{M_T}{1m^3} = \frac{M_c + M_w + M_{a_{SSD}}}{1m^3} \quad (15)$$

$$G_p = \frac{\%Pasta * DMT}{\left(\frac{M_c}{G_c} + \frac{M_w}{\gamma_w} + \frac{M_{\#200}}{G_{\#200}}\right)} \quad (16)$$

$$G_M = \frac{DMT * (1 - \%Pasta)}{\left(1 - \frac{\%Pasta * DMT}{G_p}\right)} \quad (17)$$

Del Capítulo I, se recogen las siguientes fórmulas:

$$\%V_t = \frac{V_t}{1 + V_t} \quad (18)$$

$$\%V_{AM} = \frac{V_{AM}}{1 + V_t} \quad (19)$$

$$\%V_F = 1 - \frac{V_t}{V_{AM}} \quad (20)$$

Tabla 3.3 – Especificaciones de Vacíos (Cuira)

| | Vacíos Totales (V_T) | Vacíos en Agregado Mineral (V_{AM}) | Vacíos llenados con Pasta (V_F) |
|--------|--------------------------|---|-------------------------------------|
| Mínimo | 1% | 22% | 81,8% |
| Máximo | 4% | 24% | 95,8% |

Tal como se definió en el mismo capítulo, combinando y agrupando desde la ecuación 15 hasta la 20, se obtienen las tres funciones para la masa unitaria:

$$U_w = \frac{(1 - \%V_t)}{\frac{(1 - P_p)}{G_M} + \frac{P_p}{G_p}} \quad (21)$$

$$U_w = \frac{(1 - \%V_{MA})}{(1 - P_p)} \cdot G_M \quad (22)$$

$$U_W = \frac{\%V_F}{\frac{P_p}{G_p} + \frac{\%V_F}{G_M} \cdot (1 - P_p)} \quad (23)$$

De esta manera se obtienen los diez vértices del polígono de vacíos de la figura 1.2, creando hasta nueve posibles combinaciones. En la siguiente tabla, se muestran todas las posibilidades:

Tabla 3.4- Combinaciones de Vértices Posibles

| # | Query ^a | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX |
|---------------------------------|--------------------|---------------|----------------------|----------------|-------------|-------------|---------------|----------------|-------------|-------------|
| 1 | $U_{w5} > U_{w1}$ | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | X | X |
| 2 | $U_{w2} > U_{w6}$ | X | X | ✓ | X | ✓ | X | X | ✓ | X |
| 3 | $U_{w7} > U_{w3}$ | X | X | X | ✓ | X | X | ✓ | X | ✓ |
| 4 | $U_{w8} > U_{w4}$ | X | X | X | ✓ | ✓ | ✓ | X | X | X |
| Vértices que forman el polígono | | 1,2,9, 7,4 | 5,2,9, 7,4,1 0 | 5,6,7, 4,10 | 5,2, 3,8 | 5,6,7, 8 | 5,2,9, 7,8 | 5,2,3, 4,10 | 1,6,7, 4 | 1,2,3, 4 |

Fuente: Feo, Luis. E, 2015 “*Método Racional de Diseño para Mezclas de RCC*”. Artículo de “4ta Conferencia Internacional GeoChina”, Shandong, China, 2016.

La determinación de cada vértice viene dada por las siguientes ecuaciones, para los valores extremos de la tabla 3.3:

$$\%Pasta = \frac{G_P * \%V_{AM} * \%V_F}{G_M - \%V_{AM} * (G_M - \%V_F * G_P)} \quad (24)$$

$$\%Pasta = \frac{G_P * (\%V_{AM} - \%V_t)}{(G_M - G_P) * (1 - \%V_{AM}) + (1 - \%V_t) * G_P} \quad (25)$$

$$\%Pasta = \frac{G_P * \%V_t * \%V_F}{G_M * (1 - \%V_t - \%V_F) + G_P * \%V_t * \%V_F} \quad (26)$$

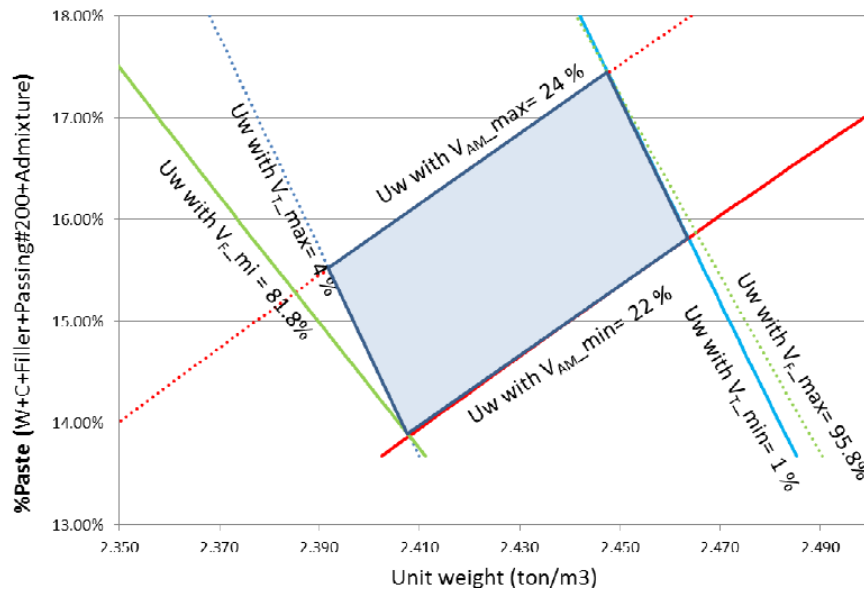


Figura 3.7- Polígono de Vacíos

Fuente: Feo, Luis. E, 2015 “*Método Racional de Diseño para Mezclas de RCC*. Artículo de “4ta Conferencia Internacional GeoChina”, Shandong, China, 2016.

El %Pasta óptimo y la densidad del RCC, para los parámetros de vacíos antes mencionados, serán igual al centroide del polígono resultante. Por lo general, en el diseño de asfaltos las combinaciones más comunes y frecuentes son el III, IV y V.

El proceso de cálculo entra en un ciclo iterativo hasta lograr que el %Pasta asumido sea igual al %Pasta óptimo, es decir, el centroide del polígono de vacíos, obteniendo la dosis final de los materiales.

En el presente proyecto, se obligó a que el %Pasta asumido fuese cercano al óptimo, teniendo en cuenta, principalmente, que la diferencia entre la humedad de la mezcla y la humedad óptima estuviese entre +0,5% y +1,5%; con el propósito de controlar la pérdida de humedad. Además, el %Pasta debía estar en el rango de variación comprendido entre 13% y 21%, siendo estos los vértices mínimo y máximo, respectivamente, del polígono de vacíos correspondiente.

3.10- Dosificaciones

La dosificación consistió en elegir arbitrariamente distintas relaciones agua/cemento y %Pastas, que cumplieran los requisitos descritos anteriormente. En los anexos se observa la hoja de cálculo para cada diseño, y en ellas todas las especificaciones de cada uno.

Tabla 3.5- Cantidad de materiales por metro cúbico (m³) de mezcla.

| Diseño | D-001 | D-002 | D-003 | D-004 |
|--------------------------|---------|----------|----------|----------|
| Relación a/c | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,8 |
| %Pasta | 18% | 19% | 20,50% | 17,50% |
| Agregado (kg) | 2.043 | 2.025,6 | 1.996,76 | 2.046,32 |
| Agua (kg) | 134,4 | 132,24 | 130,62 | 138,92 |
| Cemento (kg) | 192 | 220,4 | 261,24 | 173,65 |
| DMT (kg/m ³) | 2.369,4 | 2.378,24 | 2.388,62 | 2.358,89 |

3.11- Fases de Ejecución

3.11.1- Preparación de Agregados

Para realizar las probetas cilíndricas se utilizó una cantidad aproximada de ochocientos cuarenta kilogramos (840 Kg) de agregado, proveniente de un préstamo de la Refinería de Puerto La Cruz. Éste fue debidamente lavado con la finalidad de eliminar impurezas que pudiesen contaminar la mezcla de concreto. A su vez, fue llevado a la condición de agregado saturado con superficie seca (SSS).

Por otra parte, el material también fue lavado por decantación para disminuir la cantidad de finos plásticos presentes en el mismo. Al finalizar esta operación se obtuvo un material totalmente libre de finos plásticos.

Posterior a ello, se realizó el ensayo Proctor, para obtener la humedad óptima del agregado y su densidad máxima teórica (DMT). En los anexos presentados se podrán

observar los resultados obtenidos para cada uno de los diseños realizados. El ajuste de energía, basándose en las especificaciones del equipo, Figura 3.2, extraídas de la página del fabricante www.tamcotools.com :

$$Energía = \frac{Frecuencia * tiempo * \#capas * Masa * Caída}{Volumen}$$

$$Energía = \frac{600 \frac{golpes}{min} * 17seg * \frac{1 min}{60 seg} * 3capas * 18Kg * 0,16m}{0,0053m^3} = 277.132 \text{ kg/m/m}^3$$

Para finalizar, el material fue tamizado y almacenado por tamaño, en bolsas selladas para evitar pérdida de humedad.

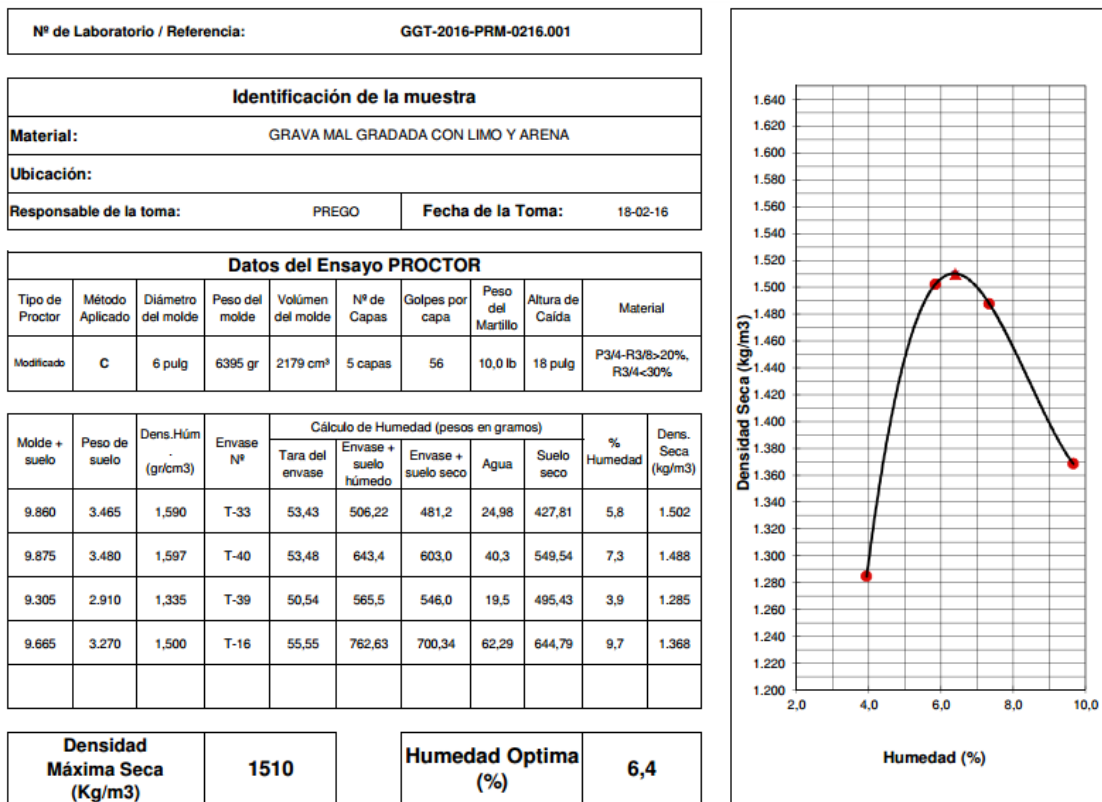


Figura 3.8- Resultado Ensayo Proctor Modificado (18-02-2016).

Fuente: Propia



Figura 3.9- Material Tamizado y Sellado por tamaño.
Fuente: Propia

3.11.2- Preparación de Mezclas y Probetas

A continuación se describe el procedimiento seguido para la realización de cada una de las probetas (15 por cada diseño):

- 1) Se pesó el agregado necesario por cada tamaño. Igualmente, la cantidad de cemento y agua.
- 2) Se agregaron paulatinamente los materiales al “trompo”, ya encendido, el cual estaba en posición casi horizontal para evitar segregación de la mezcla. Una vez agregados los materiales completamente, se dejó mezclar por tres minutos.
- 3) Finalizado el tiempo de mezclado, se retiró la mezcla del trompo y se dejó reposar en una carretilla de superficie rígida, humedecida, lisa y no absorbente, por espacio de 3 minutos adicionales, luego de los cuales se mezcló a pala por espacio de 2 minutos para uniformizar la mezcla.
- 4) La mezcla fue tapada con paños humedecidos, para así evitar en lo posible pérdida de la humedad de la mezcla.

- 5) Se colocaron los cilindros metálicos en sus respectivos soportes de sujeción. Previo a ello, fueron humedecidos internamente con una ligera capa de aceite para evitar la adherencia del RCC a la “concha”.
- 6) Se vació y compactó la mezcla de RCC con la “bailarina”, a razón de tres capas durante 17 segundos cada una. Entre cada capa, fue raspada la superficie con una cabilla para asegurar la adherencia entre ellas. En la capa final, en caso de no llenar por completo el volumen de la cápsula cilíndrica, se colocó pasante del tamiz #4 y se enrasó la superficie.
- 7) Luego de 3 días de curado se desmoldaron las probetas, se identificaron adecuadamente y se colocaron de nuevo en la cámara de curado hasta cumplir el lapso de curado pre-definido.



Figura 3.10- Colocación de las capas de RCC en las “conchas”.

Fuente: Propia



Figura 3.11- Enrasado de la superficie de las probetas.
Fuente: Propia

3.12- Ensayos

3.12.1- Para obtener Resistencia

Las probetas cilíndricas fueron ensayadas a compresión según el procedimiento establecido en la Norma ASTM C39. La resistencia de cada una de las muestras se obtuvo en función de la carga aplicada a las mismas, haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$Resistencia = \frac{Carga\ Aplicada}{\frac{\pi \cdot Diámetro^2}{4}} \left[\frac{Kg}{cm^2} \right] \quad (27)$$

Finalmente, se lleva la unidad del resultado obtenido (Kg/cm^2) al sistema internacional de unidades al multiplicarlo por el factor 0,0980665; obteniendo así la resistencia en MegaPascal (Mpa).

El ensayo a compresión de cada probeta se llevó a cabo por medio de una prensa hidráulica (Figura 3.11), la cual funciona bajo el principio de Pascal, pues permite amplificar la intensidad de la fuerza aplicada y de esta manera lograr la falla de cada muestra. Dicha prensa puede arrojar el valor de la carga en kilogramos (Kg) o libras (lb)..



Figura 3.12- Probeta C-3 (Diseño D-001).
Fuente: Propia



Figura 3.13- Compresión de Probeta C-03 (Diseño D-001).
Fuente: Propia



Figura 3.14- Falla de Probeta C-3 (Diseño D-001).
Fuente: Propia

3.12.2- Para obtener Densidad Real

Una vez realizadas las probetas, fue necesario conocer la densidad real de las mismas, para ello se realizó el siguiente procedimiento:

- 1- Sacar la probeta de la piscina de curado y pesarla sumergida en agua.
- 2- Secar la superficie de la probeta y pesarla en aire (Peso saturado con superficie seca)
- 3- Se calcula la densidad al dividir el peso saturado con superficie seca entre la resta de dicho peso y el peso sumergido en agua, es decir el volumen desplazado por ésta:

$$Densidad = \frac{Peso\ SSS}{Peso\ SSS - Peso\ Sumergido} \quad (28)$$

La densidad de cada probeta fue obtenida el día de la ejecución del ensayo. Sin embargo, a manera de prueba, se buscó la densidad de éstas a los 2 días de haberlas realizado y el día del ensayo, como se dijo anteriormente, esto con la finalidad de demostrar que su densidad no variaría.

Por ejemplo: Para una probeta se obtuvo un valor de densidad igual a 2.370 kg/m^3 , a los 2 días de realizada. El día del ensayo (56 días más tarde) se obtuvo una densidad de 2.368 kg/m^3 , lo cual evidencia que la variación de ésta no es representativa y garantiza que se alcanzó la saturación de las probetas.



Figura 3.15- Medición de Peso Sumergido
Fuente: Propia

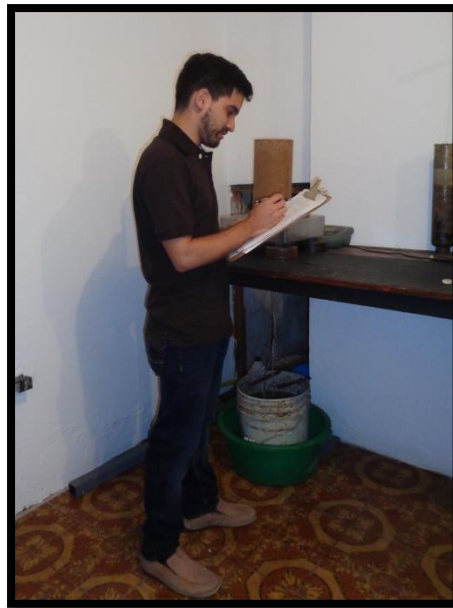


Figura 3.16- Recolección de Datos en Planillas de Registro.
Fuente: Propia

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1- Análisis General

Al evaluar el comportamiento mecánico de probetas de RCC ensayadas a compresión, se obtuvieron diversos resultados, los cuales fueron organizados y analizados con la finalidad de generar una serie de gráficas y relaciones, presentadas a continuación.

Inicialmente, se presentan los datos de humedad y temperatura de la mezcla, obtenidos para cada diseño:

Tabla 4.1- Condiciones Controladas

| Relación α | Diseño | Temperatura °C | | %Humedad de la Mezcla | |
|-------------------|-----------------|----------------|--------------|-----------------------|-------|
| | | De Ambiente | De la mezcla | Inicial | Final |
| 0,7 | D-001 | 33,0 | 30,0 | 7,48 | 7,15 |
| 0,6 | D-002 | 33,2 | 30,2 | 8,59 | 7,54 |
| 0,5 | D-003 | 32,4 | 29,8 | 7,16 | 6,71 |
| 0,8 | D-004 | 32,3 | 30,1 | 8,17 | 7,82 |
| | Promedio | 32,73 | 30,03 | 7,85 | 7,31 |

De forma individual, se observa que la mezcla no superó la temperatura del ambiente ni los 33°C . A su vez, la pérdida de humedad oscila entre el 0,5% y 1,1%, valores bastante bajos; por tal razón se afirma que las condiciones de humedad y temperatura fueron controladas.

En las tablas 4.2 y 4.3 se indican, según edad, %Pasta y diseño, los promedios de las resistencias a compresión obtenidas de dos probetas ensayadas.

Tabla 4.2- Resistencia a Compresión (Mpa)

| | | Diseño | | | |
|-------------|---------|--------|-------|-------|-------|
| | | D-001 | D-002 | D-003 | D-004 |
| Edad | a/c | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,8 |
| | %Pasta | 18 | 19 | 20,5 | 17,5 |
| | 7 Días | 9,85 | 5,10 | 10,89 | 4,11 |
| | 28 Días | 10,56 | 7,37 | 11,41 | 6,26 |
| | 56 Días | 11,14 | 13,20 | 13,31 | 12,59 |
| | 90 Días | 15,12 | 16,34 | 15,44 | 14,51 |

Tabla 4.3- Resistencia a Compresión (Kgf/cm²)

| | | Diseño | | | |
|------|---------|--------|--------|--------|--------|
| | | D-001 | D-002 | D-003 | D-004 |
| Edad | a/c | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,8 |
| | %Pasta | 18 | 19 | 20,5 | 17,5 |
| | 7 Días | 100,44 | 52,01 | 111,05 | 41,91 |
| | 28 Días | 107,68 | 75,15 | 116,35 | 63,83 |
| | 56 Días | 113,60 | 134,60 | 135,72 | 128,38 |
| | 90 Días | 154,18 | 166,62 | 157,44 | 147,96 |

Tabla 4.4- Densidad Máxima Teórica

| Diseño | D-001 | D-002 | D-003 | D-004 |
|--|----------|----------|----------|----------|
| DMT (Kg/m ³) | 2.369,40 | 2.378,24 | 2.388,62 | 2.358,89 |
| Promedio de Densidad Obtenida (Kg/m ³) | 2.367,2 | 2.343,7 | 2.369,10 | 2.345,5 |
| %DMT Alcanzado | 99,91 | 98,55 | 99,18 | 99,43 |
| %Vt | 0,09 | 1,45 | 0,82 | 0,57 |

En las siguientes gráficas se muestran, de forma individual, los resultados obtenidos para cada una de las curvas analizadas, según la edad de la misma:

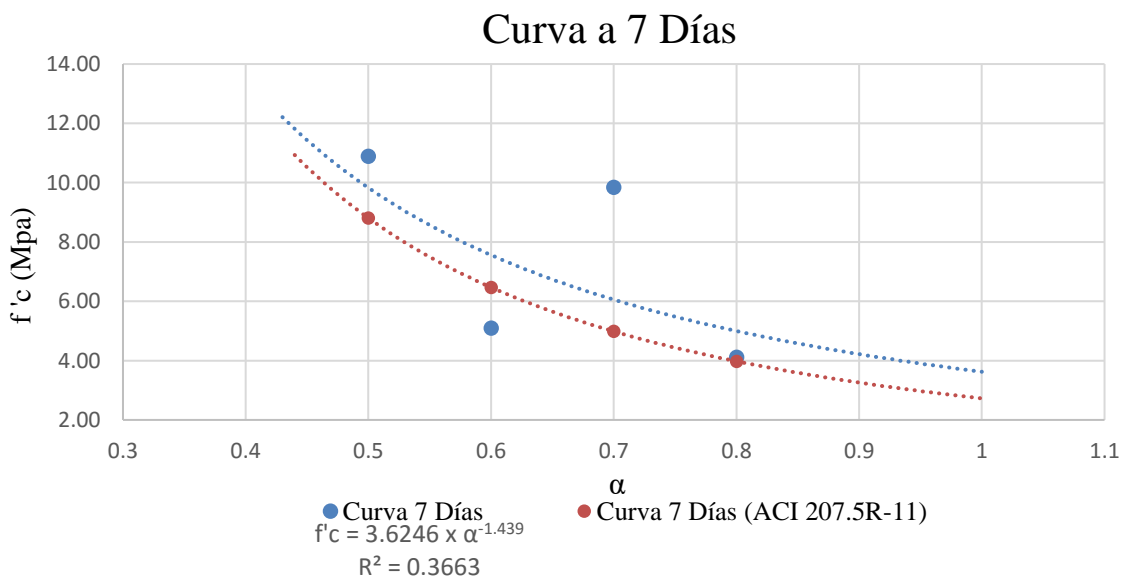


Figura 4.1- Gráfica Resistencia vs. Relación a/c para 7 días.

Curva a 28 Días

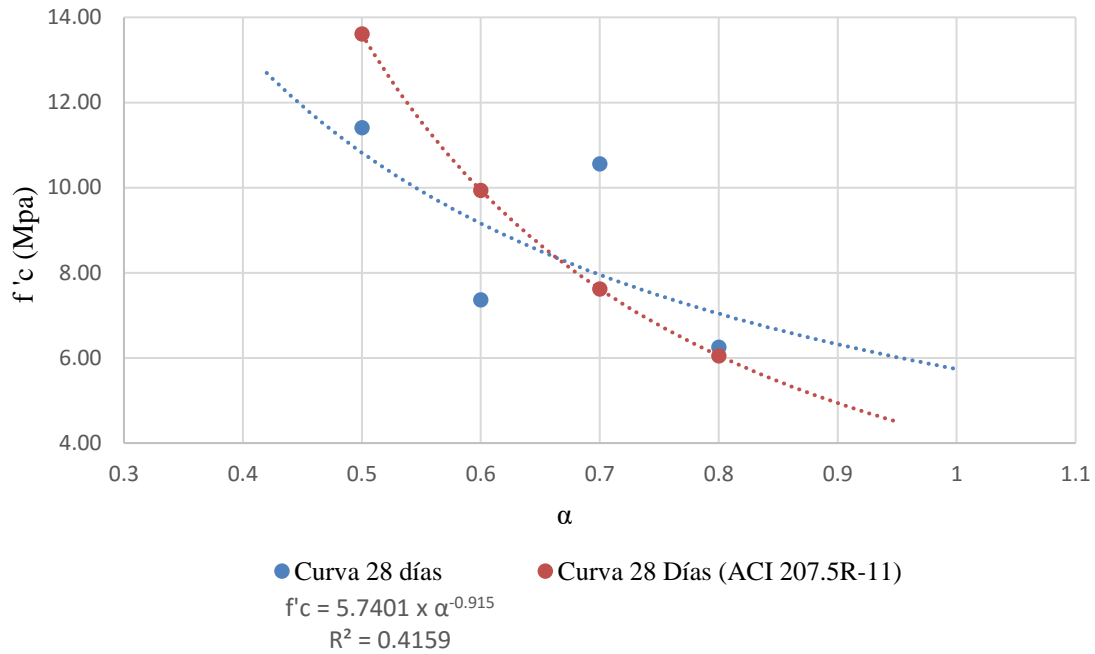


Figura 4.2- Gráfica Resistencia Vs. Relación a/c' para 28 días.

Curva a 56 Días

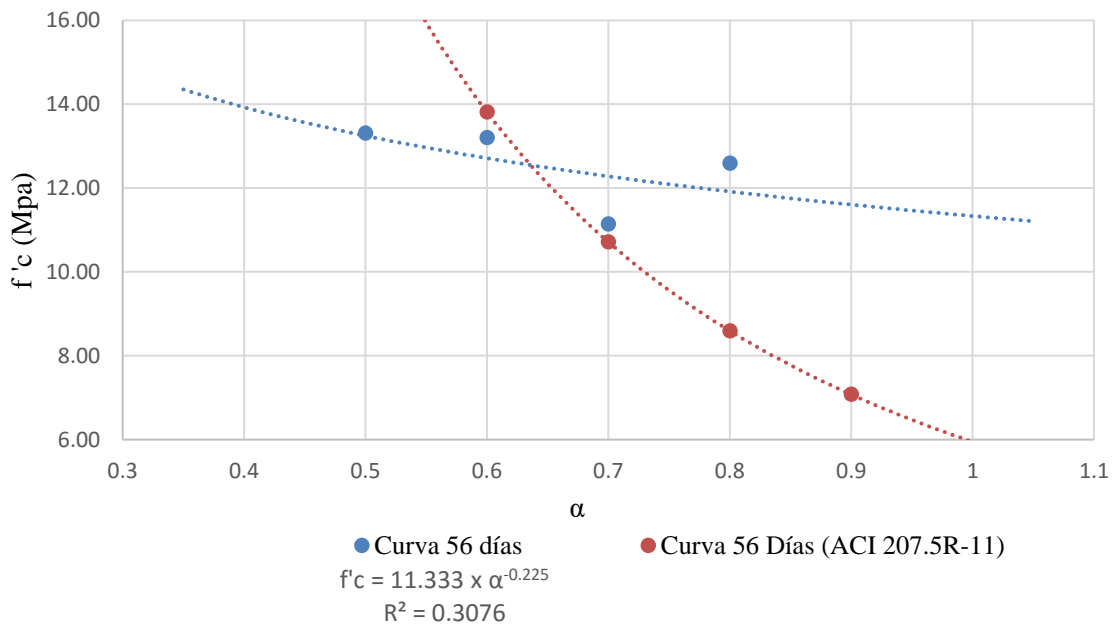


Figura 4.3- Gráfica Resistencia Vs. Relación a/c' para 56 días.

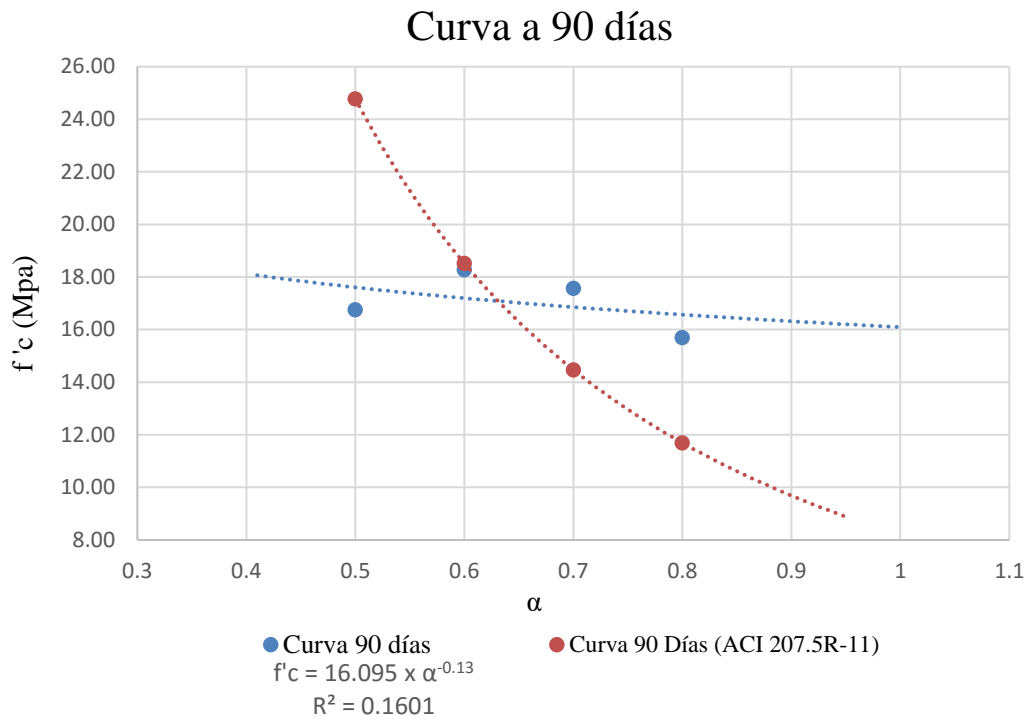


Figura 4.4- Gráfica Resistencia Vs. Relación a/c' para 90 días.

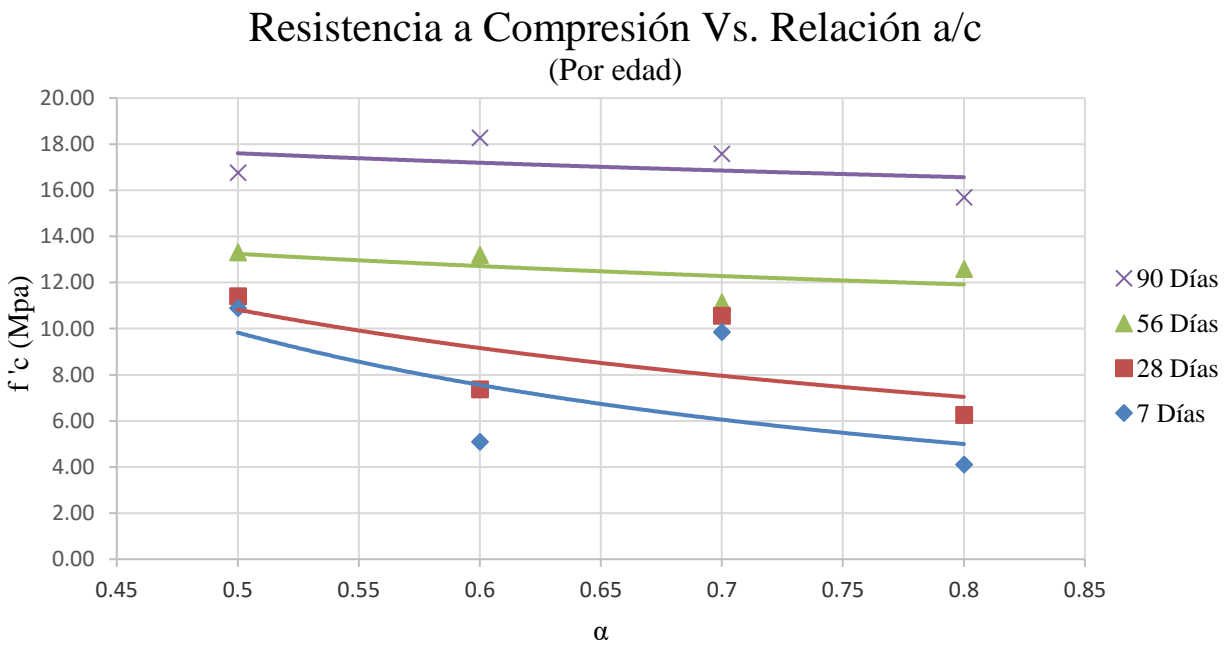


Figura 4.5- Resistencia a Compresión Vs. Relación a/c' para todas las edades.

4.2- Evaluación de comportamiento mecánico para curvas de Resistencias Vs. Relación a/c'

Con respecto a las curvas obtenidas para las edades comprendidas entre 7, 28, 56 y 90 días, se obtuvo una correlación baja, indicando que no presentan un comportamiento similar al de las curvas estudiadas. Por lo tanto, no es pertinente utilizar una de estas variables para predecir a la otra.

A pesar de que todas las curvas presentan una tendencia potencial, se puede apreciar que en las curvas para 7 y 28 días, la resistencia aumenta levemente a medida que la relación agua/cemento disminuye. Sin embargo para las curvas de 56 y 90 días, el incremento de la resistencia no se aprecia.

Se debe mencionar que las probetas para cada diseño fueron confeccionadas en tandas diferentes, lo cual fue bastante influyente, ya que se aprecia mayor similitud en cuanto a la forma de la curva obtenida en la gráfica para 7 y 28 días (Segunda bachada); y para 56 y 90 días (Primera bachada).

4.3- Evaluación de la resistencia de la mezcla según el contenido de cemento

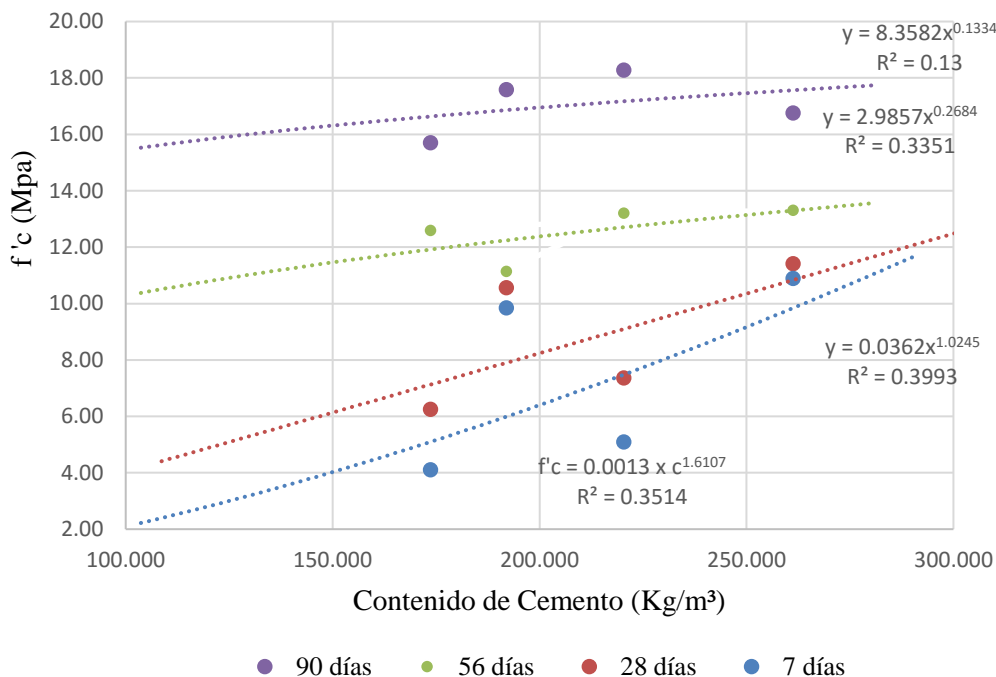


Figura 4.6- Gráfica de Resistencia RCC para Diferentes Proporciones de Cemento.

La gráfica 4.6 refleja que se obtuvo una correlación baja entre el contenido de cemento y la resistencia a compresión para curvas de 7, 28, 56 y 90 días, esto demuestra que las variables no guardan una relación lineal, es decir el valor específico de una de las variables no permite predecir el valor de la otra.

Se aprecia el mismo fenómeno de la gráfica 4.5 en relación a la forma de las curvas potenciales para 7 y 28 días, y aunque los resultados no son significativos, se puede observar que existe una ligera tendencia ascendente, teniendo un comportamiento distinto con respecto a las curvas de 56 y 90 días, las cuales se muestran casi paralelas entre ellas.

4.4- Evaluación de la densidad de la mezcla

Con la finalidad de obtener el valor de la DMT en laboratorio se aplicó el ensayo Rice (ASTM D2041) al estado suelto de la mezcla, justo antes de confeccionar las probetas. Este ensayo consiste en obtener la densidad de mezclas asfálticas por medio de diferencias de peso.

A continuación, se presentan los resultados alcanzados con el ensayo. Como se podrá apreciar, las densidades obtenidas fueron menores a las densidades reales de cada cilindro (Ver Anexo C), lo cual no es correcto. Traduciéndose en el descarte de la aplicación de este ensayo para mezclas de RCC sin que se realice un ajuste en el procedimiento.

Tabla 4.5- Ensayo Rice

| Diseño | D-001 | D-002 | D-003 | D-004 |
|---|-------|-------|-------|-------|
| Peso Frasco (gr) | 1556 | 1556 | 1556 | 1556 |
| Peso frasco + Agua (gr) | 5390 | 5390 | 5390 | 5390 |
| Peso Frasco + Muestra (gr) | 4490 | 5332 | 5775 | 4308 |
| Peso Muestra (gr) | 2934 | 3776 | 4219 | 2752 |
| Peso Frasco + Muestra + Agua, s/v (Kg) | 7035 | 7395 | 7786 | 6934 |
| Suma de Pesos (gr) | 8324 | 9166 | 9609 | 8142 |
| Peso de Volumen De Agua Igual a Muestra (gr) | 1289 | 1771 | 1823 | 1208 |
| Temperatura de Ensayo (°C) | 26 | 26 | 25 | 25 |
| P.E. Máximo T. De la Mezcla a Temp. (gr/cm ³) | 2,276 | 2,132 | 2,314 | 2,278 |
| RICE de la Mezcla (gr/cm ³) | 2,276 | 2,132 | 2,314 | 2,278 |
| DMT (Kg/m ³) | 2276 | 2132 | 2314 | 2278 |

Como las densidades arrojadas por el ensayo Rice fueron inferiores a las densidades reales de cada cilindro, se despreció su resultado. Por otra parte, en algunos casos la DMT dada en la hoja de cálculo también fue inferior a la densidad real, generando vacíos totales negativos o muy cercanos a cero, siendo físicamente imposible en el primero de los casos o improbable de lograr en el segundo. Por ello se decidió indagar en los posibles errores cometidos que llevarían a esta variación.

A pesar de ser dos tandas, el material utilizado fue del mismo origen geológico, y a su vez seleccionados por su peso específico (debían ser iguales entre sí, o muy cercanos), no siendo influyente esta mínima variación en el cálculo de la DMT. Sin embargo, se llegó a la conclusión que al recalcular las cantidades de material para el volumen de mezcla que se haría, en función de las cantidades de probetas, se entraba en una variación que podría arrojar hasta 3,6% de error, suficiente para que los vacíos pasaran de -0,33% a +2,6%.

Se calcularon los posibles errores asumidos en cada diseño, partiendo de la diferencia en peso de la original respecto a la final, y se encontraron cuatro dispersiones para cada diseño: 2,53%, 1,97%, 3,96% y 3,02%, respectivamente. Con estas pequeñas variaciones se calcularon las DMT corregidas, y con ellas los porcentajes de V_t , V_{AM} y V_F .

Vale acotar que ésta sigue sin ser la DMT real de la mezcla, es una ligera corrección realizada para obtener valores de vacíos más cercanos a los probables. Por lo que es de suma importancia encontrar un ensayo estandarizado de gran precisión que mida la densidad máxima de la mezcla antes de ser compactada.

En el Anexo C se presentan estos resultados.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1- Conclusiones

Al evaluar el comportamiento mecánico de probetas cilíndricas en función de las gráficas de Resistencia a la compresión vs. Relación agua/cemento a distintas edades, se concluye lo siguiente:

- Los resultados obtenidos no son satisfactorios, debido a que no existe correlación entre Resistencia a compresión y Relación a/c. Se observa que los valores obtenidos son bastante dispersos, debido a:
 1. Se trabajó con pocas muestras.
 2. No se tuvo un control absoluto de la energía de compactación, ya que la eficiencia de la “bailarina” depende de muchas variables que escapan del control humano. Por ejemplo: La altura desde la cual trabaja la bailarina puede variar a medida que se realiza la compactación. También, en ocasiones, el equipo puede golpear la superficie del molde llegando a romper las bisagras de éste. Estas eventualidades logran afectar los rangos de vacíos, por tanto la estandarización de la energía de compactación es garantía de que las probetas quedan confeccionadas dentro de un rango razonable de vacíos.
 3. Dificultad al acopiar todo el material a utilizar, debido al manejo del sitio de préstamo, ya que al momento de reponerlo dicho préstamo no existía.
- El control del material utilizado como agregado, en este caso granzón, no fue el más óptimo a pesar de haber comprobado que el peso específico de las dos tandas realizadas fuesen el mismo en ambas ocasiones, o en su defecto, muy cercano (menos del 1% de variación). De igual forma, el origen geológico del material es el mismo, mas se evidenció que el utilizar distintos materiales de similares características sí repercutió en los resultados

- Se aprecia como las curvas de una tanda guardan una relación estrecha entre ellas, mientras que difieren del comportamiento de las otras. Como se observa un par de curvas (56 y 90 días) presenta baja variación de la resistencia. Mientras que el otro conjunto de curvas (7 y 28 días) presentan un rango más amplio de variación. Lo cual lleva a confirmar que es importante tener precisión y conocimiento de los equipos al momento de confeccionar las probetas y realizar cada uno de los ensayos requeridos.
- Las Curvas de Resistencia RCC para Diferentes Proporciones de Cemento, muestran baja correlación por lo cual, una vez más, se evidencia la dispersión de los resultados obtenidos. A pesar de ello se observa que las 4 curvas tienen una tendencia ascendente, indicando, evidentemente, que a mayor contenido de cemento se podrá obtener mayor resistencia, tal como se aprecia en las Figuras 2.4 y 2.5 extraídas de la ACI 20.5R-9.
- Una vez iniciado el proceso de confección de las probetas es importante tener control de condiciones tales como humedad de la mezcla y temperatura del ambiente, el cual se logró. Por otra parte, se confirma que una variable alternativa para definir una matriz de diseño es la humedad óptima de los agregados antes de ser mezclados con el cemento, pues se ha comprobado que la humedad final de las mezclas de RCC, tienden a estar en el rango comprendido entre +0,5% y +1,5% puntos por encima de la humedad óptima del ensayo ASTM D1557, influyendo directamente en el %Pasta.
- Cada diseño presenta características diferentes, debido a que la variación de la relación a/c, influye directamente en la humedad de la mezcla por tanto en la densidad máxima teórica y en el porcentaje de pasta de la misma. Éste es un factor sumamente importante ya que garantiza la unión intercapas.
- A pesar que no se tienen datos experimentales que limiten el porcentaje de vacíos llenados ($\%V_F$), se obtuvieron valores con variación desde 77% hasta 93% aproximadamente. Sin embargo, este valor ($\%V_F$) no influye en el RCC como lo hace en las mezclas asfálticas, en las cuales limita el valor máximo de vacíos de agregado mineral ($\%V_{MA}$).

Nota: En los Anexos C, se encuentran los valores de los porcentajes de vacíos mencionados.

- Aunque no fue alcanzado el resultado esperado con respecto a la curva estudiada, el diseño 2 (D-002, $\alpha = 0,6$) y 4 (D-004, $\alpha = 0,8$), fueron los que mejor comportamiento presentaron en los tópicos analizados. Las resistencias obtenidas a diferentes edades, como era de esperarse, no son cercanas entre sí, a diferencia de los otros casos.
- El método de diseño se basa en experiencias acumuladas con el uso del RCC y en el diseño y control de calidad de mezclas asfálticas, por tal razón se hace necesario ratificar que las Curvas de Relación agua/cemento (a/c') vs. Resistencia a la Compresión ($f'c$) para distintas edades (Reporte del Concreto Compactado con Rodillo, ACI Comité 207, USA, 2011) son válidas para el método de diseño, hasta que no sean elaboradas otras con fundamento práctico.
- En Venezuela, la aplicación de este método de construcción es bastante reciente, por ello no se cuenta con un registro histórico del comportamiento de presas construidas con RCC, a largo plazo. Los resultados obtenidos en la Presa de El Guapo, a pesar de ser la base experimental de este trabajo, no son suficientes para estandarizar el proceso completo, o en parte, el diseño de mezclas. Lamentablemente, la obra de la Presa de Cuirá fue paralizada en Mayo del pasado año, lo que significó la salida de Ingeniería Geotécnica Prego. C.A. de la misma, impidiendo así el estudio de muestras en grandes cantidades que arrojaran estadísticas más favorables.
- La experiencia obtenida con este proyecto fija bases para investigaciones futuras en las que se mejoren los parámetros de éste, y así conseguir los resultados esperados.

5.2- Recomendaciones

- Al no tener resultados aproximados a la curva analizada, es necesario continuar utilizando la curva planteada por la ACI 207.5R.11 (Figura 1.3), ya que se tiene una correlación acertada entre las variables graficadas. Además, ésta es imprescindible para determinar la calidad de la pasta que garantizará las propiedades mecánicas esperadas.
- Es necesario adaptar ensayos o establecer una metodología para la correcta medición de la densidad máxima teórica (DMT), debido a que el ensayo RICE, usado para mezclas

asfálticas, no arrojó resultados acertados. Sin embargo, se propone seguir con la línea de estudios de expertos y utilizar el método del Presurímetro, u olla de presión, el cual es bastante útil para el control de colocación en campo.

- Realizar estudios enfocados en la energía utilizada al compactar las probetas, en cuanto al uso del instrumento, calibración y las condiciones del lugar en el cual sea utilizado. Es de suma importancia tener un proceso estandarizado y un valor de energía totalmente fijo, y se compruebe que no exista variación alguna de la misma en la confección de probetas.
- Con los parámetros de energía descritos anteriormente, agrupar las probetas por edades y a su vez por rangos de vacíos totales (% Vt). De esta manera, se podrán evaluar las resistencias en función de los mismos y así determinar, o no, una correlación de ambas variables.
- Complementar los datos recopilados en esta investigación para concluir sobre la relación entre las proporciones de vacíos y la resistencia de las mezclas de RCC.
- Se plantean las bases de una nueva investigación donde se corrijan las deficiencias de este Trabajo Especial de Grado. En ellas, se deben incluir otros aspectos como relación entre trabajabilidad, medida con el equipo VeBe, y las proporciones de vacío, todo apuntando a una estandarización que permita el uso del método racional de diseño en cuestión:
 1. Energía de confección de probetas.
 2. Parámetros de vacíos
 3. Curvas de diseño Resistencia vs. Relación a/c
 4. Control de variables externas.
 5. Uso de ensayos adaptados: Medición de DMT, densidad de briquetas y densidad en sitio.

BIBLIOGRAFÍA

Referencias Bibliográficas

American Concrete Institute (2012) ACI 207.5R-11 *Report on Roller-Compacted Mass Concrete*. USA.

Arias, F (1999). *El Proyecto de la Investigación, Guía para su elaboración*. Caracas. Editorial Texto C.A.

Arnold, Terry . “*Roller-Compacted Concrete Density: Principles and Practice*”. Water Resources.

Baptista, Fernández y Sampieri (2006). *Metodología de la investigación (4^{ta} Edición)*. México. Editorial McGraw Hill

Feo, L. E (2015). *Método Racional de Diseño de Mezclas RCC*. GeoChina 2016 (Por Publicar)

Gómez, M (2006). *Introducción a la Metodología de la Investigación Científica*. Argentina. Editorial Brujas.

Hansen, K.D y Reinhardt, W.G., 1991. *Roller-Compacted Concrete Dams*. New York : McGraw-Hill, 1991.

Ingeniería Geotécnica Prego. *Diseño De Mezclas De Rcc Para La Reconstrucción De Presa El Guapo* (.ppt). Mayo 2007. Caracas, Venezuela.

Ingeniería Geotécnica Prego. *Estado del arte de los diseños de mezcla de RCC para la Presa El Guapo* (ppt). Mayo 2007. Caracas, Venezuela.

Ingeniería Geotécnica Prego. *Aspectos Prácticos En El Diseño De Mezcla De Concreto Compactado (RCC) E Implantación De Un Sistema De Gestión De La Calidad Durante Su Colocación Reconstrucción De La Represa El Guapo, Estado Miranda* (.doc). Junio 2007. Isla de Margarita, Venezuela.

López, J.E.; Schrader, E. y Gackel, L. (2012) *RCC Dam construction – conveyors or trucks*. Proceedings of Sixth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC). Zaragoza, 23 – 25 October 2012

Moreno, G (2000). *Introducción a la Metodología de la Investigación Educativa II*. México. Editorial Progreso S.A.

Norma ASTM C1176 “Mesa Vibratoria”

Norma ASTM C1435 “Martillo Vibrador”

Norma ASTM C190 “Esfuerzo de Tensión”

Norma ASTM C39 “Ensayo de Resistencia a la Compresión”

Norma ASTM C494 “Especificaciones de Aditivos”

Norma ASTM C618 “Especificaciones de Cenizas Volantes”

Norma ASTM C94 “Especificaciones de Concreto”

Norma ASTM D1557 “Proctor Modificado”

Norma ASTM D2041 “Densidad del Rice”

Norma ASTM D7698 “Electrical Density Gauge”

Porrero, J., Ramos, C., Grases, J., Velazco G. *Manual de Concreto Estructural Conforme a la Norma COVENIN 1753:03*. SIDETUR, Caracas, 2004.

Sánchez-Leal, F., Garnica, P., Gómez, J. y Pérez, N. (2002) *RAMCODES: Metodología Racional para el Analisis de Densificación y Resistencia de Geomateriales Compactados*. Publicación Técnica N° 200, Instituto Mexicano del Transporte IMT. Querétaro, México.

Schrader, Ernest. 2012. *Performance Of Rcc Dams 6th International Symposium On Roller Compacted Concrete (RCC) DAMS*. Zaragoza, 23 – 25 October 2012

Tamayo y Tamayo, M (1997). *El Proceso de la Investigación Científica*. México. Editorial Limusa, S.A.

U.S. Army Corps Of Engineers. "Roller-Compacted Concrete", EM 1110-2-2006, Department of the Army, Washington, D.C. 15 January 2000

Referencias Electrónicas

Alvarado, J., 2014. *Estudio descriptivo de la tecnología del concreto compactado con rodillo y su aplicabilidad en pavimentos*. Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. Obtenido el 22 de Abril de 2016 de: <http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/12214/1/Estudio%20Descriptivo%20de%20la%20Tecnolog%C3%ADa%20del%20Concreto%20Compactado%20con%20Rodillo%20y%20su%20aplicabilidad%20en%20Pavimentos.pdf>

Bueno H., Francisco; Diez-Cascón S., Joaquín. *Ingeniería de Presas – Presas de Fábrica*. Universidad de Cantabria (2001) Servicio de Publicaciones. Tomo I. Cantabria, España. Obtenido el 28 de Marzo de 2016 de: https://books.google.co.ve/books/about/Ingenier%C3%ADa_de_Presas.html?id=I4ucSGLyfkGc

Cueche J., Sara I.; Pino V., Carlene J. “*Incidentes En Las Presas De Venezuela*”. Universidad De Oriente Núcleo De Anzoátegui Escuela De Ingeniería Y Ciencias Aplicadas Departamento De Ingeniería Civil”. Barcelona, Junio 2009. Obtenido el 15 de Abril de 2016 de: <http://ri.bib.udo.edu.ve/bitstream/123456789/1022/1/TESIS.FallasPresasHidro.pdf>

Escalaya, M., 2006. *Diseño de mezclas de concreto compactado con rodillo utilizando conceptos de compactación de suelos* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de

Ingeniería, Perú. Obtenido el 20 de Agosto de 2015 de:
<http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/761>

FAO, 2015. Sitio Web AGUSTAT. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Obtenido el 20 de Agosto de 2015 de:
<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/dams/indexesp.stm>

Valencia, E., 2013. Consideraciones prácticas para el diseño de presas de concreto compactado con rodillo. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Obtenido el 27 de Agosto de 2015 de:
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/6315/TESIS.pdf?sequence=1>

ANEXO A

CONCEPTOS FUNDAMENTALES O GLOSARIO


Para comprender mejor de la información se presenta una breve definición de las variables fundamentales que se han considerado necesarias, son ellas:

| | | |
|----------------|--|-----------------------------|
| F_{cr} : | Resistencia de Diseño | [Kgf/cm ²][Mpa] |
| $G_{\#200}$: | Masa Específica del Pasante #200 | [Kg/m ³] |
| G_{Filler} : | Masa Específica del Llenante | [Kg/m ³] |
| G_M : | Masa Específica de la para Mineral | [Kg/m ³] |
| G_{SSD} : | Masa Específica Saturada con Superficie Seca | [Kg/m ³] |
| G_a : | Masa Específica del Aditivo | [Kg/m ³] |
| G_c : | Masa Específica del Cemento | [Kg/m ³] |
| G_{cSSD} : | Masa Específica Compuesta | [Kg/m ³] |
| G_p : | Masa Específica de la Pasta | [Kg/m ³] |
| $M_{\#200}$: | Masa del Pasante #200 | [Kg] |
| M_{Filler} : | Masa del Llenante | [Kg] |
| M_p : | Masa de Pasta | [Kg] |
| M_{SSS} : | Masa Saturada con Superficie Seca | [Kg] |
| M_a : | Masa del Aditivo | [Kg] |
| M_{aSSD} : | Masa del Agregado Saturado con Superficie Seca | [Kg] |
| M_c : | Masa del Cemento | [Kg] |
| M_w : | Masa del Agua | [Kg] |
| P_p : | Porcentaje de Pasta | [%] |
| U_w : | Masa Unitaria | [Kg/m ³] |

| | | |
|-----------------|---|----------------------------|
| V_{AM} : | Vacíos de Agregado Mineral | [%] |
| V_F : | Vacíos llenados con Pasta | [%] |
| $V_{a_{SSD}}$: | Volumen del Agregado Saturado con Superficie Seca | [m ³] |
| V_p : | Volumen de Pasta | [m ³] |
| V_t : | Vacíos Totales | [%] |
| γ_w : | Peso Específico del Agua | [Kg/m ³] |
| DMT: | Densidad Máxima Teórica | [Kg/m ³] |
| NMSA: | Tamaño Máximo de Agregado | [mm][“] |
| α : | Relación agua/cemento | [Kg/Kg] |
| f'_c : | Resistencia a la Compresión | [Kg/cm ²][Mpa] |


ANEXO B
HOJAS DE CÁLCULO

Anexo B.1- Diseño 1 (D-001)


|  | | DESIGN OF ROLLER COMPACTED CONCRETE (RCC) | | | | |
|---|------------------------------------|--|---|---|--|--|
| Customer: | | Dávila - Rodríguez | | | | |
| Contract: | | | | | | |
| Project: | | Tesis UCAB | | | | |
| Code of record: | | | | | | |
| Date: | Marzo 2016 | Design: | D-001 | | | |
| Choose the following parameters | | | | | | |
| | | | | | Initial Water-Cementitious ratio for design: | 0.700 |
| Voids specifications | | | | | | |
| | Total voids, V _t (%) | Voids in mineral aggregates, V _{MA} (%) | Range for Voids filled with paste, V _F (%) | Voids filled with paste, V _F (%) | | |
| Minimum | 1% | 22.0% | 81.8% | 81.8% | | |
| Maximum | 4% | 24.0% | 95.8% | 95.8% | | |
| Characteristics of fines | | | | | | |
| Passing #200 | 5.00% | Plastic index | 0.0% | Liquid limit | 0.0% | |
| Specific gravity of P. #200 (ton/m ³) | 2.60 | ξ | 0.52 | Pozzolanic activity index | | |
| Setting cementitious material (Kg): | | | | 0.00 | | |
| Characteristics of cement (grout tested as ASTM C 109/C109M) | | | | | | |
| Cement type | Type II, Astm C150 | Test age of grout | 7 DAYS | Assumed Str. grout ratio | | |
| | | Comp. Str. (Mpa) of grout, used cement | 21.00 | Final Str. grout ratio | 1.00 | |
| Adjustment to water-cementitious ratio | | | | | | |
| | K _C 1.00 | K _R 1.00 | K _A 1.00 | | | |
| Water-Cementitious ratio adjusted: | | | | 0.700 | | |
| Aggregate combination (after compliance with specified band) | | | | | | |
| Label | Type | Specific gravity (SSD, ton/m ³) | % Abs. | Proportion (%) | Proportion (kg) | Choose NMSA |
| Grave Lomar - Grana | Natural gravel | 2.539 | 2.07% | 100.0% | 2042.98 Kg | |
| | | 2.539 | 2.07% | 0.0% | 0.00 Kg | 2 Inch |
| | | 2.539 | 2.07% | 0.0% | 0.00 Kg | Filler/Cement ratio |
| | | 2.539 | | 0.0% | 0.00 Kg | 0% |
| | G _{SSD} | 2.539 ton/m ³ | 2.07% | 100% | | Specific gravity (ton/m ³) |
| | Final ratio w/c: | 0.700 | | Water adjusted | 134.41 kg | 1 |
| | Final ratio w/(c+p): | 0.700 | | Cement adjusted | 192.01 kg | 3.15 |
| | Final ratio w/(c+p+passing #200): | 0.460 | | Admixture (kg) | | 1.5 |
| | Volume aggregate: | 804.6 lt | | Passing #200: | 100.1 kg | OWC |
| | Mass aggregate: | 2043.0 kg | | Paste (mass): | 426.5 kg | |
| | Theoretical Maximum Density (TMD): | 2389.4 kg/m ³ | | Calculated Paste: | 18.00% | 6% |
| Range for % Paste | | | | | Aggregates Moisture | 6.58% |
| %Paste_min | 13% | %Paste_max | 21% | | Df. With OWC | 0.3% |
| Assumed Paste (%) | | 18.00% | | | | |

Nota: En este y demás diseños, para efectos de este Trabajo Especial de Grado sólo se modificaron las celdas amarillas. Las celdas en gris oscuro no son relevantes, a excepción del rango de %Pasta.


Anexo B.2- Diseño 2 (D-002)

|  | | DESIGN OF ROLLER COMPACTED CONCRETE (RCC) | | | | |
|---|------------------------------------|--|---|---|--|--|
| | | Customer: | Dávila - Rodríguez | | | |
| | | Contract: | | | | |
| | | Project: | Tesis UCAB | | | |
| | | Code of record: | | | | |
| Date: | Marzo 2016 | Design: | D-002 | | | |
| Choose the following parameters | | | | | | |
| | | | | | Initial Water-Cementitious ratio for design: | 0.600 |
| Void specifications | | | | | | |
| | Total voids, V _t (%) | Voids in mineral aggregates, V _{MA} (%) | Range for Voids filled with paste, V _F (%) | Voids filled with paste, V _F (%) | | |
| Minimum | 1% | 22.0% | 81.8% | 81.8% | | |
| Maximum | 4% | 24.0% | 95.8% | 95.8% | | |
| Characteristics of fines | | | | | | |
| Passing #200 | 5.00% | Plastic index | 0.0% | Liquid limit | 0.0% | |
| Specific gravity of P. #200 (ton/m ³) | 2.60 | | ε | 0.52 | Pozzolanic activity index | |
| Setting cementitious material (Kg): | | | | 0.00 | | |
| Characteristics of cement (grout tested as ASTM C 109/C 109M) | | | | | | |
| Cement type | Type II, Astm C150 | Test age of grout | 7 DAYS | Assumed Str. grout ratio | | |
| | | Comp. Str. (Mpa) of grout, used cement | 21.00 | Final Str. grout ratio | 1.00 | |
| Adjustment to water-cementitious ratio | | | | | | |
| | K _c 1.00 | | K _a 1.00 | | K _A 1.00 | |
| Water-Cementitious ratio adjusted: | | | | 0.600 | | |
| Aggregate combination (after compliance with specified band) | | | | | | |
| Label | Type | Specific gravity (SSD, ton/m ³) | % Abs. | Proportion (%) | Proportion (kg) | |
| Grav. Lomar - Granz | Natural gravel | 2.539 | 2.07% | 100.0% | 2025.60 Kg | Choose NMSA |
| | | 2.539 | 2.07% | 0.0% | 0.00 Kg | 2 Inch |
| | | 2.539 | 2.07% | 0.0% | 0.00 Kg | Filler/Cement ratio |
| | | 2.539 | 2.07% | 0.0% | 0.00 Kg | |
| | G _{SSD} | 2.539 ton/m ³ | 2.07% | 100% | | Specific gravity (ton/m ³) |
| | Final ratio w/c: | 0.600 | | Water adjusted | 132.24 kg | 1 |
| | Final ratio w/(c+p): | 0.600 | | Cement adjusted | 220.40 kg | 3.15 |
| | Final ratio w/(c+p+passing #200): | 0.414 | | Admixture (kg) | | 1.5 |
| | Volume aggregate: | 797.8 ft | | Passing #200: | 99.2 kg | OWC |
| | Mass aggregate: | 2025.6 kg | | Paste (mass): | 45.19 kg | |
| | Theoretical Maximum Density (TMD): | 2378.2 kg/m ³ | | Calculated Paste: | 19.00% | 6% |
| Range for % Paste | | | | | Aggregates Moisture | 6.53% |
| %Paste_min | 13% | %Paste_max | 21% | | | |
| Assumed Paste (%) | | | | 19.00% | Df. With OWC | 0.2% |

Anexo B.3- Diseño 3 (D-003)

|  | | DESIGN OF ROLLER COMPACTED CONCRETE (RCC) | | | | |
|---|------------------------------------|--|--|---|--|--|
| | | Customer: | Dávila - Rodriguez | | | |
| | | Contract: | | | | |
| | | Project: | Tesis UCAB | | | |
| | | Code of record: | | | | |
| Date: | Marzo 2016 | Design: | D-003 | | | |
| Choose the following parameters | | | | | | |
| | | | | | Initial Water-Cementitious ratio for design: | 0.500 |
| Voids specifications | | | | | | |
| | | Total voids, V _t (%) | Voids in mineral aggregates, V _{va} (%) | Range for Voids filled with paste, V _f (%) | Voids filled w ith paste, V _p (%) | |
| Minimum | | 1% | 22.0% | 81.8% | 81.8% | |
| Maximum | | 4% | 24.0% | 95.8% | 95.8% | |
| Characteristics of fines | | | | | | |
| Passing #200 | 5.00% | Plastic index | 0.0% | Liquid limit | 0.0% | |
| Specific gravity of P. #200 (ton/m ³) | 2.60 | ε | 0.52 | Pozzolanic activity index | | |
| Setting cementious material (Kg): | | | | 0.00 | | |
| Characteristics of cement (grout tes ted as ASTM C 109/C 109M) | | | | | | |
| Cement type | Type II, Astm C150 | Test age of grout | 7 DAYS | Assumed Str. grout ratio | | |
| | | Comp. Str. (Mpa) of grout, used cement | 21.00 | Final Str. grout ratio | 1.00 | |
| Adjustment to water-cementitious ratio | | | | | | |
| | K _c 1.00 | K _a 1.00 | K _A 1.00 | | | |
| Water-Cementitious ratio adjusted: | | | | 0.500 | | |
| Aggregate combination (after compliance with specified band) | | | | | | |
| Label | Type | Specific gravity (SSD, ton/m ³) | % Abs. | Proportion (%) | Proportion (kg) | |
| Agre Lomar - Grana | Natural gravel | 2.539 | 2.07% | 100.0% | 1996.79 Kg | Choose NMSA |
| | | 2.539 | 2.07% | 0.0% | 0.00 Kg | 2 Inch |
| | | 2.539 | 2.07% | 0.0% | 0.00 Kg | Filler/Cement ratio |
| | | 2.539 | 2.07% | 0.0% | 0.00 Kg | 0% |
| | G _{SSD} | 2.539 ton/m ³ | 2.07% | 100% | | Specific gravity (ton/m ³) |
| | Final ratio w/c: | 0.500 | | Water adjusted | 130.62 kg | 1 |
| | Final ratio w(c+p): | 0.500 | | Cement adjusted | 261.24 kg | 3.15 |
| | Final ratio w(c+p+ passing #200): | 0.364 | | Admixture (kg) | | 1.5 |
| | Volume aggregate: | 786.4 lt | | Passing #200 | 97.8 kg | OWC |
| | Mass aggregate: | 1996.8 kg | | Paste (mass) | 489.7 kg | |
| | Theoretical Maximum Density (TMD): | 2388.6 kg/m ³ | | Calculated Paste | 20.50% | 6% |
| Range for % Paste | | | | | Aggregates Moisture | 6.54% |
| %Paste_min | 13% | %Paste_max | 21% | | | |
| Assumed Paste (%) | | | | 20.50% | Of. With OWC | 0.2% |

Anexo B.4- Diseño 4 (D-004)

|  | | DESIGN OF ROLLER COMPACTED CONCRETE (RCC) | | | | | |
|---|-----------------------------------|--|---|---|--|--|------|
| Customer: | | Dávila - Rodriguez | | | | | |
| Contract: | | | | | | | |
| Project: | | Tesis UCAB | | | | | |
| Code of record: | | | | | | | |
| Date: | Marzo 2016 | Design: | D-004 | | | | |
| Choose the following parameters | | | | | | | |
| | | | | | Initial Water-Cementitious ratio for design: | 0.800 | |
| Voids specifications | | | | | | | |
| | Total voids, V _t (%) | Voids in mineral aggregates, V _{MA} (%) | Range for Voids filled with paste, V _F (%) | Voids filled with paste, V _F (%) | | | |
| Minimum | 1% | 22.0% | 81.8% | 81.8% | | | |
| Maximum | 4% | 24.0% | 95.8% | 95.8% | | | |
| Characteristics of fines | | | | | | | |
| Passing #200 | 5.00% | Plastic index | 0.0% | Liquid limit | 0.0% | | |
| Specific gravity of P. #200 (ton/m ³) | 2.60 | | ξ | 0.52 | Pozzolanic activity index | | |
| Setting cementitious material (Kg): | | | | | 0.00 | | |
| Characteristics of cement (grout tested as ASTM C 109/C109M) | | | | | | | |
| Cement type | Type II, Astm C150 | Test age of grout | 7 DAYS | Assumed Str. grout ratio | | | |
| | | Comp. Str. (Mpa) of grout, used cement | 21.00 | Final Str. grout ratio | 1.00 | | |
| Adjustment to water-cementitious ratio | | | | | | | |
| | K _C 1.00 | | K _R 1.00 | | K _A 1.00 | | |
| Water-Cementitious ratio adjusted: | | | | | 0.800 | | |
| Aggregate combination (after compliance with specified band) | | | | | | | |
| Label | Type | Specific gravity (SSD, ton/m ³) | % Abs. | Proportion (%) | Proportion (kg) | | |
| que Lomar - Granz | Natural gravel | 2.539 | 2.07% | 100.0% | 2046.32 Kg | Choose NMSA | |
| | | 2.539 | 2.07% | 0.0% | 0.00 Kg | 2 Inch | |
| | | 2.539 | 2.07% | 0.0% | 0.00 Kg | Filler/Cement ratio | |
| | | 2.539 | | 0.0% | 0.00 Kg | 0% | |
| | G _{SSD} | 2.539 ton/m ³ | 2.07% | 100% | | Specific gravity (ton/m ³) | |
| | Final ratio w/c | 0.800 | | Water _{adjusted} | 138.92 kg | 1 | |
| | Final ratio w/(c+p) | 0.800 | | Cement _{adjusted} | 173.65 kg | 3.15 | |
| | Final ratio w/(c+p+passing #200) | 0.507 | | Admixture (kg) | | 1.5 | |
| | Volume aggregate | 806.0 lt | | Passing #200 | 100.2 kg | OWC | |
| | Mass aggregate | 2046.3 kg | | Paste (mass) | 412.8 kg | | |
| | Theoretical Maximum Density (TMD) | 2358.9 kg/m ³ | | Calculated Paste | 17.50% | 6% | |
| Range for % Paste | | | | | Aggregates Moisture | 6.79% | |
| %Paste _{min} | 13% | %Paste _{max} | 21% | | | | |
| Assumed Paste (%) | | | | | 17.50% | Dif. With OWC | 0.5% |

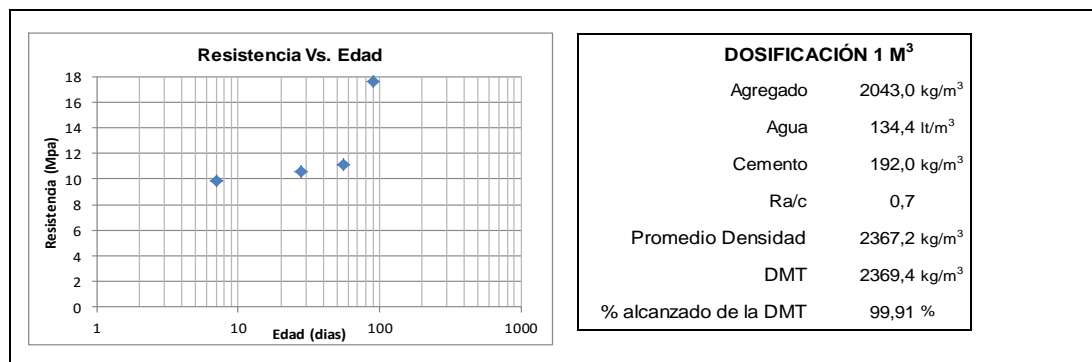
ANEXOS C
RESULTADOS DE DISEÑOS

Anexo C.1- Diseño 1 (D-001)

DISEÑO DE MEZCLAS DE RCC D-001

Temperatura ambiente: 33 °C % de humedad inicial de la mezcla 7,48
 Temperatura de la mezcla: 30 °C % de humedad final de la mezcla 7,15

| N° cilindro | Edad en Dias | Peso SSS (gr) | Peso Sumergido (gr) | Densidad (Kg/m ³) | Diámetro (cms) | Altura (cms) | Area (cm ²) | Carga Aplicada (Kg) | Resistencia (Mpa) | Resistencia Promedio (Mpa) | Vacíos | | |
|-------------|--------------|---------------|---------------------|-------------------------------|----------------|--------------|-------------------------|---------------------|-------------------|----------------------------|--------|-------|-------|
| | | | | | | | | | | | %Vt | %VAM | %Vf |
| C-1 | 7 | 12635 | 7290 | 2364 | 15,1 | 30,0 | 178,13 | 18525 | 10,20 | 9,85 | 2,69 | 21,72 | 87,60 |
| C-2 | 7 | 12685 | 7305 | 2358 | 15,0 | 30,0 | 175,54 | 17000 | 9,50 | | 2,94 | 21,93 | 86,57 |
| C-3 | 28 | 12920 | 7485 | 2377 | 15,1 | 30,1 | 179,08 | 19820 | 10,85 | 10,56 | 2,15 | 21,28 | 89,91 |
| C-4 | 28 | 12685 | 7285 | 2349 | 15,1 | 30,3 | 179,08 | 18745 | 10,27 | | 3,30 | 22,21 | 85,13 |
| C-5 | 56 | 12730 | 7350 | 2366 | 15,0 | 30,1 | 176,95 | 21080 | 11,68 | 11,14 | 2,60 | 21,65 | 87,99 |
| C-6 | 56 | 12700 | 7355 | 2376 | 15,1 | 29,9 | 178,13 | 19245 | 10,59 | | 2,19 | 21,32 | 89,71 |
| C-7 | 90 | 12535 | 7255 | 2374 | 15,1 | 29,8 | 179,08 | 31780 | 21,28 | 17,58 | 2,28 | 21,39 | 89,36 |
| C-8 | 90 | 12685 | 7340 | 2373 | 15,0 | 30 | 176,71 | 23135 | 13,89 | | 2,31 | 21,41 | 89,22 |
| C-9 | 365 | 12695 | 7325 | 2364 | - | - | - | - | - | - | 2,69 | 21,72 | 87,63 |
| C-10 | 365 | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |



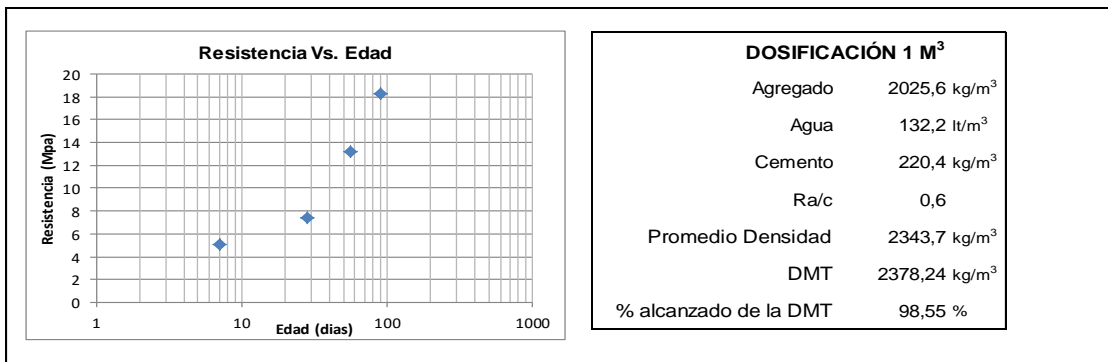
Nota: Para este y demás diseños, las edades en rojo corresponden a la segunda tanda.

Anexo C.2- Diseño 2 (D-002)

DISEÑO DE MEZCLAS DE RCC D-002

Temperatura ambiente: 33,2 °C % de humedad inicial de la mezcla: 8,59
 Temperatura de la mezcla: 30,2 °C % de humedad final de la mezcla: 7,54

| N° cilindro | Edad en Dias | Peso SSS (gr) | Peso Sumergido (gr) | Densidad (Kg/m ³) | Diámetro (cms) | Altura (cms) | Area (cm ²) | Carga Aplicada (Kg) | Resistencia (Mpa) | Resistencia Promedio (Mpa) | Vacíos | | |
|-------------|--------------|---------------|---------------------|-------------------------------|----------------|--------------|-------------------------|---------------------|-------------------|----------------------------|--------|-------|-------|
| | | | | | | | | | | | %Vt | %VAM | %VF |
| C-1 | 7 | 12165 | 6885 | 2304 | 15,06 | 30,5 | 178,13 | 10005 | 5,51 | 5,10 | 4,99 | 25,05 | 80,06 |
| C-2 | 7 | 12530 | 7050 | 2286 | 15,05 | 30,0 | 177,89 | 8505 | 4,69 | | 5,72 | 25,62 | 77,69 |
| C-3 | 28 | 12165 | 6980 | 2346 | 15,0 | 30,0 | 176,71 | 14885 | 8,26 | 7,37 | 3,25 | 23,68 | 86,26 |
| C-4 | 28 | 12195 | 6990 | 2343 | 15,0 | 29,9 | 176,71 | 11660 | 6,47 | | 3,39 | 23,78 | 85,76 |
| C-5 | 56 | 12795 | 7370 | 2359 | 15,02 | 30,0 | 177,19 | 22145 | 12,26 | 13,20 | 2,74 | 23,28 | 88,21 |
| C-6 | 56 | 12760 | 7405 | 2383 | 15,20 | 30,0 | 181,46 | 26175 | 14,15 | | 1,74 | 22,48 | 92,25 |
| C-7 | 90 | 12725 | 7350 | 2367 | 15,1 | 30,4 | 179,08 | 29820 | 18,27 | 18,28 | 2,38 | 22,99 | 89,66 |
| C-8 | 90 | 12715 | 7330 | 2361 | 15,1 | 30,0 | 179,08 | 29840 | 18,28 | | 2,64 | 23,19 | 88,64 |
| C-9 | 365 | 12655 | 7300 | 2363 | - | - | - | - | - | - | 2,55 | 23,12 | 88,96 |
| C-10 | 365 | 12690 | 7320 | 2363 | - | - | - | - | - | | 2,56 | 23,13 | 88,95 |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |

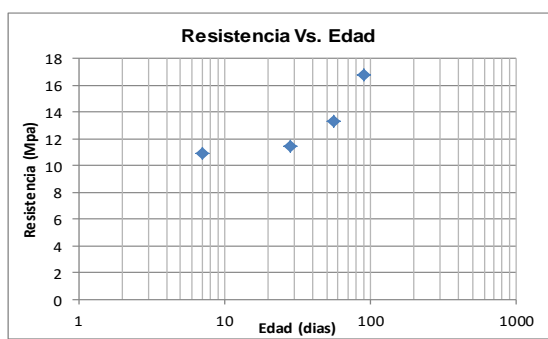


Anexo C.3- Diseño 3 (D-003)

DISEÑO DE MEZCLAS DE RCC D-003

Temperatura ambiente: 32,4 °C % de humedad inicial de la mezcla: 7,16
 Temperatura de la mezcla: 29,8 °C % de humedad final de la mezcla: 6,71

| N° cilindro | Edad en Dias | Peso SSS (gr) | Peso Sumergido (gr) | Densidad (Kg/m ³) | Diametro (cms) | Altura (cms) | Area (cm ²) | Carga Aplicada (Kg) | Resistencia (Mpa) | Resistencia Promedio (Mpa) | Vacíos | | |
|-------------|--------------|---------------|---------------------|-------------------------------|----------------|--------------|-------------------------|---------------------|-------------------|----------------------------|--------|-------|-------|
| | | | | | | | | | | | %Vt | %VAM | %Vf |
| C-1 | 7 | 12450 | 7190 | 2367 | 15,11 | 30,1 | 179,32 | 21183 | 11,58 | 10,89 | 3,85 | 23,62 | 83,70 |
| C-2 | 7 | 12555 | 7240 | 2362 | 15,09 | 30,0 | 178,84 | 18600 | 10,20 | | 4,04 | 23,77 | 82,99 |
| C-3 | 28 | 12550 | 7200 | 2346 | 14,9 | 29,9 | 174,37 | 20680 | 11,63 | 11,41 | 4,71 | 24,30 | 80,62 |
| C-4 | 28 | 12480 | 7180 | 2355 | 14,8 | 30,0 | 172,03 | 19635 | 11,19 | | 4,35 | 24,01 | 81,90 |
| C-5 | 56 | 12680 | 7370 | 2388 | 15,01 | 30,0 | 176,95 | 23915 | 13,25 | 13,31 | 3,00 | 22,94 | 86,94 |
| C-6 | 56 | 12520 | 7280 | 2389 | 15,09 | 30,0 | 178,84 | 24370 | 13,36 | | 2,94 | 22,90 | 87,16 |
| C-7 | 90 | 12790 | 7385 | 2366 | 15,02 | 30,05 | 177,2 | 24060,0 | 13,32 | 16,76 | 3,87 | 23,64 | 83,61 |
| C-8 | 90 | 12580 | 7295 | 2380 | 15,01 | 29,9 | 177,0 | 31695,0 | 20,26 | | 3,31 | 23,19 | 85,74 |
| C-9 | 365 | 12600 | 7275 | 2366 | - | - | - | - | - | - | 3,88 | 23,64 | 83,59 |
| C-10 | 365 | 12830 | 7395 | 2361 | - | - | - | - | - | - | 4,11 | 23,82 | 82,76 |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |



DOSIFICACIÓN 1 M³

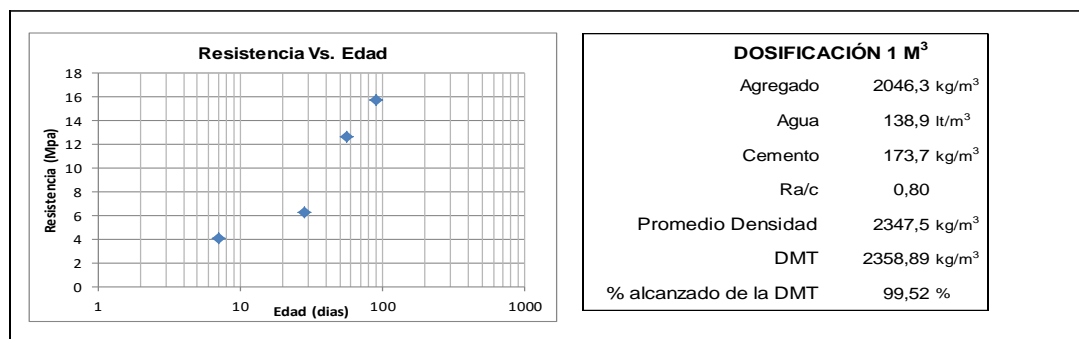
| | |
|-----------------------|---------------------------|
| Agregado | 1996,8 kg/m ³ |
| Agua | 130,6 lt/m ³ |
| Cemento | 261,2 kg/m ³ |
| Ra/c | 0,5 |
| Promedio Densidad | 2369,2 kg/m ³ |
| DMT | 2388,62 kg/m ³ |
| % alcanzado de la DMT | 99,19 % |

Anexo C.4- Diseño 4 (D-004)

DISEÑO DE MEZCLAS DE RCC D-004

Temperatura ambiente: 32,3 °C % de humedad inicial de la mezcla 8,17
 Temperatura de la mezcla: 30,1 °C % de humedad final de la mezcla 7,82

| N° cilindro | Edad en Dias | Peso SSS (gr) | Peso Sumergido (gr) | Densidad (Kg/m ³) | Diámetro (cms) | Altura (cms) | Area (cm ²) | Carga Aplicada (Kg) | Resistencia (Mpa) | Resistencia Promedio (Mpa) | Vacíos | | |
|-------------|--------------|---------------|---------------------|-------------------------------|----------------|--------------|-------------------------|---------------------|-------------------|----------------------------|--------|-------|-------|
| | | | | | | | | | | | %Vt | %VAM | %Vf |
| C-1 | 7 | 12500 | 7190 | 2354 | 15,12 | 30 | 179,55 | 7075 | 3,86 | 4,11 | 3,13 | 21,20 | 85,23 |
| C-2 | 7 | 12455 | 7175 | 2359 | 15,10 | 30 | 179,08 | 7955 | 4,36 | | 2,93 | 21,04 | 86,07 |
| C-3 | 28 | 12460 | 7125 | 2336 | 14,9 | 30,1 | 174,37 | 11095 | 6,24 | 6,26 | 3,89 | 21,82 | 82,16 |
| C-4 | 28 | 12435 | 7115 | 2337 | 14,9 | 29,9 | 174,37 | 11150 | 6,27 | | 3,82 | 21,76 | 82,46 |
| C-5 | 56 | 12465 | 7145 | 2343 | 15,01 | 30,0 | 176,95 | 19915 | 11,04 | 12,59 | 3,58 | 21,57 | 83,39 |
| C-6 | 56 | 12545 | 7220 | 2356 | 15,05 | 30,0 | 177,89 | 25670 | 14,15 | | 3,06 | 21,14 | 85,54 |
| C-7 | 90 | 12395 | 7115 | 2348 | 15,0 | 30,1 | 176,71 | 26020 | 15,58 | 15,70 | 3,40 | 21,42 | 84,13 |
| C-8 | 90 | 12620 | 7245 | 2348 | 14,9 | 30,2 | 174,37 | 25915 | 15,81 | | 3,38 | 21,41 | 84,19 |
| C-9 | 365 | 12390 | 7090 | 2338 | - | - | - | - | - | - | 3,80 | 21,75 | 82,52 |
| C-10 | 365 | 12615 | 7230 | 2343 | - | - | - | - | - | | 3,60 | 21,58 | 83,31 |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |



Observaciones

Al desencofrar no se observó unión entre capas
 No hubo variación de temperatura entre la culminación del mezclado y la culminación de la compactación
 Se alcanzó un 99,52 2358,89 kg/m³

Equipo empleado:
 Compresor SULLIVAN
 Bailarina TOKU JET-06

