

Estudio de materiales para determinación de mezclas de hormigón compactado con rodillo (HCR) para la presa Chontal.

Cristian M. Valarezo Tandazo, Walter D. Lojano Lucero, Ing. Hugo E. Eguez Álava
Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo Km 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-5863. Guayaquil-Ecuador
crimaval@espol.edu.ec, wlojano@espol.edu.ec, heguez@espol.edu.ec

Resumen.

El presente trabajo es un “estudio de materiales para la determinación de mezclas de hormigón compactado con rodillo (HCR) para la presa Chontal”. La primera parte consta de una descripción general del proyecto Chontal y se presenta información general acerca de la tecnología del HCR para presas.

En la segunda parte se realiza la caracterización de los materiales disponibles para la elaboración del HCR con el fin de comprobar su idoneidad, luego se realizan pruebas preliminares con cada tipo de cemento disponible, elaborando curvas densidad vs humedad con el objetivo de determinar el contenido óptimo de humedad. Luego se procede a estudiar las propiedades mecánicas del HCR mediante ensayos de resistencia mecánicas. Adicionalmente se realizaron estudios del tiempo de trabajabilidad del HCR, coeficiente de expansión térmica y conductividad térmica, permeabilidad al aire y correlaciones entre la velocidad ultrasónica y la resistencia mecánica.

En la tercera parte se realiza el análisis de los resultados, interpretando las correspondencias entre la resistencia mecánica del material y el tipo de cemento utilizado entre otros análisis, con los cuales se determinaron las dosificaciones y tipo de cemento más convenientes a ser utilizados en la elaboración del HCR para la presa Chontal.

Palabras claves: Estudio, Mezclas de Hormigón Compactado con Rodillo, Permeabilidad.

Abstract.

This work comprises the study of materials for determination of mixtures for roller compacted concrete (RCC) to be used for the construction of Chontal's dam. The first part consists of an overview of the project and it also presents general information about RCC dam technology.

The second part covers material's characterization to evaluate its suitability, and then few preliminary tests are performed using each type of cement available, making density vs. moisture correlations in order to determine the optimal moisture content. Later on, we proceed to study RCC's mechanical properties by testing mechanical strength. Further studies about other properties of RCC such as working time, coefficient of thermal expansion, thermal conductivity, air permeability, and correlations between ultrasonic velocity and mechanical strength were done to complement the studies on mechanical properties.

In third part, an analysis is done on results obtained by simple compression resistance vs time curves, indirect tensile strength vs. time curves, modulus of elasticity vs type of cement and other analysis as well, which allow us determine what is the most convenient proportion to be used in RCC preparation for Chontal's dam.

Keywords: Study, mixtures of Roller Compacted Concrete, permeability.

1. Introducción.

Para la construcción de la presa “Chontal”, los diseñadores han implementado el uso de HCR para el núcleo de la presa, siendo necesario realizar un estudio que permita determinar una dosificación adecuada

utilizando los agregados disponibles; en este trabajo se presenta el estudio de los materiales para el diseño del HCR, el mismo que se llevo a cabo en el laboratorio del Centro Técnico del

Hormigón (CTH) ubicado en la ciudad de Guayaquil. Para elaborar el HCR se dispuso de cuatro materiales provenientes de un proceso de trituración (piedra No 5, piedra No 67, arena triturada y filler) los mismos que provienen de una roca ígnea llamada granodiorita junto con una arena natural. En el estudio se utilizaron tres cementos Portland compuestos clasificados según la norma INEN 2380 como HE, GU y MH.

Los requerimientos de resistencia a compresión simple y de módulo de elasticidad para el HCR (a la edad de un año) que se utilizará en la presa “Chontal” son:

Resistencia a la compresión simple= 14MPa.

Módulo de elasticidad= 20GPa.

Este trabajo muestra detalladamente cada uno de las pruebas que se realizaron con el material disponible para la elaboración del HCR, junto con un análisis de los datos obtenidos, lo que permite entender el comportamiento del material y por lo tanto determinar cuál es la dosificación idónea para la presa Chontal.

1.1 Antecedentes

En el Ecuador se empezó a utilizar la tecnología del HCR a partir de 1991 para la construcción de pavimentos, siendo la avenida Leopoldo Carrera, ubicada en la ciudad de Guayaquil una de las primeras obras en la que se utilizó esta tecnología. Desde ese tiempo hasta la actualidad el HCR se ha utilizado mayormente para el diseño de pavimento y patios de estacionamiento, por lo cual el conocimiento de su uso en el diseño y construcción de presas es limitado.

1.2 Objetivos.

Estudiar las propiedades del agregado y del material cementante, para diseño de un hormigón con características adecuadas para el lugar y presentar el conocimiento adquirido a lo largo de esta investigación con el objetivo de aportar en el desarrollo de nuestro propio conocimiento acerca de la tecnología del HCR para presas.

1.3 Alcance.

Debido a que actualmente el conocimiento y la aplicación de la tecnología del HCR para presas en nuestro medio es limitada, se requiere una investigación minuciosa y detallada para determinar las características del material en estado fresco y endurecido, siendo este estudio uno de los primeros pasos en el camino del desarrollo de nuestro propio conocimiento acerca de esta tecnología.

2. Tecnología del hormigón compactado con rodillo para presas.

El código ACI define el HCR como “*un hormigón que en su estado no endurecido puede soportar un rodillo mientras es compactado*”. El HCR es un hormigón de revenimiento cero en el cono de Abrams, que genera un bajo calor por la hidratación del cemento y que está diseñado para utilizar equipos de movimiento de tierra para su trasportación, colocación y compactación; las presas construidas con este material toman la ventajas que tienen las presas de tierra sobre las presas de hormigón convencional en lo concerniente al proceso constructivo y al mismo tiempo se reducen los volúmenes de material debido a las altas resistencias que tiene el HCR con respecto a los materiales utilizados en presas de tierra.

2.1 Enfoques de diseño de dosificaciones del HCR

Alrededor del mundo se han utilizado exitosamente varios métodos de dosificación para el HCR, estos han variado dependiendo del diseño y requerimiento de las estructuras, disponibilidad de materiales y de los equipos utilizados para el mezclado y colocación del HCR. Entre los métodos de dosificaciones del HCR tenemos:

- ✓ El método del cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos.
- ✓ El método del alto contenido de pasta.
- ✓ El método para HCR con bajo contenido de cemento.
- ✓ El método japonés.

Para la presa “Chontal” se utiliza una mezcla con bajo contenido de cemento por lo que se ha implementado el método para HCR de bajo contenido de cemento.

3. Proyecto hidroeléctrico “chontal”.

El proyecto hidroeléctrico “Chontal” es el resultado de un estudio exhaustivo y detallado llevado a cabo en la cuenca del río Guayllabamba, una de las cuencas más grandes que tiene el Ecuador. La presa “Chontal” forma parte de un sistema integrado de varias centrales hidroeléctricas.

3.1 Características de la presa.

Las características generales de la presa Chontal se describen en la siguiente tabla.

Tabla 1 Características de la presa.

| Características de la presa | |
|-----------------------------|--------------------------|
| Potencia nominal | 194MW |
| Caudal de diseño | 180m ³ /s |
| Embalse | |
| Volumen total del embalsé | 53.000.000m ³ |
| Superficie máxima inundada | 151 Ha |
| Presa de HCR | |
| Altura máxima | 142m |
| Volumen de hormigón | 500.000m ³ |
| Evaluación de crecidas | |
| Crecida de diseño | 4000 m ³ /s |
| Periodo de retorno | 5000 años |
| Costo | \$388.000.000 |

4. Caracterización de los materiales empleados en la dosificación del HCR.

El primer pasó a seguir en cualquier estudio relacionado con el diseño de un hormigón es la caracterización de los materiales que se van a utilizar, pues el objetivo de verificar que los materiales disponibles son idóneos para utilizarse en hormigón además de ser necesario conocer ciertas características físicas de los materiales para poder dosificar. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de los agregados.

Tabla 2 Características de los Agregados.

| CARACTERISTICAS DEL AGREGADO | | | | | Norma |
|-------------------------------------|-------------|--------------|-----------------|---------------|----------------------|
| AGREGADOS | Piedra No 5 | Piedra No 67 | Arena Triturada | Arena Natural | |
| Modulo de finura | 7,7 | 6,7 | 3,2 | 2,9 | INEN 696 |
| Porcentaje de Finos | 0,2 | 0,2 | 6,1 | 8,1 | INEN 697 |
| Absorción (%) | 0,66 | 0,82 | 2,1 | 1,4 | INEN 856 |
| Densidad (SSS) (Kg/m ³) | 2737 | 2743 | 2579 | 2697 | INEN 857 |
| Impureza orgánica | - | - | NO | NO | INEN 855 |
| Resistencia a la Abrasión (%) | 31,5% | 36,5% | ND | ND | INEN 860 INEN 861 |

4.1 Reacción álcali-agregado.

Evaluar si los agregados disponibles son reactivos con los álcalis provenientes del cemento es fundamental, pues este tipo de reacción puede comprometer la estabilidad de la estructura; así pues para evaluar el potencial reactivo de los agregados disponibles (granodiorita, arena natural) se realizo primeramente pruebas de reactividad álcali-agregado utilizando el cemento tipo I acorde a los

procedimientos establecidos en la norma ASTM C1260, la cual nos permite conocer en 16 días si los agregados son potencialmente reactivos. A continuación se muestran los resultados obtenidos en estos ensayos.

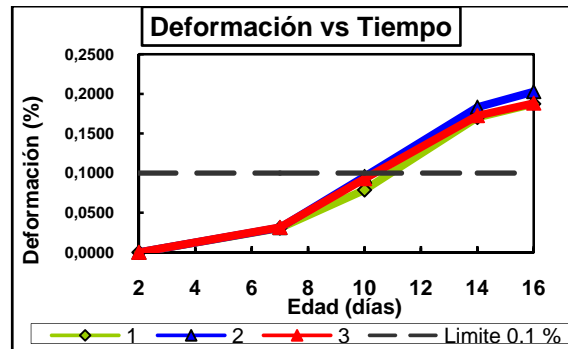


Figura 1 Ensayo de reactividad álcali-agregado. Granodiorita y cemento Holcim tipo I.

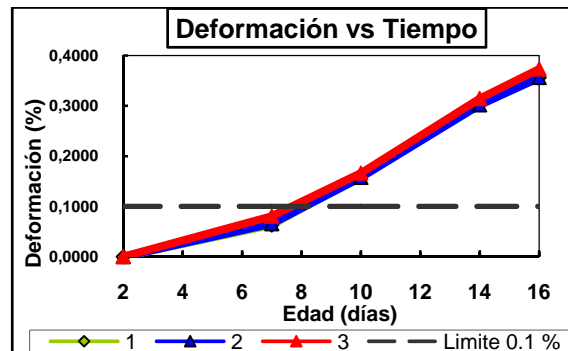


Figura 2 Ensayo de reactividad álcali-agregado. Arena natural y cemento Holcim tipo I.

Como se observa en las figuras 1 y 2 los agregados son potencialmente reactivos con el cemento tipo I, por lo cual se realizo pruebas utilizando los cementos puzolanicos tipo HE y GU, pues es conocido que la puzolana es un material que ayuda a mitigar la reacción álcali-agregado. A continuación se muestran los resultados obtenidos con el cemento HE.

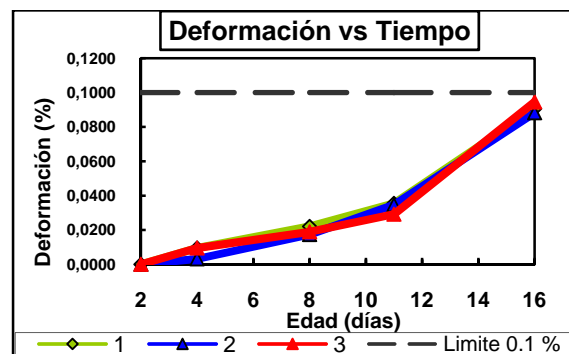


Figura 3 Ensayo de reactividad álcali-agregado (ASTM C 1567). Arena natural y cemento Holcim Tipo HE.

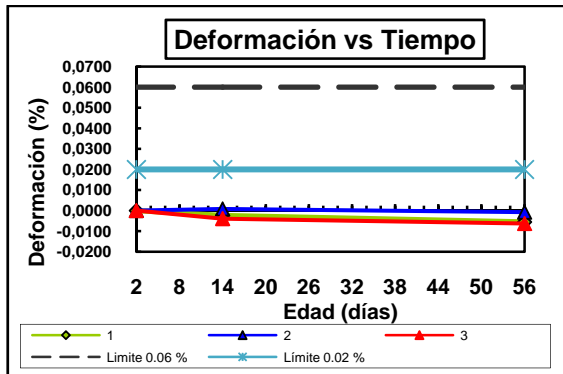


Figura 4 Ensayo de reactividad álcali-agregado, ASTM C 227 (INEN 867). Granodiorita y cemento Holcim Tipo HE.

Los resultados obtenidos muestran que al combinar tanto la granodiorita como la arena natural con el cemento HE (de menor adición puzolánica) se producen bajas expansiones y en el caso de la granodiorita el mortero más bien experimenta una ligera retracción la cual es propia de la hidratación del cemento. Estos resultados muestran que los agregados disponibles para este estudio no son reactivos con los cementos puzolánicos tipo HE, GU y MH siendo idóneos para utilizarse para el HCR pues estos también se encuentran libre de materia orgánica, finos plásticos y tienen una elevada densidad, baja absorción y una adecuada resistencia al impacto que es importante en HCR.

5. Pruebas preliminares de la dosificación.

Luego de comprobar la idoneidad de los materiales disponibles para la elaboración del HCR se procedió a realizar dosificaciones preliminares buscando los contenidos de agua que produzcan la máxima densidad en el material.

5.1 Dosificaciones propuestas.

A continuación se muestra el arreglo granulométrico propuesto para el HCR, el cual se ha enmarcado dentro de los límites granulométricos para HCR de bajo contenido de cemento [11].

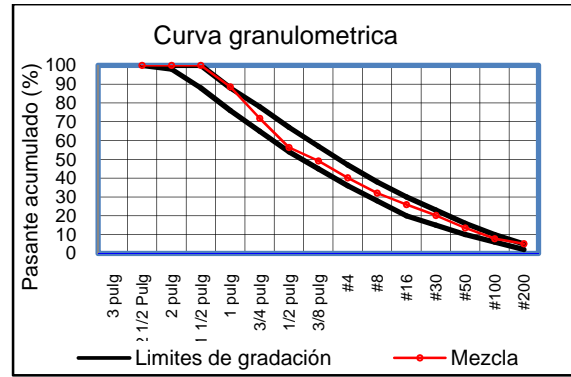


Figura 5 Gradación granulométrica propuesta para el HCR.

Utilizando el arreglo granular arriba propuesto se realizaron las siguientes dosificaciones preliminares en las cuales es necesario encontrar el contenido de agua que produzca la máxima densificación del material.

Tabla 3 Dosificaciones preliminares.

| Tipo de cemento | HE-GU-MH | | | Contenido de agregados |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------|
| | kg/m ³ | kg/m ³ | kg/m ³ | |
| Cemento | 105 | 95 | 75 | - |
| Agua | 118 | 118 | 118 | - |
| Piedra TM 38mm | 850 | 850 | 850 | 38% |
| Piedra TM 19mm | 358 | 358 | 358 | 16% |
| Arena triturada | 626 | 626 | 626 | 28% |
| Arena natural | 370 | 370 | 370 | 16,5% |
| Filler | 33 | 33 | 33 | 1,5% |

Para encontrar la humedad óptima (contenido de agua que produce la máxima densificación del material) se propuso elaborar curvas densidad vs humedad. A continuación se muestran las curvas desarrolladas para los cementos tipo HE y GU con contenidos de 95 kg/m³.

5.2 Curvas densidad vs humedad.

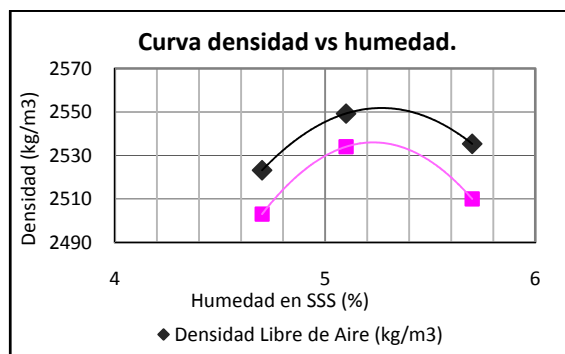


Figura 6 Cemento HE-95 kg/m³.

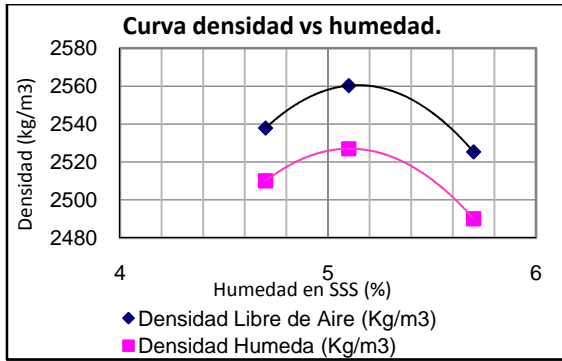


Figura 7 Cemento GU-95 kg/m³.

Los resultados obtenidos mostraron que la humedad óptima es aproximadamente del 5.1 % independientemente del tipo o contenido de cemento utilizado; determinados los contenidos óptimos de humedad en las mezclas se procedió a estudiar las propiedades mecánicas del HCR, cuyos procedimientos y resultados se describen a continuación.

6. Estudio de las propiedades mecánicas del HCR.

Para estudiar las propiedades mecánicas del HCR se propuso elaborar cilindros con cada dosificación propuesta, para ser ensayados a 3, 7, 14, 28, 56, 90, 180 días y a 365 días (el cual es simulado mediante un procedimiento de curado acelerado).

El objetivo del estudio de las propiedades mecánicas del HCR es:

- ✓ Determinar cuáles son las dosificaciones que cumplen con los requerimientos de resistencia y rigidez establecidos.
- ✓ Investigar el comportamiento del HCR con los diversos tipos y contenidos de cemento.
- ✓ Determinar las relaciones existentes entre las propiedades mecánicas del HCR.

6.1 Dosificaciones propuestas.

Tabla 4 Dosificaciones propuestas.

| Dosificación | Diseño (Kg/m ³) | | | | | | | |
|-----------------|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | D7 | D8 |
| Cemento HE | 75 | 95 | 105 | - | - | - | - | - |
| Cemento GU | - | - | - | 75 | 95 | 105 | - | - |
| Cemento MH | - | - | - | - | - | - | 75 | 95 |
| Agua | 125 | 125 | 122 | 122 | 122 | 122 | 120 | 122 |
| Piedra 38mm | 850 | 850 | 850 | 850 | 850 | 850 | 850 | 850 |
| Piedra 19mm | 358 | 358 | 358 | 358 | 358 | 358 | 358 | 358 |
| Arena triturada | 626 | 626 | 626 | 626 | 626 | 626 | 626 | 626 |
| Arena natural | 370 | 370 | 370 | 370 | 370 | 370 | 370 | 370 |
| Filler | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 |

6.2 Preparación de muestras.

Los cilindros de HCR se deben elaborar de manera que se logre la adecuada compactación del material y que los mismos no presenten oquedades. Para esto se procedió a elaborar los cilindros en tres capas de igual espesor, utilizando el apisonador circular de diámetro 75 mm, obteniéndose un tiempo promedio de compactación por capa de un minuto.



Figura 8 Proceso de compactación del HCR.

6.3. Parámetros a medir.

Previo a la elaboración de los cilindros se midió la trabajabilidad y la densidad de las mezclas, pues en hormigón es indispensable controlar estos parámetros.

6.4 Curado acelerado de muestras.

El curado acelerado es un procedimiento que consiste en someter al hormigón a condiciones de temperatura y humedad tales que aceleren las reacciones químicas entre el cemento y el agua. Este procedimiento se utilizó para simular un curado convencional de 365 días.

En el siguiente gráfico se describe el procedimiento:

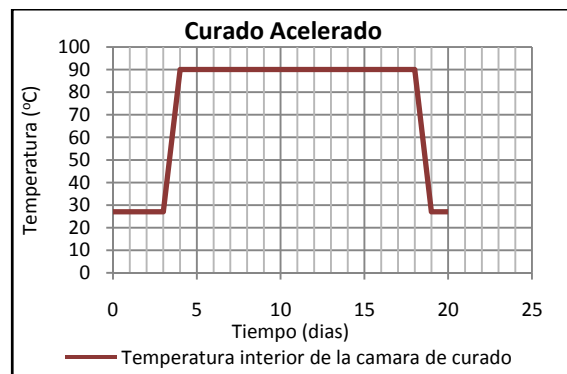


Figura 9 Procedimiento de curado acelerado.

El procedimiento consiste en sumergir los cilindros totalmente en agua dentro de una cámara de curado inmediatamente después de que estos cumplen 3 días de curado convencional, la cual se cierra herméticamente. Luego se procede a variar la temperatura interior de la cámara como se muestra la figura 9 (desde el día 3), proveyendo al mismo tiempo recirculación al agua en su interior y sin que exista pérdida de vapor; finalizado el procedimiento descrito los cilindros quedan listos para ser sometidos a los ensayos mecánicos previstos simulando un curado convencional de 365 días.

6.5. Ensayos mecánicos en las muestras.

Los ensayos mecánicos realizados a las muestras fueron de resistencia a la compresión simple ($f'c$), resistencia a la tracción indirecta (ft) y el modulo de elasticidad (E_c), los cuales gobiernan la selección de las mezclas. En sección de análisis de resultados se muestran los resultados obtenidos con 95 kg/m^3 de cemento.

7. Propiedades térmicas del HCR.

Debido a que las presas son estructuras masivas es necesario realizar estudios de comportamiento térmico con el fin de prevenir daños causados por esfuerzo de origen térmico. Para realizar este tipo de estudio es necesario conocer las propiedades térmicas del material. En este trabajo se determino la conductividad térmica y el coeficiente de dilatación térmica del HCR, los cuales serán utilizados por el diseñador para modelar el comportamiento térmico de la presa. A continuación se muestran los especímenes utilizados en los ensayos de dilatación térmica y conductividad térmica.



Figura 10 Barra para el ensayo de coeficiente de dilatación térmica.

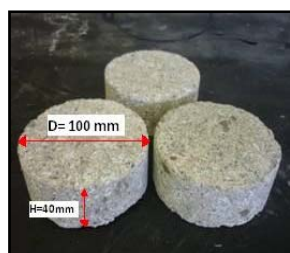


Figura 11 Discos para ensayo de conductividad térmica.

En las siguientes tablas se muestra los resultados obtenidos en los ensayos de coeficiente de dilatación térmica y conductividad térmica.

Tabla 5 Coeficiente de Dilatación Térmica del HCR

| | Coeficiente de dilatación térmica ($1/^\circ\text{C}$) |
|------------------|--|
| Probeta 1 | 6×10^{-6} |
| Probeta 2 | 8×10^{-6} |
| Promedio | 7×10^{-6} |

Tabla 6 Conductividad Térmica del HCR.

| | Conductividad térmica ($\text{J/s m } ^\circ\text{C}$) |
|-------------------|--|
| Cilindro 1 | 1.79 |
| Cilindro 2 | 1.71 |
| Promedio | 1.75 |

8. Tiempo de trabajabilidad del HCR.

En el proceso constructivo de la presa la compactación del material no se da inmediatamente después de su mezclado, pues es necesario un tiempo para su transportación desde la planta y su posterior colocación en el lugar de trabajo, el cual afectara el comportamiento del material en estado fresco y endurecido, debido principalmente a la pérdida de humedad que sufre la mezcla y a las reacciones químicas asociadas con el cemento (fraguado). Para determinar cómo afecta esta diferencia de tiempo al HCR se propuso elaborar cilindros cada cierto intervalo de tiempo hasta completar un total de 6:50 horas, para luego evaluar su resistencia mediante ensayos de compresión simple.

En la siguiente tabla se muestra las condiciones de temperatura y humedad bajo las cuales se llevo a cabo el estudio, las cuales son importantes de controlar pues estas afectan directamente la trabajabilidad el hormigón.

Tabla 7 Temperatura y humedad de trabajo.

| Cemento | Temperatura($^\circ\text{C}$) | Humedad (%) |
|-----------|---------------------------------|-------------|
| GU | 25 | 89 |
| HE | 23 | 94 |

Con los datos obtenidos en este estudio se procedió a realizar gráficos comparativos los cuales se encuentran en la sección de análisis de resultados.

9. Ensayos no destructivos en el HCR.

En el HCR se realizaron dos ensayos no destructivos; el ensayo de pulso ultrasónico se realizo

a todos las muestras previas a sujetarlas a los correspondientes ensayos mecánicos, mientras que para evaluar la permeabilidad al aire y durabilidad del HCR se utilizó el equipo de permeabilidad Torrent.

9.1 Ensayo de pulso ultrasónico.

El ensayo de pulso ultrasónico es un ensayo no destructivo que permite detectar las fisuras y vacíos existentes dentro de la estructura del hormigón además de permitir evaluar su homogeneidad.

9.1.1 Resultados del ensayo de velocidad de pulso ultrasónico.

En la siguiente tabla se muestra el promedio de los valores de velocidad de pulso ultrasónico obtenidos para el cemento tipo HE para las diversas edades de ensayo.

Tabla 8 Resultados obtenidos con el cemento HE.

| Edad | Contenido de cemento | | |
|--|----------------------|---------------------|----------------------|
| | 75Kg/m ³ | 95Kg/m ³ | 105Kg/m ³ |
| 3 | 3450 | 3724 | 3836 |
| 7 | 3571 | 3791 | 3950 |
| 14 | 4100 | 4239 | 4361 |
| 28 | 4320 | 4479 | 4566 |
| 56 | 4494 | 4569 | 4747 |
| 90 | 4563 | 4340 | 4797 |
| 180 | 4729 | 4830 | 4900 |
| Velocidad de pulso ultrasónico (promedio) | | | |

9.2 Ensayo de permeabilidad al aire en el HCR.

La permeabilidad al aire del hormigón se puede determinar mediante métodos no destructivos y es un parámetro que permite evaluar su durabilidad en medios agresivos donde se requiere hormigones que no permitan el paso de sustancias dañinas.

9.2.1 Resultados del ensayo.

Los datos obtenidos fueron tomados de tres muestras y los resultados se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 9 Resultado del ensayo de permeabilidad al aire.

| Muestra | KT (m ²) | L (cm) | Pi (mbar) |
|----------|---------------------------|--------|-----------|
| 1 | 0,033 x 10 ⁻¹⁶ | 12,5 | 29 |
| 2 | 0,022 x 10 ⁻¹⁶ | 10,4 | 39 |
| 3 | 0,028 x 10 ⁻¹⁶ | 12,2 | 32 |
| Promedio | 0,028 x 10 ⁻¹⁶ | 11,7 | 33 |

10. Análisis de resultados.

El siguiente histograma muestra (en azul) porcentualmente las densidades alcanzadas en los cilindros que se elaboraron para el estudio de las propiedades mecánicas. Los datos en rojo se obtuvieron mediante una prueba de bondad de ajuste con una distribución normal.

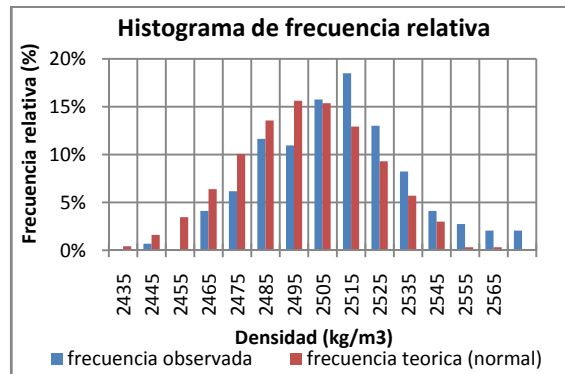


Figura 12 Densidades obtenidas en el estudio de las propiedades mecánicas del HCR.

El control de la densidad de los cilindros es necesario para verificar que se han alcanzado los grados de compactación requeridos. Los resultados muestran que la densidad en los cilindros se distribuye normalmente con una media de 2500 kg/m³ y una desviación estándar de 25 kg/m³ lo que demuestra la eficiencia del procedimiento utilizado para la elaboración de muestras.

Las siguiente grafica se muestra una comparacion de la resistencia a la compresion simple obtenida con 95 kg/m³ de cemento.

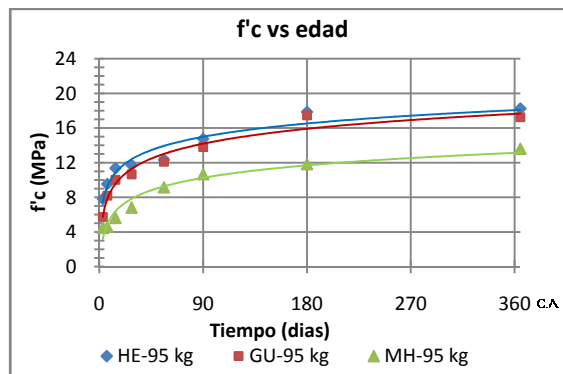


Figura 13 Resistencia a la compresion simple vs Tiempo. Contenido de cemento 95kg/m³.

Las siguiente grafica se muestra una comparacion de la resistencia a la traccion indirecta obtenida con 95 kg/m³ de cemento.

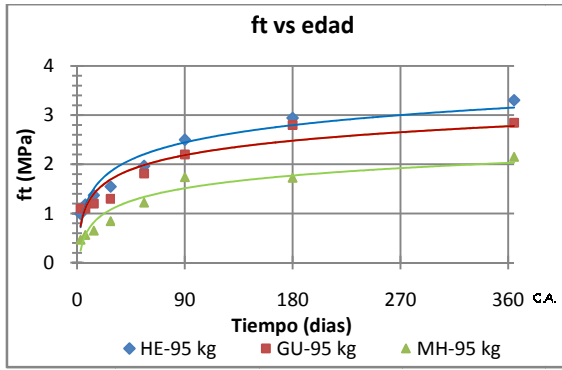


Figura 14 Resistencia a la tracción indirecta vs Tiempo. Contenido de cemento 95kg/m³

Las siguiente grafica se muestra una comparacion del modulo de elasticidad obtenido a los 28, 90, 180 y 365 dias (C. acelerado) para 95 kg/m³ de cemento.

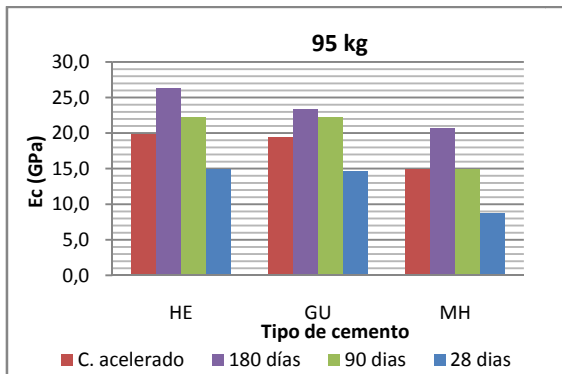


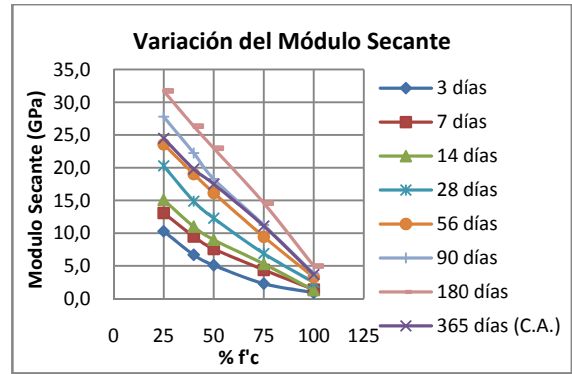
Figura 15 Modulo de elasticidad vs contenido de cemento. Contenido de cemento 95 kg/m³

Análisis de resultados.

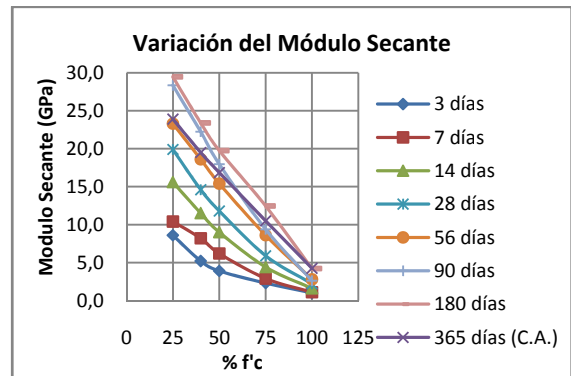
Los resultados muestran que los mayores valores de resistencia a la compresión simple, resistencia a la tracción indirecta y en modulo de elasticidad se obtienen con el cemento HE seguido por el cemento GU y finalmente por el cemento MH.

10.1 Modulo secante vs edad.

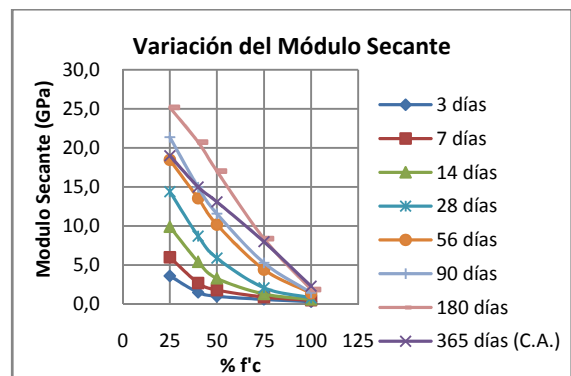
En los siguientes gráficos se muestra la variación del modulo secante con la edad para 95 kg/m³ de cemento.



a) Cemento HE-95kg/m³.



b) Cemento GU-95kg/m³.



c) Cemento MH-95kg/m³.

Figura 16 Variacion del modulo secante para 95 kg/m³ de cemento.

Análisis de resultados.

Como era de esperarse al igual que en modulo de elasticidad se tiene que con el cemento HE se obtienen los mayores valores de modulo secante seguido del cemento GU y MH. Además se observa que los módulos secantes obtenidos de las muestras sometidas al curado acelerado no siguen la misma tendencia que las curvas obtenidas de las muestras sujetas a un curado convencional.

10.2 Correlaciones obtenidas entre la resistencia a la compresión simple, modulo de elasticidad y resistencia a la tracción indirecta.

En los siguientes gráficos se muestran las correlaciones que se encontraron entre la resistencia a la compresión simple y otras propiedades mecánicas del HCR.

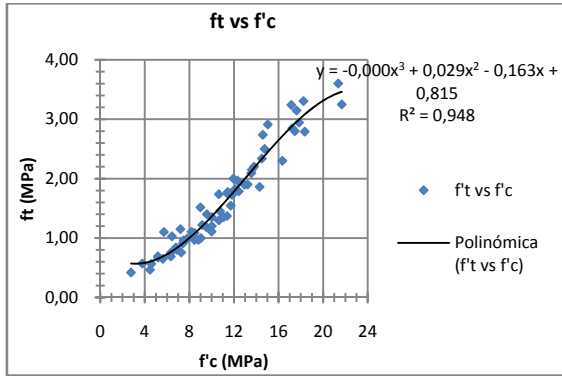


Figura 17 Resistencia a la tracción indirecta vs resistencia a la compresión simple.

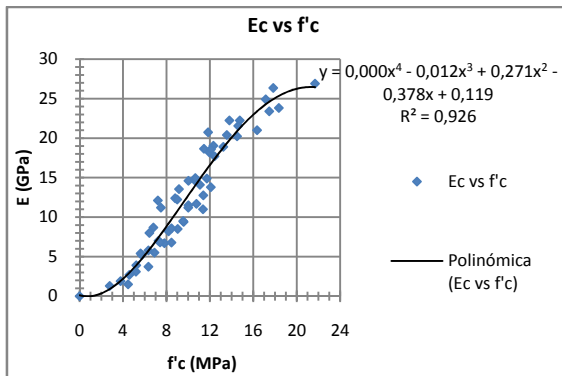


Figura 18 Modulo de elasticidad vs resistencia a la compresion simple.

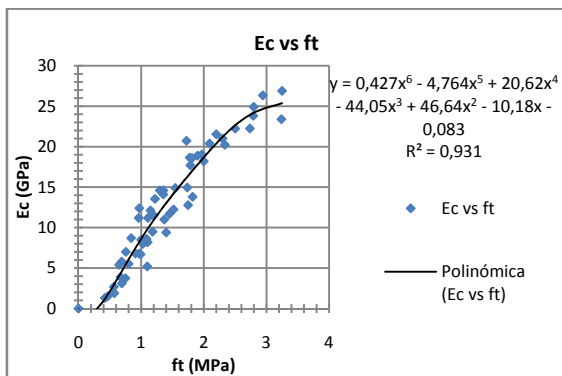


Figura 19 Modulo de elasticidad vs resistencia a la traccion indirecta.

Las graficas arriba mostradas revelan las fuertes correlaciones existentes entre las propiedades mecánicas del HCR las mismas que son independientes del tipo y contenido de cemento utilizado.

10.3 Ductilidad del HCR.

La siguiente grafica muestra los valores de ductilidad que se obtuvieron de las muestras de HCR sujetas al ensayo de resistencia a la compresion simple y modulo de elasticidad.

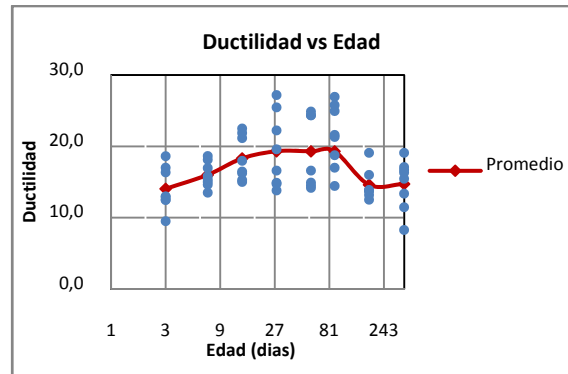


Figura 20 Ductilidad del HCR.

Análisis de resultados.

Como se puede apreciar en la grafica la ductilidad del material varia en el tiempo, así tenemos que la misma aumenta hasta los 28 días, luego se mantiene constante hasta los 90 días y finalmente decrecer a valores similares a los iniciales después de los 90 días pudiéndose asumir conservadoramente como 10 propósitos de diseño.

10.4 Curado convencional vs curado acelerado.

La siguiente grafica muestra para el cemento HE los resultados de resistencia a la compresión simple y modulo de elasticidad obtenidos en las muestras sujetas al procedimiento de curado acelerado como un múltiplo de los valores obtenidos en las muestras sujetas a un curado convencional de 180 días.

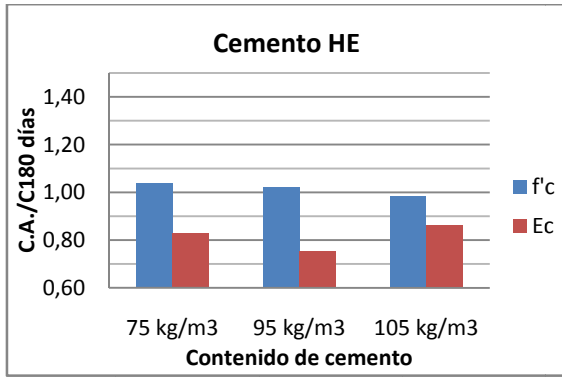


Figura 21 Comparación entre el curado acelerado y curado convencional (180 días) para resistencia a compresión simple y módulo de elasticidad.

Como se puede apreciar en la gráfica los valores de resistencia a la compresión simple obtenidos de los cilindros sujetos al curado acelerado son equivalentes a un curado convencional de 180 días para el cemento HE; sin embargo a 180 días de curado convencional los valores de módulo de elasticidad ya han sobrepasado los estimados mediante el procedimiento de curado acelerado, lo que muestra que los valores de modulo de elasticidad obtenidos mediante el procedimiento de curado acelerado son conservadores.

10.5 Tiempo de trabajabilidad del HCR.

La siguiente grafica muestra en funcion de la diferencia de tiempo entre el mezclado y la elaboracion de los cilindros, los resultados obtenidos de resistencia a la compresion simple a la edad de 7 dias.

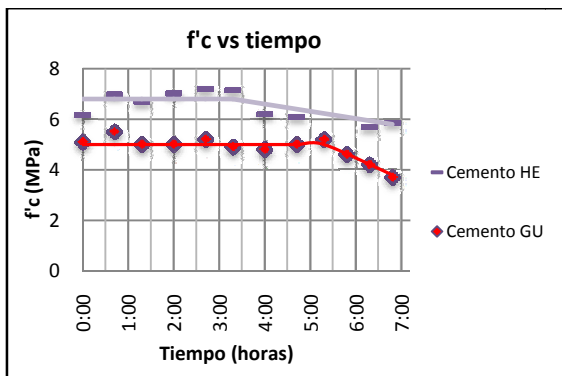
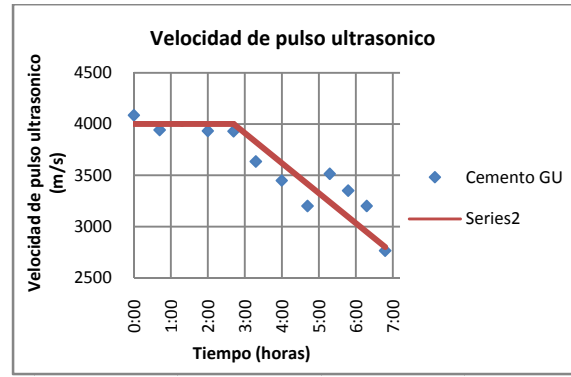
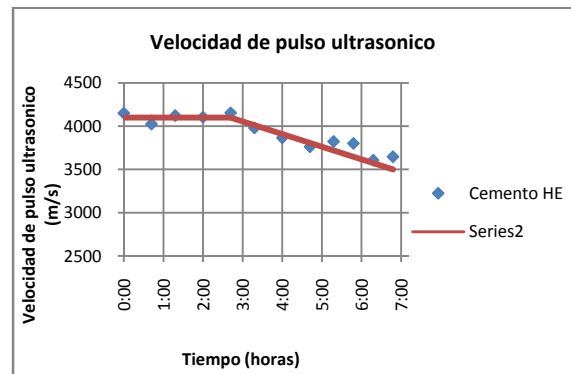


Figura 22 Resultados del estudio del tiempo de trabajabilidad del HCR.

A continuacion se muestran los valores de velocidad de pulso ultrasonico obtenidos de las muestras elaboradas para el estudio del tiempo de trabajabilidad.



a) Cemento GU-95 kg/m³.



a) Cemento HE-95 kg/m³.

Figura 23 Velocidad de pulso ultrasónico vs tiempo a la cual se elaboró los cilindros.

Análisis de resultados:

La figura 22 muestra que para el cemento HE la resistencia a la compresion simple se mantiene hasta 3 horas y media despues del mezclado y para el cemento GU hasta 5 horas despues del mezclado. Sin embargo el ensayo de pulso ultrasonico muestra que el tiempo maximo de trabajabilidad es de 2 horas independientemente del tipo de cemento.

10.6 Correlacion entre la velocidad de pulso ultrasonico y las propiedades mecanicas del HCR.

A continuacion se muestran las correlaciones obtenidas entre el ensayo de pulso ultrasonico y las propiedades mecanicas del HCR.

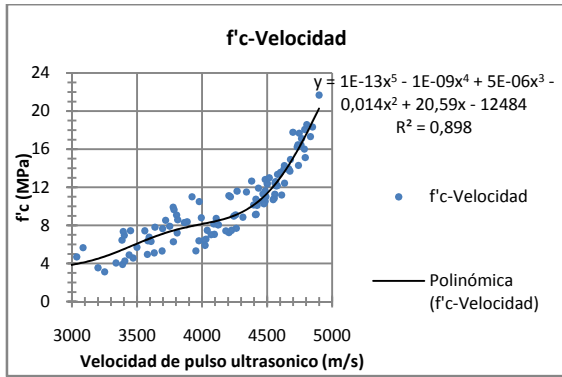


Figura 24 Correlacion entre resistencia a la compresion simple y velocidad de pulso ultrasonico.

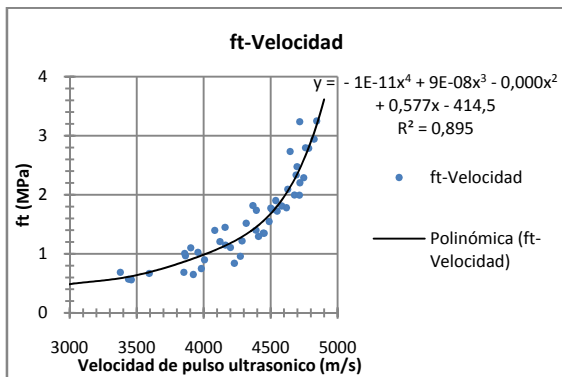


Figura. 25 Correlacion entre resistencia a la traccion indirecta y velocidad de pulso ultrasonico.

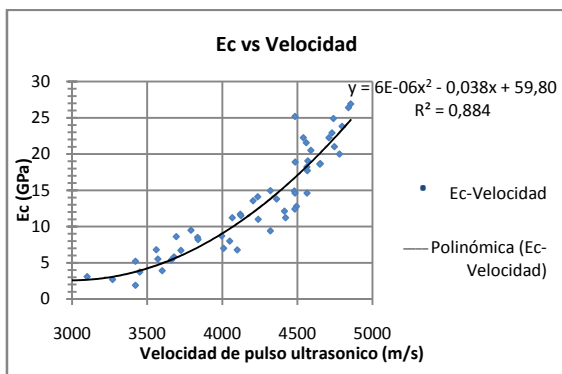


Figura 26 Correlacion entre modulo de elasticidad y velocidad de pulso ultrasonico.

Analisis de resultados.

En las correlaciones obtenidas entre la velocidad de pulso ultrasónico y las propiedades mecánicas del HCR se obtuvieron coeficientes de correlación mayores a 0.88 los cuales se consideran elevados tomando en cuenta que al momento de realizar el ensayo se aplica una presión variable a los transductores.

11. Conclusiones y recomendaciones.

La granodiorita es un material que tiene una alta densidad, baja absorción y una adecuada resistencia al impacto; en este estudio se comprobó que su combinación con los cementos tipo HE, GU, MH no provoca reactividad ante los álcalis del cemento por lo que es idónea para utilizarse en la elaboración del HCR. Así mismo la arena natural que se tiene disponible es un material libre de contaminantes orgánicos, constituida por finos no plásticos, bien gradada, y posee una baja absorción a pesar de tener un módulo de finura menor a 3, y cuya combinación con los cementos tipo HE, GU, MH tampoco reacciona ante los álcalis de los mismos, por lo que también se la considera idónea para utilizarse en la elaboración del HCR.

Para contenidos de cemento entre 75 y 105 kg/m³ y con el arreglo granular propuesto para los agregados, la humedad óptima para compactar el material, es alrededor del 5.1 %, independiente del tipo y contenido de cemento utilizado.

La utilización de filler con el fin de obtener un contenido de finos (material pasante el tamiz No 200) mayor al 5% (con respecto al peso de los agregados), ha logrado proveer una adecuada trabajabilidad a las mezclas de tal manera que en ningún cilindro se presentaron oquedades causadas por una deficiencia de finos.

Los procedimientos que se implementaron para la elaboración de los cilindros requeridos para el estudio de las propiedades mecánicas del HCR son los adecuados para trabajar con volúmenes de material relativamente grandes (160 dm³) pues las densidades obtenidas en los cilindros así lo corroboran; así mismo mediante el equipo de pulso ultrasónico se ha podido detectar las pequeñas variaciones en la proporción de vacíos existentes en los cilindros, lo cual muestra la exactitud con la cual el equipo de ultrasonido puede medir estas variaciones y por lo tanto la importancia del uso del equipo de pulso ultrasónico durante este tipo de investigaciones.

Todas las mezclas tienen la misma trabajabilidad con valores de tiempo t_1 de 20 segundos y valores de tiempo t_3 entre 70 y 80 segundos, parámetro que se encuentra dentro de los rangos de tiempo que se recomiendan para elaborar HCR de bajo contenido de cemento.

Para los cementos tipo HE y GU los valores de resistencia a la compresión simple obtenidos de cilindros sujetos al procedimiento de curado acelerado son equivalentes a los valores obtenidos de muestras sujetas a curado convencional de 180 días, sin embargo para el cemento tipo MH los valores obtenidos mediante curado acelerado son mayores a los obtenidos mediante curado convencional de 180 días.

Mediante el procedimiento de curado acelerado la resistencia a la compresión simple se estima con mayor precisión que el módulo de elasticidad, por lo que los valores de módulo de elasticidad obtenidos de muestras sujetas a este procedimiento deben tomarse como conservadores.

Se obtuvieron excelentes coeficientes de correlación para las correspondencias entre las propiedades mecánicas del HCR independientemente del tipo o contenido de cemento utilizado, lo que nos indica un adecuado procedimiento de elaboración y ensayo de especímenes en el laboratorio.

Los análisis de ductilidad muestran que el material tiene una ductilidad que oscila entre 10 y 25, la cual varía en el tiempo y cuyos máximos valores se alcanzan durante los 28 y 90 días después de elaborados los cilindros.

El tiempo máximo de trabajabilidad del HCR es de 2 horas bajo condiciones temperatura y humedad de 24 °C y 92% respectivamente, el cual se puede reducir dependiendo de las condiciones ambientales de trabajo; Los resultados de este estudio demuestran que la manera más adecuada de determinar el tiempo máximo de trabajabilidad del HCR es mediante el uso del equipo de pulso ultrasónico y no mediante ensayos de resistencia a la compresión simple.

Las correlaciones obtenidas entre la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión simple, módulo de elasticidad y resistencia a la tracción indirecta muestran un factor de correlación aceptable (mayor a 0.88) obteniéndose mayor precisión en las correlaciones para valores de velocidad de pulso ultrasónico mayores a 4500 m/s.

El coeficiente de dilatación térmica y la conductividad térmica del material son $7 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ y $1.75 \text{ J/s m}^\circ\text{C}$ respectivamente.

Los ensayos de permeabilidad al aire muestran que el material tiene un adecuado nivel de durabilidad en medios agresivos debido a que por su baja permeabilidad no permite el paso de sustancias dañinas.

Las mezclas preparadas con los cementos tipo HE y GU con contenidos de 75-95-105 kg/m^3 satisfacen los requerimientos de resistencia a la compresión simple y módulo de elasticidad establecidos para la presa "Chontal", por lo que ambos tipos de cemento pueden utilizarse para la elaboración del HCR; sin embargo la mayor eficiencia (valor de resistencia mecánica o módulo de elasticidad producido por cada kilogramo de cemento en la mezcla) se logra con el cemento tipo HE, lo cual lo convierte en el más

opcional para ser utilizado en la elaboración del HCR, dependiendo únicamente de la economía del proyecto.

11.1 Recomendaciones.

Realizar pruebas de campo con el material previo a su implementación en la construcción de la presa "Chontal" con el objetivo de realizar los ajustes necesarios a las mezclas; durante la construcción de la presa se debe aumentar el contenido de agua en un 0.3% sobre el contenido óptimo de humedad con el fin de prever las pérdidas de humedad que sufre el material producto de las condiciones ambientales de trabajo.

12. Agradecimiento.

A todos los que hicieron posible el desarrollo de este trabajo.

13. Bibliografía.

- [1] ACI Roller-Compacted Mass Concrete, ACI 207.5R-99 [Libro]. - 1999.
- [2] ASTM ASTM 04.02 Concrete and Aggregates. - 2011.
- [3] E.P. HIDROEQUINOCCIO Proyecto hidroeléctrico Chontal-Diseño de licitación [Informe]. - Quito, 2011.
- [4] HANSEN KENNETH y REINHARDT WILLIAM. Roller-Compacted Concrete Dams. aut. libro Hansen Kenneth y Reinhardt William.. - USA. : McGraw-Hill., 1991.
- [5] HIDROEQUINOCCIO [En línea]// HIDROEQUINOCCIO. - 2010. - MARTES de DICIEMBRE de 2011. - <http://heq.com.ec>.
- [6] INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACION (INEN) Normas técnicas ecuatorianas NTE INEN cemento, cal y yeso. - 2011.
- [7] INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACION (INEN) Normas técnicas ecuatorianas NTE INEN hormigón, áridos y morteros. - 2011.
- [8] LOPEZ ING. JOSE Procedimiento para el ensayo de curado acelerado aplicado al Concreto Compactado con Rodillo (CCR) [Informe]. - Guayaquil (Centro técnico del hormigón), 2011.
- [9] SARGENT-WELCH sargentwelch [En línea]. - 12 de septiembre de 2011. - <http://sargentwelch.com/info.asp?ii=449>.
- [10] SCHRADER Dr. ERNEST Chontal Dam RCC Production Schedule & Thermal Analysis [Informe]. - Guayaquil (Centro técnico del Hormigón), 2011.
- [11] SCHRADER Dr. ERNEST SpecGrad.doc [Informe]. - Guayaquil (Centro técnico del Hormigón), 2010.