

Diseño y caracterización de las propiedades mecánicas del hormigón compactado con rodillo (HCR) para la presa San Francisco

Luis D. Dávila Guamán, Héctor V. Cumbe Viñansaca, Ing. Hugo E. Egüez Álava.

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador

lddavila@espol.edu.ec, hcumbe@espol.edu.ec, heguez@espol.edu.ec

Resumen

El presente trabajo trata acerca del diseño y caracterización del Hormigón compactado con rodillo para la presa San Francisco, partiendo del análisis de los agregados que son utilizados en el mismo. Este tipo de hormigón presenta grandes ventajas en comparación con un hormigón convencional, una de las cuales es la gran economía en la obra debido a los bajos contenidos de cemento que pueden ser utilizados. Otra característica importante es el control de temperatura gracias a la baja generación de calor, producto de la hidratación del cemento en este tipo de hormigón, esta última es importante en obras como presas, donde el hormigón a emplearse es de carácter masivo.

Se elaboraron especímenes que se ensayaron a diferentes edades para determinar sus propiedades mecánicas y comportamiento estructural mediante ensayos de laboratorio, luego se comprobó el satisfactorio comportamiento de éste tipo de hormigón y sus excelentes propiedades. Se utilizó curado acelerado de cilindros para predecir las características del hormigón compactado con rodillo a un año, ya que este es el periodo para el cual un hormigón de este tipo se diseña.

Palabras Claves: *Dosificación, Hormigón Compactado con Rodillo, HCR, Presas, Relación agua/cemento.*

Abstract

This research discusses about design and characterization of Roller Compacted Concrete for the San Francisco dam, starting from the analysis of aggregates used. This type of concrete shows great advantages compared to conventional concrete, one of these is the great economy due to low content of cement. Another important feature is the temperature control, thanks to low heat generation, resulting from the hydration of low cement content in this type of concrete, the latter is important in this kind of work where the concrete type used is massive.

Specimens were prepared, which were then tested at different ages, proved the satisfactory performance of this type of concrete and its excellent mechanical properties. Accelerated curing was used to predict the characteristics of roller compacted concrete obtained after a year, since this is the period for which a slab of this type is designed.

Keywords: *Dosing, Roller-Compacted Concrete, RCC, Dams, w/c ratio.*

1. Introducción

El Hormigón compactado con rodillo (HCR) para presas surgió ante la necesidad de reducir los costos que demandaban éste tipo de proyectos utilizando hormigón convencional. Se consideraron las bondades del movimiento de tierras y se las combinó con los conocimientos del diseño de hormigón, y así se obtuvo el HCR cuyas principales ventajas son el menor costo de la obra y la velocidad de ejecución de la misma.

El HCR es actualmente el material más usado en el mundo para la construcción de presas de gravedad, tanto por sus ventajas como por su versatilidad frente a condiciones climáticas desfavorables como: zonas de alta pluviometría ó elevadas y baja temperaturas.

En el desarrollo de este trabajo se estudió a los agregados empleados en el hormigón compactado con Rodillo para la presa San Francisco, así como las propiedades mecánicas del hormigón mismo mediante una serie de ensayos que permitieron determinar la confiabilidad de la dosificación propuesta.

1.1. Antecedentes

El desperdicio de los recursos naturales está quedando de lado para dar paso al máximo aprovechamiento de los mismos, especialmente en la actualidad en que el tema ambiental está siendo muy considerado debido a los grandes niveles de contaminación provocados por la utilización de combustibles fósiles. Los países considerados grandes potencias económicas están buscando otras fuentes de energía como la eólica, solar e hidráulica.

La creciente demanda de energía eléctrica en el país ha creado la necesidad de implementar proyectos hidroeléctricos que ayuden a solventar esta insuficiencia, en especial si se cuenta con los recursos naturales. El Ecuador depende en gran parte de la energía que la central de Paute ubicada en las provincias del Cañar y Azuay produzca, y está continuamente limitado a su baja producción en épocas de estiaje.

Se propone entonces la construcción de presas de hormigón convencional, pero uno de los principales inconvenientes es el costo del proyecto debido a los grandes volúmenes de cemento que una obra de esta envergadura trae consigo, por lo que se ha planteado ya desde hace mucho la utilización de hormigón compactado con rodillo, el cual gracias a los bajos contenidos de cemento representa un ahorro significativo.

El correcto diseño y caracterización de un hormigón compactado con rodillo es entonces primordial para el buen desempeño de una presa de este tipo.

2. Descripción del hormigón compactado con rodillo (HCR) para presas

Es un hormigón de muy baja consistencia que alcanza valores elevados de densidad gracias a la compactación mediante rodillos vibratorios que recibe. Combina características como la tecnología del hormigón con el movimiento de tierras en lo que se refiere a transporte, colocación, compactación y control de calidad.



Figura 1. Transporte, colocación y compactación del HCR

Es elaborado con equipos de fabricación continua y transportado en camiones tolva, ya en el terreno se esparce con bulldozers para su posterior compactación.

Se realiza control de calidad evaluando la densidad de campo mediante un densímetro nuclear y comparando ésta con la obtenida en laboratorio.

3. Características mecánicas de los agregados

Los agregados utilizados para el diseño de Hormigón compactado con rodillo provienen de zonas cercanas al lugar donde se va a efectuar el proyecto, esto es entre las provincias de Azuay y el Oro, aproximadamente a 92 Km de Cuenca.

Se contó con cuatro tipos de agregados dos gruesos y dos finos. Los gruesos fueron de tamaño máximo de agregado (TMA) 38 y 19 mm y los finos fueron arena triturada y arena natural.

Se evaluaron las características de los agregados empleados en el diseño de este tipo de hormigón. Los ensayos realizados fueron de acuerdo a las normas ASTM e INEN.

- Peso específico y absorción (ASTM C 127 – ASTM C 128, INEN 856 – INEN 857).
- Granulometría (ASTM C 136, INEN 696).
- Porcentaje de finos (ASTM C 117, INEN 697).
- Abrasión de los ángeles (ASTM C 535 – ASTM C 131, INEN 860 – INEN 861).
- Terrones de Arcilla (ASTM C 142, INEN 698).
- Materia orgánica (ASTM C 40, INEN 855).
- Reacción álcali Agregado (ASTM C 1260)

4. Propiedades del Hormigón compactado con rodillo en estado fresco.

Es importante que antes de la realización de las probetas cilíndricas a muestrear se constaten las propiedades del hormigón elaborado, para ello se determinó la densidad y el contenido de aire atrapado de diseño. La calidad del HCR dependerá en gran parte de la densidad, ya que ésta se encuentra directamente relacionada con la resistencia, así en caso de obtenerse un valor bajo para ésta propiedad deberán tomarse medidas correctivas a fin de evitar bajas resistencias.

5. Características mecánicas del Hormigón compactado con rodillo (HCR)

La presa San Francisco establece como requerimientos mínimo una resistencia a la compresión de 14 MPA y un módulo de Elasticidad de 20 GPa.

Al igual que los agregados, las características mecánicas del HCR fueron evaluadas de acuerdo a las normas ASTM e INEN.

- Resistencia a la compresión. (ASTM C 39, INEN 1573).
- Resistencia a la tracción por compresión diametral (ASTM C 496, INEN 1845).
- Módulo de elasticidad y módulo secante (ASTM C 469, INEN 1850).
- Conductividad térmica.
- Coeficiente de dilatación térmica (ASTM C 157).
- Velocidad de pulso ultrasónico (ASTM C 597).
- Tiempo de trabajabilidad.
- Ductilidad.

6. Procedimientos experimentales.

Para proceder a elaborar las probetas de hormigón compactado con rodillo primero se establecieron las características de los agregados, los tipos de cemento a utilizar y la calidad del agua a emplear. Las propiedades de los agregados se detallan a continuación:

Tabla 1. Propiedades de los agregados empleados

Material	Propiedades					
	Densidad sss (kg/m ³)	Absorción (%)	Presencia de Materia Orgánica	Abrasión de los Ángeles (%)	Terrones de Arcilla y partículas deleznales (%)	Material más fino que 75 µm (%)
Piedra 38 mm	2687	1,05	---	13,73	0,74	0,60
Piedra 19 mm	2633	1,53	---	19,1	0,18	0,80
Arena Triturada	2588	2,19	No	---	1,10	7,00
Arena Natural	2529	3,52	No	---	1,40	5,60

Se efectuó el ensayo de álcali agregado según la norma ASTM C 1260 y en el mismo se pudo observar que la arena natural presentaba problemas con el cemento tipo I, por ello se decidió no utilizar este tipo de cemento en las dosificaciones y optar por cementos tipo GU y tipo HE.

En la figura 2 las líneas de colores representan las barras ensayadas y se nota que todas sobrepasan el límite de expansión fijado en 0.1% el cual está representado por la línea segmentada.

El agua a emplear en las dosificaciones es agua potable, por lo cual no se le realizaron ensayos de control de calidad a la misma.

Con los materiales aptos para la realización de los ensayos se realizaron las dosificaciones, estableciendo primeramente una combinación granulométrica con los agregados disponibles.

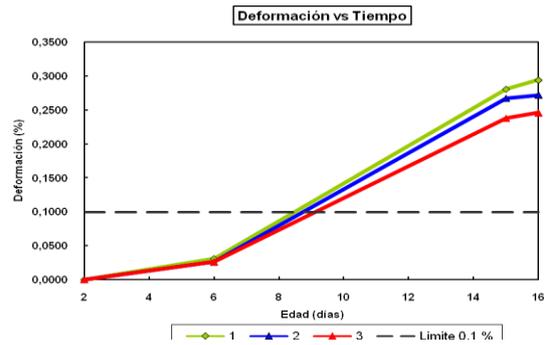


Figura 2. Curvas deformación vs tiempo para la arena natural y cemento tipo I

La banda granulométrica para este tipo de hormigón fue dada por recomendación del Ing. Ernest Shrader consultor del proyecto. La curva obtenida fue la siguiente:

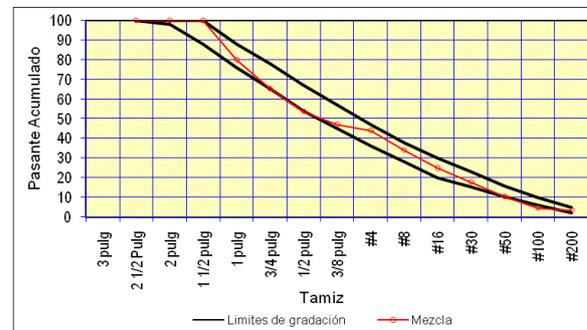


Figura 3. Granulometría compuesta usando cuatro agregados.

En la figura 3 se puede notar que la curva tiene un escalón por ello se decidió probar una segunda combinación incluyendo una gravilla de 12.5 mm (1/2 pulgada) para tratar de suavizar la misma. Sin embargo la inclusión de este agregado dependerá de los resultados obtenidos al evaluar probetas de HCR.

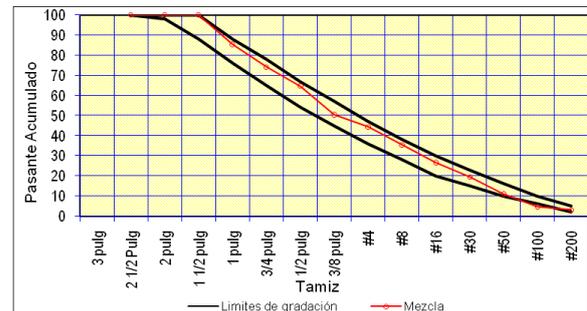


Figura 4. Granulometría compuesta incluyendo la gravilla de 12.5 mm

Establecidos dos arreglos granulométricos se realizaron una serie de pruebas pequeñas de HCR con la finalidad de establecer el desempeño de cada combinación granulométrica y determinar la humedad óptima.

Las probetas cilíndricas para caracterizar el hormigón fueron de dimensiones 150 x 300 mm de diámetro y altura respectivamente, debido a la restricción de que el diámetro del molde metálico tiene que ser como mínimo tres veces el tamaño máximo del agregado (TMA) el mismo que para la presa San Francisco es de 38 mm.

Cada cilindro se compacto en capas de igual espesor con un martillo vibratorio, el cual simula el efecto de rodillo en obra.



Figura 5. Martillos de compactación y moldes metálicos

Para el ensayo de coeficiente de dilatación térmica se elaboraron viguetas de dimensiones 102 x 102 x 286 mm. Considerando las menores dimensiones del elemento se redujo el TMA a 19 mm, pero conservando las proporciones entre pasta y agregados. Fue necesario realizar una nueva dosificación en la que se tomara en cuenta el nuevo arreglo granulométrico.

Las curvas densidad-humedad producto de la elaboración de especímenes de hormigón compactado con rodillo fueron las siguientes:

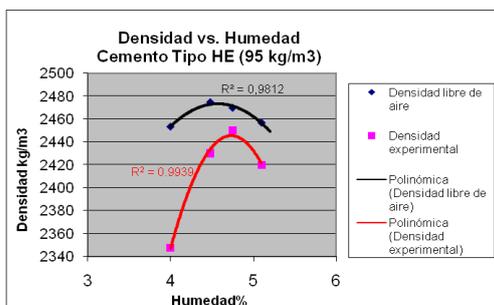


Figura 6. Curva densidad Humedad con 95 kg/m³ de cemento tipo HE, sin incluir gravilla

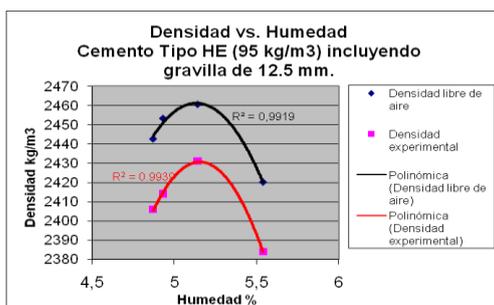


Figura 7. Curva densidad Humedad con 95 kg/m³ de cemento tipo HE, incluyendo gravilla de 12.5 mm

Al comparar las dos figuras anteriores se concluye que las mayores resistencias se logran con el primer arreglo granulométrico y se establece el contenido de agua libre en 4.75%

Con el valor anterior fijo, se comenzó la elaboración de pruebas a gran escala para una mejor caracterización del HCR, para ello se establecieron las dosificaciones detalladas en la siguiente tabla, pero se decidió utilizar un contenido de agua libre aumentado en un 0.3% para evitar problemas de viento y temperatura que se presentan en obra.

Tabla 2. Dosificaciones propuestas

	Diseños (kg/m ³)					
	1	2	3	4	5	6
Cemento GU				105,0	95,0	75,0
Cemento HE	105,0	95,0	75,0			
Agua	118,5	116,0	115,0	120,0	119,0	118,5
Piedra 38 mm	602,0	600,0	600,0	602,0	602,0	602,0
Piedra 19 mm	602,0	600,0	600,0	602,0	602,0	602,0
Arena Triturada	656,0	655,0	655,0	656,0	656,0	656,0
Arena Natural	328,0	327,0	327,0	328,0	328,0	328,0

Para la determinación de conductividad térmica se extrajeron núcleos de 100 mm de diámetro los mismos que luego se cortaron con un espesor de 40 mm para poder realizar el ensayo.

7. Resultados

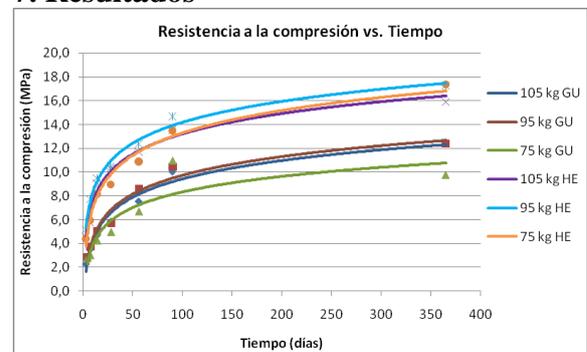


Figura 8. Resistencia a la compresión vs tiempo

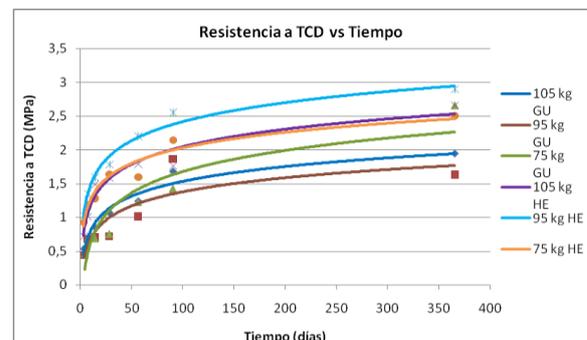


Figura 9. Resistencia a la tracción por compresión diametral vs tiempo

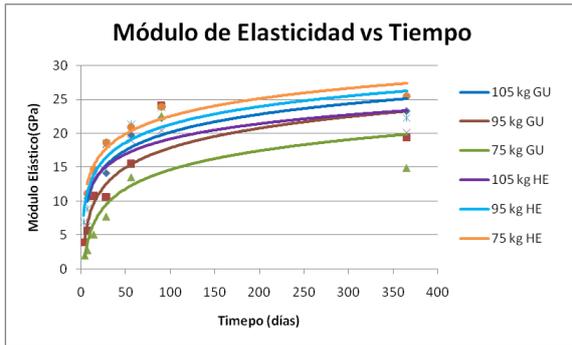


Figura 10. Módulo de Elasticidad vs tiempo

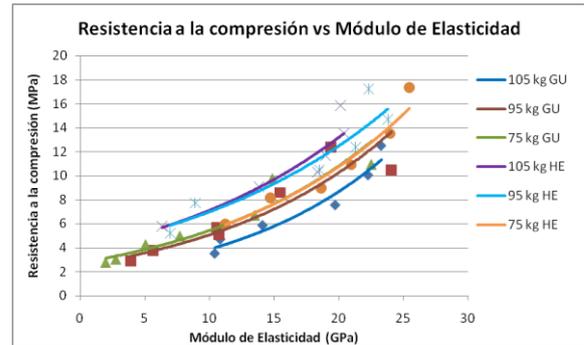


Figura 14. Resistencia a la compresión vs Módulo de Elasticidad

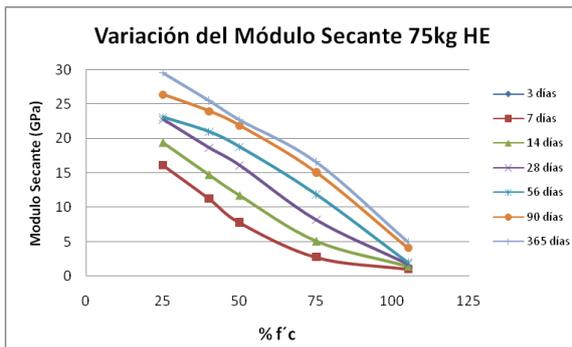


Figura 11. Variación del Módulo Secante para la dosificación con 75 kg de cemento tipo HE

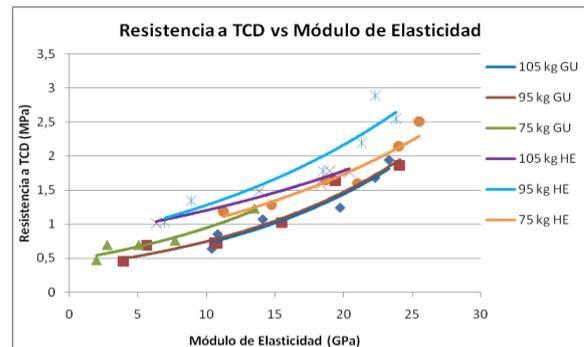


Figura 15. Resistencia a la tracción por compresión diametral vs Módulo de Elasticidad

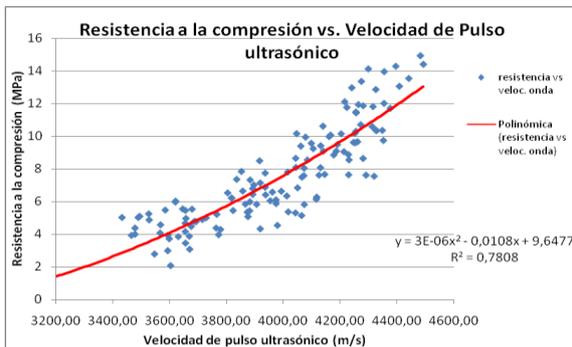


Figura 12. Resistencia a la compresión vs Velocidad de pulso ultrasónico

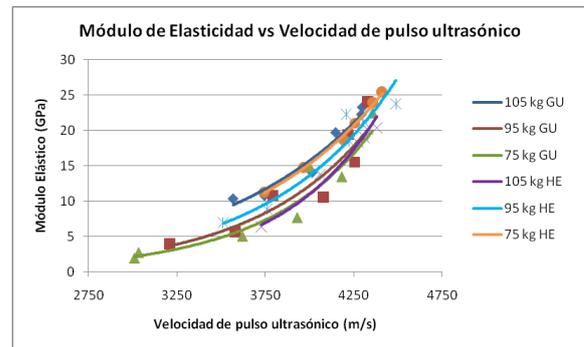


Figura 16. Módulo de Elasticidad vs Velocidad de pulso ultrasónico

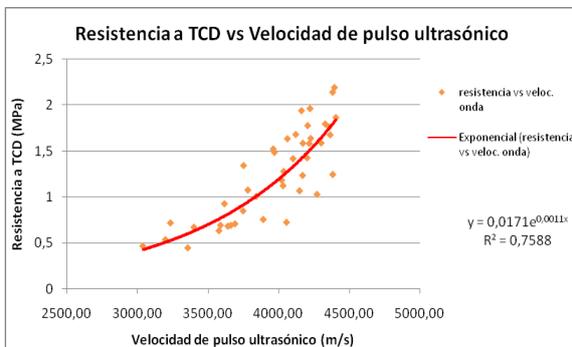


Figura 13. Resistencia a la tracción por compresión diametral vs Velocidad de pulso ultrasónico

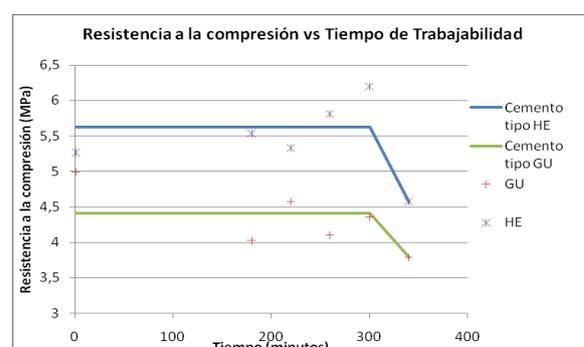


Figura 17. Resistencia a la compresión diametral vs Tiempo de Trabajabilidad

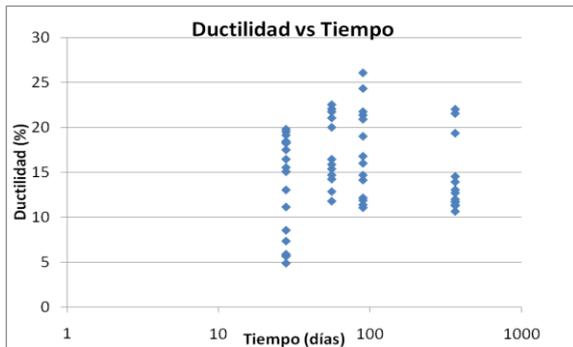


Figura 18. Ductilidad vs Tiempo

Tabla 5. Valores de coeficiente de determinación para distintas relaciones

Ensayo	Coefficiente de determinación
Resistencia a la compresión vs Módulo de Elasticidad	
105 Kg HE	0,9112
95 Kg HE	0,9022
75 Kg HE	0,9573
105 Kg GU	0,9423
95 Kg GU	0,9008
75 Kg GU	0,9276
Resistencia a la tracción por compresión diametral vs Módulo de Elasticidad	
105 Kg HE	0,9529
95 Kg HE	0,9212
75 Kg HE	0,9260
105 Kg GU	0,9196
95 Kg GU	0,9396
75 Kg GU	0,8675
Módulo de Elasticidad vs Velocidad de pulso ultrasónico	
105 Kg HE	0,9770
95 Kg HE	0,9531
75 Kg HE	0,9961
105 Kg GU	0,9459
95 Kg GU	0,9233
75 Kg GU	0,9500

Tabla 3. Valores obtenidos de coeficiente de dilatación térmica

Coeficiente de Dilatación Térmica	
Muestra 1	$7 \times 10^{-6} (1/^{\circ}\text{C})$
Muestra 2	$7 \times 10^{-6} (1/^{\circ}\text{C})$

Tabla 4. Valores obtenidos de conductividad térmica

Conductividad Térmica	
Muestra 1	1.66 J/(s m °C)
Muestra 2	1.66 J/(s m °C)

8. Análisis de resultados

Los ensayos efectuados a los agregados tales como: abrasión de los ángeles, materia orgánica, terrones de arcilla y partículas inferiores a $75 \mu\text{m}$, demostraron su idoneidad para el uso de los mismos en hormigón.

Para las pruebas a mayor escala se decidió utilizar la composición granulométrica de cuatro agregados, ya que las curvas densidad-humedad demostraron que se obtienen mayores densidades, las cuales repercuten en mayores resistencias.

Los diseños realizados con cemento tipo HE mostraron mayores resistencias a edades temprana la cual es una característica de este tipo de cemento, así como en las predicciones a un año usando curado acelerado.

Los diseños efectuados con cemento tipo HE cumplieron con la resistencia a la compresión requisito de la presa San Francisco ($f'c=14 \text{ MPa}$) a diferencia de los diseños con cemento tipo GU los mismos que tuvieron un buen desempeño pero deberán ser usados cuando los requerimientos mecánicos sean menores.

Todos los diseños reportaron un valor de módulo de elasticidad superior a los 20 GPa a un año, éste valor es el segundo requisito que debe cumplir el Hormigón compactado con rodillo para el Proyecto San Francisco.

Para las correlaciones entre las propiedades mecánicas del HCR y Velocidad de pulso ultrasónico los valores de coeficiente de determinación (R^2) obtenidos son mayores a 0.92 (Ver Tabla 5) a excepción de los análisis para resistencia a la compresión y resistencia a la tracción por compresión diametral, lo cual demuestra una buena relación entre los resultados obtenidos por medio de un ensayo destructivo y uno no destructivo respectivamente. El coeficiente de determinación representa el porcentaje de variación entre las variables analizadas.

Para las correlaciones como: Resistencia a la compresión-Módulo de Elasticidad y Resistencia a la tracción por compresión diametral-Módulo de Elasticidad, los valores de coeficiente de determinación son muy buenos, todos por encima de 0.90 exceptuando un solo resultado por debajo de este valor (0.86), esto se estableció para cada tipo y cantidad de cemento, el análisis puede ayudar a predecir el valor de módulo de elasticidad que se alcanzará para una determinada resistencia y viceversa en diseños de HCR futuros. (El detalle de este análisis se encuentra en la Tabla 5).

El valor de Coeficiente de dilatación térmica para HCR resultó inferior a los reportados para Hormigón convencional, esto se debe al bajo contenido cementicio de este tipo de hormigón. Este parámetro es importante porque indica las expansiones que se

producen en el hormigón al variar la temperatura un grado centígrado.

Los resultados de conductividad térmica para el Hormigón compactado con rodillo son mayores a los que se han reportado para Hormigón liviano, cumpliéndose la premisa de que esta propiedad es inversamente proporcional a la densidad del material. La conductividad térmica servirá para establecer la rapidez con que se disipa el calor del núcleo de la presa por conducción.

Los resultados determinaron que la trabajabilidad del hormigón compactado con rodillo a las cinco horas con cuarenta minutos se ha reducido en un 81% y 86% para cementos tipo HE y GU respectivamente.

Los resultados demostraron que los valores de ductilidad aumentan con el tiempo, exceptuando los resultados a un año donde no quedo claramente establecida esta tendencia. La ductilidad indica la relación entre la deformación última y la deformación en el límite elástico.

9. Conclusiones y Recomendaciones

Los agregados empleados para los ensayos presentan excelentes propiedades, exceptuando la arena natural la cual en la prueba Álcali agregado (ASTM C 1260) presentó problemas con el cemento tipo I, por Aquello se decidió utilizar cementos de composición puzolánica como los son los cementos tipo GU y HE.

El buen desempeño del hormigón compactado con rodillo dependerá de que las características de los agregados en obra sean iguales a las demostradas en laboratorio.

El menor porcentaje de aire atrapado asegura mayores resistencias y esto se logra con un buen tiempo de compactación para alcanzar las densidades de diseño.

El contenido de agua libre respecto al peso total del HCR (incluyendo el agua) se estableció en 4.75%, este valor se obtuvo del análisis de las curvas densidad-humedad, pero en obra se recomienda aumentar la misma en alrededor del 0.3 % esto con la finalidad de contrarrestar las pérdidas por viento y temperatura.

Los resultados de las correlaciones efectuadas con la prueba de velocidad de pulso ultrasónico son buenos, sin embargo se recomienda que la superficie sobre la cual se colocan los transductores sea lo menos rugosa posible y el empleo de abundante gel en la superficie de contacto.

Con base en el análisis de los resultados, los diseños idóneos de HCR para el uso en el proyecto San Francisco son los que contienen cemento tipo HE en las proporciones indicadas (75, 90 ó 105 kg de cemento por metro cúbico de hormigón).

10. Agradecimientos

A Dios, a nuestro director de tesis Ing. Hugo Egüez Álava por su incommensurable apoyo en la realización de éste trabajo y al personal del Centro Técnico del Hormigón quienes de uno u otro modo colaboraron en el desarrollo de trabajo.

11. Referencias

- [1] INEN 695 Áridos para Hormigón. Muestreo
- [2] INEN 696 Áridos para hormigón. Determinación de la Granulometría.
- [3] INEN 697 Áridos para hormigón. Determinación de los Materiales más finos que 75um.
- [4] INEN 862 Áridos para hormigón. Determinación del contenido total de humedad.
- [5] INEN 856 Árido fino para hormigón. Determinación de la densidad y absorción del agua.
- [6] INEN 857 Árido grueso para hormigón. Determinación de la densidad y absorción del agua.
- [7] INEN 858 Áridos para hormigón. Determinación de la Masa Unitaria y del Porcentaje de Huecos
- [8] ASTM C 33 – 03 Standard Specifications for Concrete Aggregates.
- [9] ASTM C 136 – 06 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.
- [10] ASTM C 117 – 04 Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (N. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing.
- [11] ASTM C 127 – 07 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregates.
- [12] ASTM C 128 – 07a Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregates.
- [13] ASTM C 131 – 06 Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.
- [14] ASTM C 39 – 01 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- [15] ASTM C617 - 98(2003) Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens.
- [16] ASTM C496 / C496M - 04e1 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- [17] ASTM C 469 – 94 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression.
- [18] Instituto Salvadoreño del Concreto, "Presas de Concreto Compactado con Rodillo"