

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

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

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del título de:

INGENIERO CIVIL

Presentada por:

LUIS DANILO DÁVILA GUAMÁN

HÉCTOR VICENTE CUMBE VIÑANSACA

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2011

AGRADECIMIENTO

A Dios, a nuestro director de tesis Ing. Hugo Egüez Álava por su inconmensurable 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.

DEDICATORIA

A MIS PADRES: EDISON
DÁVILA TORRES Y FANNY
GUAMÁN ANDRADE POR
SER EJEMPLO DE
SUPERACIÓN Y APOYO
EN TODO MOMENTO.

Y A MIS HERMANOS POR
LA MOTIVACIÓN
BRINDADA.

DEDICATORIA

A MIS PADRES HECTOR
CUMBE NACIPUCHA,
ROSA VIÑANASACA
CRIOLLO Y A MIS
HERMANOS, POR DARME
SU APOYO Y CONFIANZA
POR SOBRE TODAS LAS
COSAS.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Gastón Proaño
SUBDECANO DE LA FICT

Ing. Hugo Egüez Álava
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Eduardo Santos B
VOCAL

Ing. Cristian Velasco
VOCAL SUPLENTE

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

Luis Danilo Dávila Guamán

Héctor Vicente Cumbe Viñansaca

RESUMEN

El presente trabajo trata acerca del diseño y caracterización del Hormigón compactado con rodillo para presas, 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 de este tipo de hormigón, esta última resulta de vital importancia en obras de este tipo donde el hormigón a emplearse es de tipo masivo.

Se elaboraron especímenes 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 mecánicas.

Para determinar la dosificación idónea se realizaron muestras en búsqueda de la humedad óptima y luego se aumentó la cantidad de agua necesaria para obtener la misma debido a que en el campo se presentarán pérdidas de ésta debido al viento y al calor.

Se utilizó curado acelerado para predecir las características del hormigón compactado con rodillo a un año, ya que este es el periodo de tiempo para el cual un hormigón de éste tipo se diseña. Este procedimiento fue de gran ayuda debido a que en este tipo de proyectos se requiere que los diseños sean efectuados lo más pronto posible porque el tiempo que estos se demoren sería tiempo que la central hidroeléctrica esté dejando de funcionar, y por ende dejando de producir energía lo que implica pérdidas monetarias.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	7
ÍNDICE GENERAL.....	9
ABREVIATURAS.....	14
SIMBOLOGÍA	15
INDICE DE FIGURAS	16
INDICE DE TABLAS	19
CAPITULO I.....	20
1. Introducción.....	20
1.1. Antecedentes.....	21
1.2. Objetivo General.....	23
1.3. Objetivos Específicos	23
CAPITULO II.....	24
2. Descripción del Hormigón compactado con rodillo (HCR) para presas	24
2.1. Breve Historia de su uso	25
2.2. Diferencias entre el Hormigón compactado con rodillo y Hormigones convencionales.....	28
2.3. Criterios de selección del Hormigón compactado con rodillo (HCR) para presas.....	31
2.4. Ventajas del su uso del Hormigón compactado con Rodillo.....	32
CAPITULO III.....	36
3. Características mecánicas de los agregados	36

3.1. Peso Específico (ASTM C127 – C128, INEN 856 – 857)	37
3.2. Absorción (ASTM C127 – C128, INEN 856 – 857)	37
3.3. Granulometría (ASTM C136, INEN 696)	38
3.4. Porcentaje de Finos (ASTM C117, INEN 697)	39
3.5. Abrasión de los Ángeles (ASTM C535 – C131, INEN 860 – 861)	40
3.6. Terrones de Arcilla (ASTM C142, INEN 698).....	41
3.7. Materia Orgánica (ASTM C40, INEN 855).....	41
3.8. Reacción Álcali-Agregado (ASTM C1260).....	42
CAPITULO IV.....	43
4. Propiedades del Hormigón compactado con rodillo (HCR) en estado fresco.	43
4.1. Densidad (ASTM C138, INEN 1579).....	44
4.2. Contenido de aire (ASTM C138, INEN 1579)	45
CAPITULO V.....	47
5. Características mecánicas del Hormigón compactado con rodillo (HCR) ..	47
.....	47
5.1. Resistencia a la compresión (ASTM C39, INEN 1573)	48
5.2. Resistencia a la tracción por compresión diametral (ASTM C496, INEN 1845)	48
5.3. Modulo de Elasticidad y Módulo Secante (ASTM C 469, INEN 1850)	49
5.4. Conductividad Térmica	50
5.5. Coeficiente de dilatación térmica (ASTM C 157)	51
5.6. Velocidad de Pulso Ultrasónico (ASTM C 597).....	52

5.7. Tiempo de Trabajabilidad de la mezcla.....	53
5.8. Ductilidad.....	54
CAPITULO VI.....	56
6. Procedimientos experimentales.....	56
6.1. Materiales Utilizados.....	57
6.1.1. Cemento.....	57
6.1.2. Agregados.....	57
6.1.3. Agua.....	59
6.2. Diseño de muestras.....	59
6.2.1. Relación agua-cemento (a/c).....	60
6.2.2. Granulometría.....	60
6.2.3. Contenido de finos.....	62
6.2.4. Cemento.....	63
6.2.5. Agua.....	64
6.3. Metodología Empleada.....	64
6.3.1. Dosificaciones Propuestas.....	64
6.3.2. Preparación de muestras.....	66
6.3.3. Determinación del porcentaje de agua libre óptimo.....	66
6.3.3.1. Curvas Densidad vs. porcentaje de agua libre óptimo.....	68
6.3.3.2. Análisis de las curvas Densidad vs. Agua libre.....	70
6.3.4. Elaboración de Ensayos.....	71
6.3.4.1. Resistencia a la compresión.....	71
6.3.4.2. Resistencia a la tracción por compresión diametral.....	76

6.3.4.3. Modulo de Elasticidad y Módulo Secante	78
6.3.4.4. Conductividad Térmica.....	80
6.3.4.5. Coeficiente de dilatación térmica	84
6.3.4.6. Velocidad de Pulso Ultrasónico.....	87
6.3.4.7. Trabajabilidad	89
6.4 Curado Acelerado de Probetas	90
6.4.1 Objetivo.....	90
6.4.2 Equipos Utilizados	91
6.4.3 Procedimiento	91
CAPITULO VII.....	93
7. Resultados Obtenidos.....	93
7.1. Resistencia a la compresión vs. Tiempo	93
7.2. Resistencia a la tracción por compresión diametral (TCD) vs. Tiempo	94
7.3. Módulo de Elasticidad vs. Tiempo	94
7.4. Módulo Secante vs Tiempo.....	95
7.5. Correlación Resistencia a la compresión vs. Velocidad de Pulso Ultrasónico.....	98
7.6. Correlación Resistencia a la tracción (TCD) vs. Velocidad de Pulso Ultrasónico.....	98
7.7. Correlación Modulo de Elasticidad vs Velocidad de Pulso Ultrasónico.....	99
7.8. Correlación Resistencia a la compresión vs Módulo de Elasticidad.....	99

7.9. Correlación Resistencia a la tracción por compresión diametral (TCD) vs Módulo de Elasticidad	100
7.10. Coeficiente de Dilatación Térmica	100
7.11. Constante de conductividad Térmica	101
7.12. Resistencia a la compresión vs. Tiempo de trabajabilidad	101
7.13. Ductilidad vs. Tiempo.	102
CAPITULO VIII	103
8. Análisis de Resultados	103
CAPITULO IX.....	108
9. Conclusiones y Recomendaciones	108
ANEXOS.....	111
BIBLIOGRAFÍA.....	137

ABREVIATURAS

ACI	American Concrete Institute(Instituto Americano del Concreto)
ASTM	American Society for Testing and Materials
CTH	Centro Técnico del Hormigón
GU	Cemento General Use (Uso General)
HE	Cemento High Early Strength (Alta Resistencia Inicial)
HCR	Hormigón Compactado con Rodillo
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
MF	Módulo de Finura
a/c	Relación agua cemento
TMA	Tamaño máximo del agregado
TCD	Tracción por Compresión Diametral

SIMBOLOGÍA

cm	Centímetro
R^2	Coefficiente de determinación
λ	Coefficiente de dilatación térmica
dm^3	Decímetro cúbico
GPa	Giga Pascal
°C	Grados centígrados
g	Gramo
kg	Kilogramo
$kg. /m^3$	Kilogramo – metro cúbico
kN	Kilo Newton
kN /s	Kilo Newton – segundo
μm	Micrómetro
m^3	Metro cúbico
m	Metro lineal
mm	Milímetro
Mpa	Mega Pascal
ml.	Mililitros
$f'c$	Resistencia a la compresión
s	Segundo

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Transporte, colocación y compactación del HCR.....	25
Figura 2 Costo vs. Volumen para proyectos de presas de HCR en Estados Unidos (US Army Corps of Engineers, 2000).....	32
Figura 3 Desbordamiento del rio Bio-Bio, presa de HCR	34
Figura 4 Ensayo para determinar la densidad	44
Figura 5 Ensayo para determinar el Aire incluido	45
Figura 6 Equipo de Ultrasonido	52
Figura 7 Curva esfuerzo-deformación para un material dúctil y para uno frágil	55
Figura 8 Piedra 38y 19 mm.....	58
Figura 9 Arena Triturada y Arena Natural	58
Figura 10 Granulometría del arreglo sin gravilla	61
Figura 11 Granulometría del arreglo incluyendo gravilla.....	62
Figura 12 Martillo vibratorio Hilti.....	66
Figura 13 Compactación del HCR en la Olla de Washington	67
Figura 14 Curva densidad Humedad con 95 kg/m ³ de cemento tipo HE, sin incluir gravilla	68
Figura 15 Curva densidad Humedad con 95 kg/m ³ de cemento tipo HE, incluyendo gravilla de 12.5 mm	68
Figura 16 Curva densidad Humedad con 105 kg/m ³ de cemento tipo HE...69	69
Figura 17 Curva densidad Humedad con 105 kg/m ³ de cemento tipo GU..69	69
Figura 18 Martillos de compactación y moldes metálicos	73
Figura 19 Bandeja de mezclado.....	74
Figura 20 Prensa ELE ADR 2000kN	75
Figura 21 Dispositivo de sujeción y láminas de madera	77
Figura 22 Extensómetro longitudinal y Deformímetro.....	79

Figura 23 Extracción de núcleos	81
Figura 24 Ensayo para determinar la conductividad térmica del HCR marca CENCO	82
Figura 25 Vigueta metálica de dimensiones 102 x 102 x 286 mm.....	85
Figura 26 Aparato para medir dilataciones	86
Figura 27 Barra de Calibración del Equipo de pulso ultrasónico	88
Figura 28 Determinación del pulso ultrasónico.....	89
Figura 29 Curva Resistencia a la compresión vs. Tiempo	94
Figura 30 Curva Resistencia a tracción por compresión diametral vs. Tiempo.....	94
Figura 31 Curva Módulo de Elasticidad vs. Tiempo.....	95
Figura 32 Variación del Módulo Secante (105 kg GU) vs. Porcentaje de Resistencia	95
Figura 33 Variación del Módulo Secante (95 kg GU) vs. Porcentaje de Resistencia	96
Figura 34 Variación del Módulo Secante (75 kg GU) vs. Porcentaje de Resistencia	96
Figura 35 Variación del Módulo Secante (105 kg HE) vs. Porcentaje de Resistencia	96
Figura 36 Variación del Módulo Secante (95 kg HE) vs. Porcentaje de Resistencia	97
Figura 37 Variación del Módulo Secante (75 kg HE) vs. Porcentaje de Resistencia	97
Figura 38 Correlación Resistencia a la compresión vs. Velocidad de pulso ultrasónico	98
Figura 39 Correlación Resistencia a la tracción por compresión diametral vs. Velocidad de pulso ultrasónico	98

Figura 40 <i>Correlación Módulo de Elasticidad vs. Velocidad de pulso ultrasónico</i>	99
Figura 41 <i>Correlación Resistencia a la compresión vs. Módulo de Elasticidad</i>	99
Figura 42 <i>Correlación Resistencia a la tracción por compresión diametral vs. Módulo de Elasticidad</i>	100
Figura 43 <i>Resistencia a la compresión vs. Tiempo de Trabajabilidad</i>	101
Figura 44 <i>Ductilidad vs. Tiempo</i>	102

INDICE DE TABLAS

Tabla I Comparación de presas de HCR culminadas (Dunstan, 2003)	29
Tabla II Resumen de las propiedades de los agregados	59
Tabla III Dosificaciones propuestas para pruebas pequeñas (1)	65
Tabla IV Dosificaciones propuestas para pruebas pequeñas (2)	65
Tabla V Dosificaciones propuestas para producción masiva.....	71
Tabla VI Resultados de Coeficiente de dilatación térmica	100
Tabla VII Resultados de Conductividad térmica.....	101

CAPITULO I

1. Introducción

El presente trabajo trata del “Diseño de Hormigón compactado con rodillo”, cuyo fin es su utilización en presas, esta técnica 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 el bajo contenido cementicio y la rapidez en la construcción, así como por su versatilidad frente a condiciones climáticas desfavorables.

En el desarrollo de esta tesis se estudiará tanto a los agregados empleados en el HCR para la presa San Francisco, así como las propiedades mecánicas del hormigón mismo mediante una serie de ensayos que permitirán 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 la 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.

1.2. Objetivo General

- Diseñar el Hormigón compactado con rodillo que cumpla con los requerimientos establecidos para la presa “San Francisco”.

1.3. Objetivos Específicos

- Caracterizar los agregados que serán empleados en la elaboración del Hormigón compactado con rodillo (HCR).
- Caracterizar el hormigón compactado con rodillo (HCR) en estado fresco y seco.
- Establecer el porcentaje de agua libre óptimo.
- Determinar correlaciones a través de un ensayo no destructivo como la Velocidad de pulso ultrasónico.
- Predecir resistencias a la compresión por medio de Curado Acelerado.
- Seleccionar el mejor diseño

CAPITULO II

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.

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



Figura 1 Transporte, colocación y compactación del HCR

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

2.1. Breve Historia de su uso

Hasta 1950 del total de presas construidas en el mundo, haciendo un enfoque solo en las de altura mayor o igual a 15 metros, únicamente el 38% de éstas habían sido construidas de hormigón

convencional (Instituto Salvadoreño del Cemento y del concreto, 2003); esta estadística disminuyó considerablemente en los años siguientes por el auge que tuvieron las presas de materiales sueltos cuyo costo era muy reducido en comparación con las de hormigón; este ahorro se debía a la eficacia de los equipos y a la metodología empleada en obra.

En contraparte a estas ventajas, las presas de materiales sueltos eran muy propensas a fallar, por lo que se sintió la necesidad de idear otro tipo de presas que combinaran la seguridad del hormigón convencional y la eficacia de los equipos empleados en las presas construidas con materiales sueltos; surgieron entonces las primeras variantes como la utilización de hormigón con bajo contenido cementicio para el interior de Presa (Alpe Gera en Italia, 1964) o la utilización de material granular enriquecido con cemento, ésta última demostró un gran ahorro gracias al empleo de métodos de construcción de terraplenes.

A inicios de los ochenta las velocidades de construcción para presas aumentaron con la utilización de HCR. Ejemplos de esto son las presas Upper Stillwater (Estados Unidos, 1987) cuyo volumen es de 1,125 millones de m³ construida en 11 meses y la presa Stagecoach (Estados Unidos, 1988) de 46 m de altura construida en 37 días cuya velocidad promedio de avance fue de 1,2 m/día (Escalaya, 2006).

Así se continuó expandiendo la utilización de HCR por el mundo en la construcción de presas de gravedad, ayudando a desarrollar el potencial hídrico de una gran cantidad de países en áreas como irrigación, producción de energía, protección contra inundaciones, entre otras.

Para fines de 1980 solo se habían terminado 2 presas de HCR de altura mayor o igual a 15 m, éste valor aumentó exponencialmente para 1996, año en que ya existían 157 presas culminadas y continuó aumentando, así para el año 2002 la cifra llegó a 251 presas de HCR culminadas y 34 en ejecución. Las estadísticas indicaban para

entonces una altura y volumen promedio de 80 m y 600000 m³ respectivamente.

La tabla I resume el avance en la ejecución de presas de HCR comparando la cantidad de presas culminadas hasta los años 1996 y 2002.

2.2. Diferencias entre el Hormigón compactado con rodillo y Hormigones convencionales

El HCR es un hormigón considerado especial por las distintas características que posee, como por ejemplo: es un hormigón con muy poco contenido de agua y de revenimiento cero. En el hormigón convencional se manejan contenidos de agua superiores los cuales ayudan a la trabajabilidad del hormigón en obra y lo hacen muy fluido, a diferencia del HCR que generalmente es de apariencia seca.

El uso de HCR se da en obras como pavimentos y presas en las cuales la cantidad de acero que se utiliza es mínima, en contraste con el

hormigón convencional muy empleado en elementos estructurales, los mismos que en ocasiones limitan el TMA para el mismo.

PAÍS	1996	2002	PAÍS	1996	2002
AFRICA			OCEANÍA		
SUD AFRICA	11	13	AUSTRALIA	8	9
MARRUECOS	7	9	TOTAL	8	9
ANGOLA	1	1	SUBCONTINENTE INDIO Y MEDIO ORIENTE		
BURKINA-FASO	0	1	JORDANIA	0	3
ERITREA	0	1	UAE	0	2
ALGERIA	0	1	IRÁN	0	1
TUNEZ	0	1	TOTAL	0	6
TOTAL	19	27	AMÉRICA DEL NORTE		
ASIA			USA	28	36
CHINA	23	45	CANADA	2	2
JAPÓN	28	42	TOTAL	30	38
TAILANDIA	1	2	AMÉRICA DEL SUR Y CENTRAL		
KYRGYZSTAN	1	1	BRASIL	9	29
TURQUÍA	0	1	MÉXICO	5	6
INDONESIA	0	1	HONDURAS	2	2
KAZAKHSTAN	0	1	COLOMBIA	0	2
RUSIA	0	1	CHILE	1	1
TOTAL	53	94	ARGENTINA	1	1
EUROPA			GUYANA FRANCESA	1	1
ESPAÑA	19	21	REPÚBLICA DOMINICANA	0	1
FRANCIA	6	6	BOLIVIA	0	1
GRECIA	1	3	COSTA RICA	0	1
RUMANIA	2	2	TOTAL	19	45
TOTAL	28	32	GRAN TOTAL	157	251

Tabla I Comparación de presas de HCR culminadas (Dunstan, 2003)

Para la densificación del hormigón convencional se hace uso de vibradores de inmersión. En el HCR se lo hace mediante el rodillado y para obtener una consolidación efectiva la mezcla debe ser lo suficientemente seca para prevenir el hundimiento de los equipos de vibrado, pero a su vez debe tener la humedad necesaria para obtener una adecuada distribución de la pasta.

El transporte del HCR se realiza mediante camiones tolvas a diferencia del hormigón convencional transportado mediante mixers.

Pero la principal característica de éste tipo de hormigón es al ahorro económico que produce gracias a los bajos contenidos de cemento.

Las resistencias del hormigón compactado con rodillo en general son menores a las que se obtienen con hormigón convencional, debido al bajo contenido cementicio que posee el primer tipo de hormigón nombrado.

2.3. Criterios de selección del Hormigón compactado con rodillo (HCR) para presas.

De manera general el hormigón compactado con rodillo debe cumplir ciertas características como son:

El HCR en estado fresco debe ser lo suficientemente seco para que los equipos puedan transitar sobre él sin problema alguno.

Que al ser transportado el HCR no se segregue y en caso de producirse este efecto deberá ser mínimo, por lo que se debe limitar el TMA.

La mezcla obtenida debe ser cohesiva, no deberá presentar problemas de segregación ya sea durante su transporte, colocación o compactación.

Como parte de los parámetros de diseño de HCR para la presa San Francisco están una resistencia a la compresión mínima f'_c de 14 MPa y un módulo de elasticidad (E) de 20 GPa los cuales se espera alcanzar mediante los diseños hechos en este trabajo investigativo.

2.4. Ventajas del su uso del Hormigón compactado con Rodillo

Entre las principales ventajas se pueden citar las siguientes:

Costo. El valor por metro cúbico de HCR puesto en obra puede llegar a ser entre 25 a 50 por ciento menos, comparándolo con un hormigón convencional. La diferencia en estos valores se basa en el costo de los agregados, cemento, complejidad de colocación y volúmenes empleados. Cabe indicar que la colocación de HCR emplea menor cantidad de mano de obra, que si se tratase de hormigón convencional.

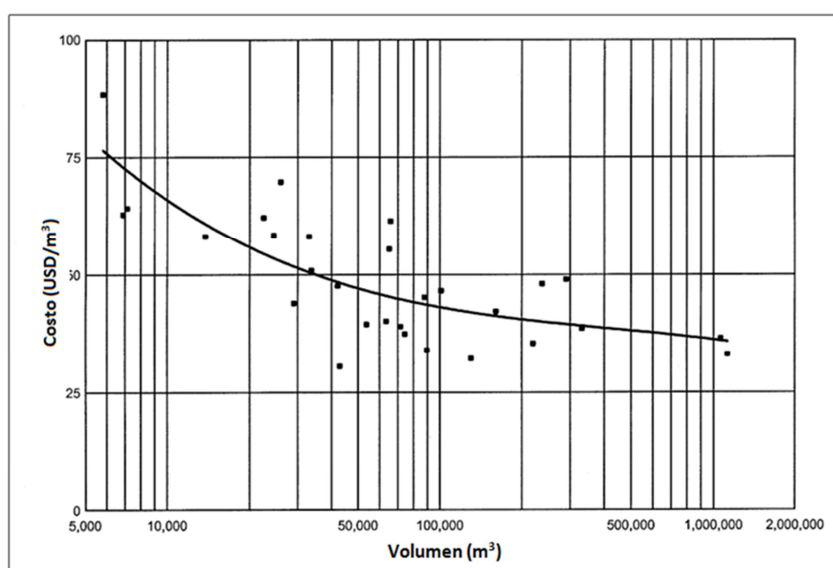


Figura 2 Costo vs. Volumen para proyectos de presas de HCR en Estados Unidos (US Army Corps of Engineers, 2000)

La figura 2 detalla la relación entre los costos en dólares por metro cúbico (USD/m³) y el volumen en metros cúbicos (m³) para proyectos realizados en Estados Unidos, para el nivel de precios del año 1998.

Rapidez de construcción. Debido a la rapidez con que puede ser colocado en el HCR se pueden alcanzar mayores niveles de producción en comparación al hormigón convencional. Esta rapidez también repercute en menores gastos tanto administrativos como operativos.

Se obtienen grandes velocidades de ejecución al emplear equipos pesados a gran escala, los cuales tienen un mejor rendimiento.

Aliviaderos integrales y estructuras anexas. A diferencia de las presas de terraplén en las presas de HCR el aliviadero puede incorporarse directamente en la estructura. En las presas de terraplén el aliviadero se dispone fuera del cuerpo de la presa para evitar filtraciones.

En proyectos donde se requieren tomas de varios niveles para control de calidad de aguas o sedimentación de embalses, las estructuras pueden ser ancladas en la cara aguas arriba de la presa.

Los costos de una toma son significativamente menores sobre todo en zonas de alta sismicidad.

Mejores ataguías. Los riesgos debidos al desbordamiento de la ataguía se reducen, ya que en éstas puede emplearse HCR disminuyendo el tiempo de ejecución de éstas estructuras.



Figura 3 Desbordamiento del rio Bio-Bio, presa de HCR
(Ingendesa, 2003)

El potencial de fracaso debido a la alta resistencia del HCR será mínimo y el daño será menor incluso si se produce el desbordamiento de la ataguía. Al igual que la presa misma, las ataguías de HCR ofrecen operatividad luego del desbordamiento.

Seguridad en la obra. AL colocarse el HCR en capas de espesores pequeños aumenta la seguridad de la obra ya que los desniveles disminuyen.

CAPITULO III

3. Características mecánicas de los agregados

La correcta caracterización de los agregados evitará problemas que se puedan presentar debido al origen de los mismos.

Antes de proceder a la elaboración del HCR es necesario conocer la calidad y propiedades de los agregados del cual estará compuesto.

Las propiedades que adquiera el HCR dependerán de las propiedades que tengan los agregados con los que se elaboró, ya que éstos son los que intervienen en mayor porcentaje en la dosificación.

3.1. Peso Específico (ASTM C127 – C128, INEN 856 – 857)

Generalmente materiales sanos y resistentes poseen buenas densidades y bajas absorciones, estos materiales son ideales para la elaboración de HCR. Sin embargo se han reportado buenos resultados de HCR utilizando materiales considerados de pobre desempeño, como lo son las areniscas bituminosas. Esta última acotación representa una ventaja para el hormigón compactado con rodillo.

La densidad que alcance el HCR estará influenciada por el peso específico de los agregados con los que se elabora y al estar la densidad del hormigón relacionada con la resistencia, entonces indirectamente el peso específico de los agregados repercutirá en la resistencia tanto a compresión como a tracción.

3.2. Absorción (ASTM C127 – C128, INEN 856 – 857)

Este parámetro permite conocer el porcentaje de agua que es capaz de absorber el agregado, es importante ya que éste en conjunto con

la humedad, determinarán la cantidad de agua que se debe agregar al HCR dependiendo de las condiciones climáticas y la forma de almacenaje de los agregados.

Esta propiedad de los agregados depende del origen y de la granulometría de los mismos, de tal manera que los agregados más finos tienen mayor absorción que aquellos cuya granulometría es mayor.

3.3. Granulometría (ASTM C136, INEN 696)

Una correcta determinación de la gradación de los agregados es importante para el diseño de HCR ya que se evitan problemas que sólo se pueden notar al momento de la elaboración del hormigón, uno de estos es la segregación.

A pesar de que en la actualidad se ha reducido el Tamaño máximo del agregado (TMA) de 3" a 1 ½" para este tipo de hormigón, la excesiva concentración de agregados gruesos en el HCR provocará segregación.

Lo que se desea es que la curva granulométrica resultante de la combinación de los agregados sea continua, sin saltos y con un porcentaje de partículas pasantes el tamiz No 200 dentro de lo recomendado (no más allá de 6%).

3.4. Porcentaje de Finos (ASTM C117, INEN 697)

Las partículas pasantes el tamiz No 200 ($75\mu\text{m}$) generalmente se asocian con arcillas de alta plasticidad las cuales son perjudiciales para el buen desempeño del hormigón, sin embargo existen materiales molidos cuyo diámetro es inferior a $75\mu\text{m}$, pero se encuentran clasificados como finos no plásticos, los mismos que son necesarios para darle consistencia al HCR. Estas partículas se encuentran tanto en los agregados gruesos como en los finos.

La importancia de este ensayo radica en determinar de forma exacta el porcentaje de este tipo de partículas con que aportará cada agregado, en caso de proveer mucho más finos de lo establecido se

presentarán problemas posteriores como un enlace débil en la interface pasta – agregados.

La adherencia de estas partículas arcillosas puede tener su origen en la forma de extracción de los agregados del banco.

3.5. Abrasión de los Ángeles (ASTM C535 – C131, INEN 860 – 861)

Este ensayo permite obtener el porcentaje de desgaste de los agregados. EL cual depende de la morfología, origen y composición mineralógica de los mismos.

La ASTM C33 establece un valor límite de 50% para que los agregados puedan ser usados en hormigón convencional, pero como ya se explicó agregados de pobre desempeño también pueden ser usados para hormigón compactado con rodillo.

Agregados de forma redondeada como el caso de los cantos rodados presentan mayor dureza, han sido formados por desgaste y una característica importante es que necesitan menor cantidad de

agua, lo cual es beneficioso para el uso en HCR debido a las bajas proporciones de agua a utilizar.

La resistencia al desgaste de los agregados afecta a la resistencia mecánica del hormigón y a la durabilidad.

3.6. Terrones de Arcilla (ASTM C142, INEN 698)

La adherencia de materiales arcillosos en los agregados ocasiona grandes problemas, ya que disminuye la resistencia mecánica del hormigón al debilitar la interface agregado – pasta.

Al igual que las partículas pasantes el tamiz No 200, la adherencia de estas partículas arcillosas se relaciona con la forma de extracción de los agregados y el proceso de trituración por el cual pasan.

3.7. Materia Orgánica (ASTM C40, INEN 855)

La materia orgánica es un inconveniente muy grande en el hormigón ya que puede hacer que éste sea más propenso al ataque de los

agentes atmosféricos, reduce su durabilidad e inclusive podría llegar a impedir el fraguado del mismo.

3.8. Reacción Álcali-Agregado (ASTM C1260)

Esta reacción se manifiesta en el hormigón cuando los álcalis que se encuentran en el cemento o provenientes de fuentes externas, reaccionan con agregados reactivos silíceos; producto de esto se forma un gel de álcali y silicato, el mismo que altera la periferia de los agregados y provoca expansión en el hormigón ya que incrementa su volumen producto de absorber agua.

Para obras masivas es indispensable realizar este ensayo ya que en caso de presentarse la reacción álcali agregado se producirán presiones internas, las cuales debilitarán la estructura al inducir la propagación de microfisuras.

CAPITULO IV

4. Propiedades del Hormigón compactado con rodillo (HCR) 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 del diseño empleado. 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.

4.1. Densidad (ASTM C138, INEN 1579)

Esta prueba se la realiza inmediatamente después de terminar la mezcla de los componentes del hormigón para evitar que por distintas circunstancias como pueden ser, el viento y la temperatura, el HCR pierda su humedad.

Para la elaboración de éste ensayo se utilizó la olla de Washington (presurímetro) la cual tiene un volumen conocido, en ésta se coloca el HCR en tres capas de igual altura y se compacta con un martillo vibratorio, el mismo que simula los efectos del rodillo. Finalmente la última capa se enraza para evitar que el HCR sobresalga del molde.



Figura 4 Ensayo para determinar la densidad

Luego se determina el peso del HCR que se encuentra dentro de la olla y éste valor dividido para el volumen previamente conocido nos dará el valor de la densidad.

4.2. Contenido de aire (ASTM C138, INEN 1579)

Mediante la olla de Washington se somete a la muestra de HCR a una deformación elástica bajo una presión establecida, ésta luego es comparada con la deformación que sufriría el mismo volumen de aire a la misma presión.



Figura 5 Ensayo para determinar el Aire incluido

En este tipo de hormigón lo recomendable es que la cantidad de aire incorporado sea mínima y esta dependerá del proceso de mezclado, así como también de la energía de compactación proporcionada a la muestra.

Para el proyecto se ha recomendado que la cantidad de aire presente en el HCR se encuentre entre 0.5% y 1.5%. En caso de obtener valores superiores a 2.5% no se deberá proceder con los ensayos posteriores

CAPITULO V

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

Las características mecánicas del hormigón son evaluadas utilizando las normas ASTM. Estas se realizan cuando el hormigón ha endurecido.

Los resultados producto de esta caracterización del hormigón determinarán la durabilidad y desempeño de la obra.

5.1. Resistencia a la compresión (ASTM C39, INEN 1573)

Una de las pruebas más comunes realizadas al hormigón en estado endurecido es la de resistencia a la compresión, ya que muchas de las otras propiedades del hormigón se relacionan con ésta.

En este ensayo se aplica una carga axial que comprime al cilindro en las caras perpendiculares al eje vertical, a una velocidad establecida de acuerdo al tamaño del espécimen, llevando a este hasta su falla o rotura.

La resistencia a la compresión ofrecida por la muestra se calcula dividiendo la carga final de rotura para el valor del área sobre la cual fue aplicada.

5.2. Resistencia a la tracción por compresión diametral (ASTM C496, INEN 1845)

Para esta prueba las probetas de HCR fueron colocadas paralelas al eje vertical entre las platinas de la prensa. Este ensayo provoca un

esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical, el cual provoca la falla de la muestra.

5.3. Modulo de Elasticidad y Módulo Secante (ASTM C 469, INEN 1850)

Considerando que este va a ser un hormigón para Presa por el método de compactación con rodillo es de gran importancia saber el comportamiento elástico y plástico. En donde la relación entre esfuerzos y deformaciones es categórica.

Los valores de módulo elástico y módulo secante intervienen en los análisis estáticos y dinámicos que se realizan a la estructura.

De acuerdo a la norma ASTM 469 se considera como Módulo Elástico la pendiente de la recta del gráfico esfuerzo deformación que corresponde a un 40% de la carga de rotura. En cambio el módulo secante se obtiene determinando la pendiente de la recta secante del gráfico nombrado anteriormente a una deformación cualquiera.

5.4. Conductividad Térmica

Es la capacidad que presenta un material para conducir calor.

La conductividad térmica se expresa como la cantidad de calor que pasa a través de una unidad de área de cierto material, cuyo espesor es unitario, por unidad de tiempo cuando la diferencia de temperatura entre las caras del material es de una unidad.

Una obra como la presa del proyecto San Francisco experimentará en su interior temperaturas superiores a las que está expuesta su superficie debido al calor generado por la hidratación del cemento, por lo que se desea establecer la conductividad térmica para determinar la velocidad con la cual será transferido el calor del interior.

La conductividad térmica es inversamente proporcional a la densidad del material.

5.5. Coeficiente de dilatación térmica (ASTM C 157)

En obras de tipo masivo es importante establecer el nivel de contracción y expansión que tendrá el hormigón debido a efectos como el calor.

El coeficiente de dilatación térmica (λ) expresa el cambio relativo en unidad de longitud que experimenta el hormigón cuando su temperatura varía.

$$\lambda = \frac{\Delta L/L}{\Delta T}$$

La temperatura debe ser controlada ya que cambios bruscos de ésta pueden provocar expansiones significativas del hormigón originando tensiones internas en una obra masiva como lo es la presa, que a su vez repercutirán en la aparición de micro fisuras.

5.6. Velocidad de Pulso Ultrasónico (ASTM C 597)

Este ensayo es una prueba no destructiva, en el cual se analiza cada una de las probetas que serán sometidas posteriormente a ensayos de Compresión y TCD.

Su análisis se determina por la medición del tiempo que le toma viajar a un pulso a través del cilindro. Este pulso viaja con una mayor velocidad cuando las probetas son más densas, es decir existe en su interior una menor cantidad de vacíos. Por esto es importante que la compactación dada a cada probeta sea la necesaria para alcanzar su densidad máxima la cual debe ser establecida previamente.



Figura 6 Equipo de Ultrasonido

El dispositivo electrónico envía un pulso ultrasónico que viaja a través de la probeta cilíndrica, registrándose el tiempo que le toma al pulso recorrer la muestra.

En la superficie de contacto de los terminales del equipo con las probetas no deberán existir irregularidades ya que pueden provocar resultados erróneos. La presencia de oquedades en la superficie lateral de los cilindros también debe ser considerada como una irregularidad, por tal razón se utiliza como medio de contacto un gel que sature estas superficies, permitiendo el paso de la onda.

Propiedades como la resistencia y el módulo elástico están interconectadas con el pulso ultrasónico, más adelante se analizarán correlaciones entre estas características.

5.7. Tiempo de Trabajabilidad de la mezcla.

Para este ensayo se trata de encontrar un tiempo hasta el cual se puede tener en reposo la mezcla del HCR, durante este periodo la mezcla experimentará pérdida de humedad y manejabilidad, por lo

que resultará más complicada su compactación en obra con los rodillos vibratorios.

Es importante medir esta propiedad ya que se pueden presentar demoras en la colocación del hormigón debido a diversas causas.

Los resultados tratan de establecer el instante en el que el HCR independiente de la compactación que le sea suministrada, ya no alcanzará su resistencia.

5.8. Ductilidad

La ductilidad se define como la relación entre las deformaciones en el límite elástico, es decir al 40% de la carga de rotura y la deformación última.

$$\mu = \frac{\varepsilon_{rotura}}{\varepsilon_{elástico}}$$

El parámetro es de gran significancia en el diseño ya permite establecer la deformación del material en el rango plástico, bajo carga prácticamente constante.

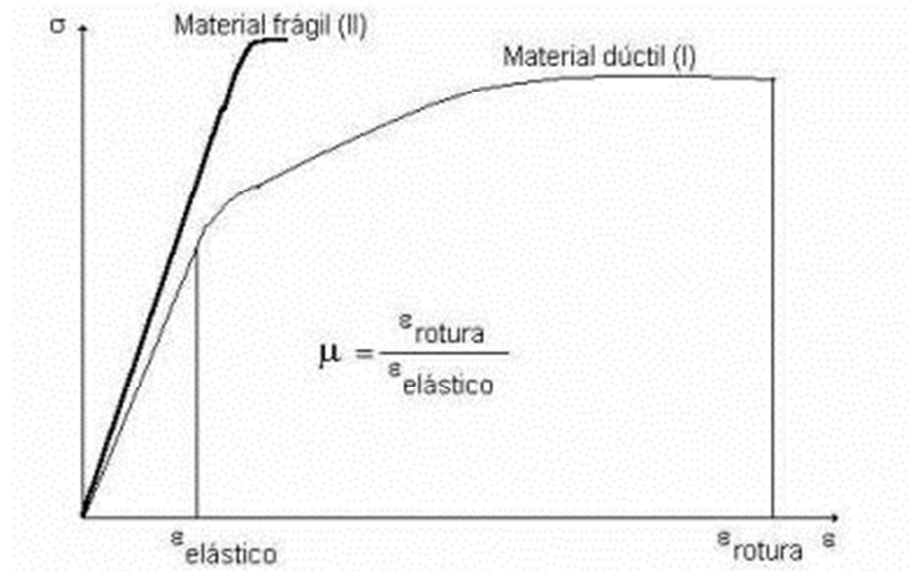


Figura 7 Curva esfuerzo-deformación para un material dúctil y para uno frágil

CAPITULO VI

6. Procedimientos experimentales

Para la caracterización del hormigón compactado con rodillo se realizaron distintos tipos de ensayos los cuales están establecidos por la ASTM (American Society for Testing and Materials).

Las técnicas empleadas para cada ensayo así como el tipo de especímenes se detallan a continuación.

6.1. Materiales Utilizados

6.1.1. Cemento

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.

Los cementos utilizados en la elaboración de las probetas fueron del tipo GU (General Use) y HE (High Early Strength), los que son de naturaleza puzolánica y cumplen con la Norma ASTM C 1157 e INEN 2680 (Certificación de cemento hidráulico por desempeño).

6.1.2. Agregados

Se emplearon cuatro tipos de agregados: dos de tipo grueso y dos de tipo fino, los cuales provenían de un lugar cercano al sitio de la obra.

Los agregados gruesos empleados son de tamaño máximo 38 y 19 mm, éstos en conjunto con la arena triturada fueron obtenidos de la trituración de cantos rodados.

Las propiedades de todos los agregados se presentan en el resumen de la tabla II



Figura 8 Piedra 38y 19 mm

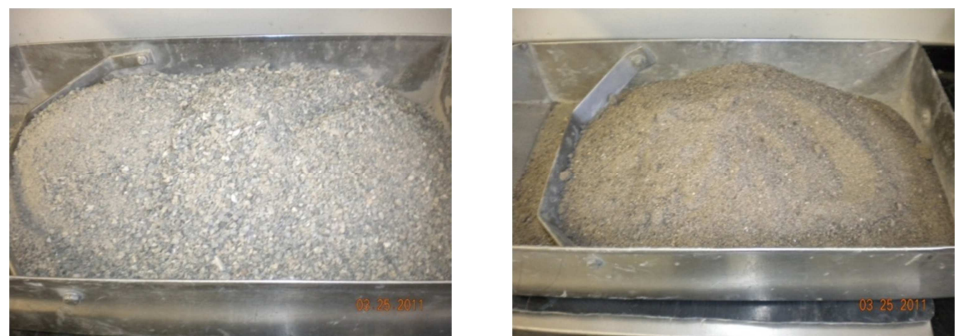


Figura 9 Arena Triturada y Arena Natural

<i>Material</i>	<i>Propiedades</i>					
	Densidad (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

Tabla II Resumen de las propiedades de los agregados

6.1.3. Agua

El agua a usar para el diseño de hormigón deberá ser potable, en caso de no ser así deberá evaluarse idoneidad de la misma mediante la norma ASTM C 94.

En los diseños elaborados para el proyecto San Francisco se empleo agua potable.

6.2. Diseño de muestras

Para el diseño de las muestras de HCR se debe tomar en cuenta las características presentadas a continuación:

6.2.1. Relación agua-cemento (a/c)

Las relaciones agua cemento de hormigones compactados con rodillo son mayores a las que se emplea en el hormigón convencional estas fluctúan alrededor de 1.52 (Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto), este valor se reduce a medida que se emplean mayores cantidades de cemento.

6.2.2. Granulometría

Con los materiales disponibles se diseño una granulometría, pero se notó que la proporción de partículas de tamaño 12.5 mm estaba muy cercana al mínimo establecido por la banda granulométrica, debido a esto se decidió ensayar dos tipos de granulometría: la primera con los cuatro agregados disponibles y una segunda incluyendo material de tamaño 12.5 mm para tratar de suavizar la curva granulométrica de la primera combinación.

Es importante acotar que al aumentar otro agregado como lo es la gravilla de tamaño 12.5 mm, se producirá un mayor costo de la obra.

La decisión de incorporar la gravilla de 12.5 mm se hará comparando de los resultados obtenidos con ésta y en ausencia de la misma, en base al análisis de las curvas densidad humedad.

La curva granulométrica para con los cuatro agregados disponibles fue la siguiente:

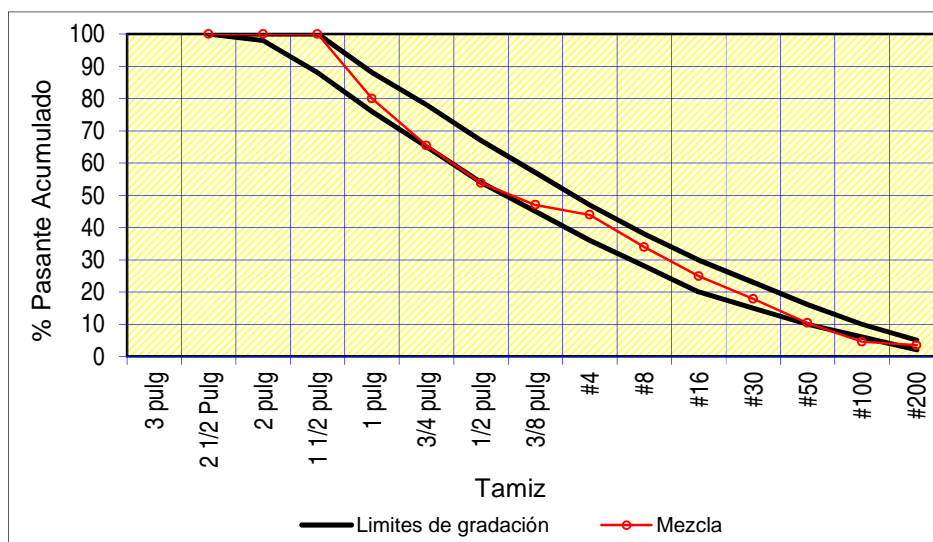


Figura 10 Granulometría del arreglo sin gravilla

Al añadir la gravilla de 12.5 mm la curva se suavizó

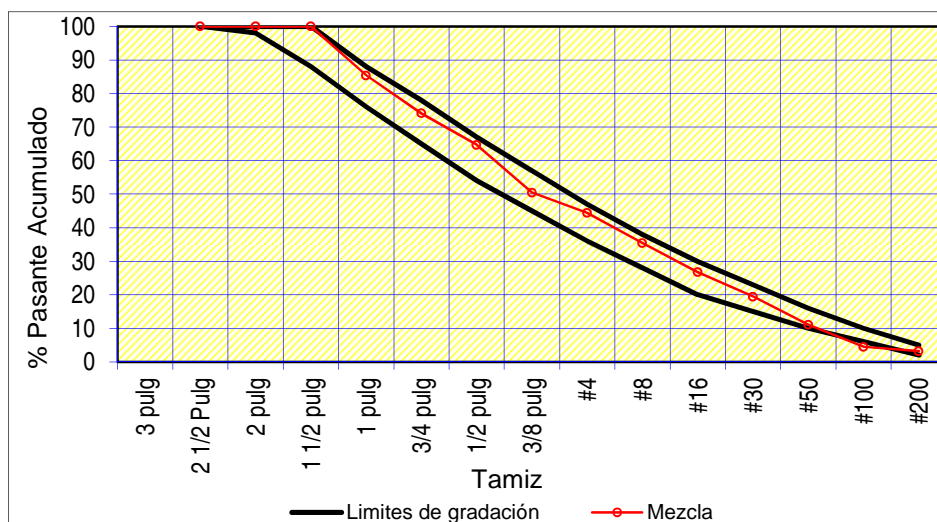


Figura 11 Granulometría del arreglo incluyendo gravilla

En el anexo 7 se detallan las combinaciones granulométricas.

6.2.3. Contenido de finos

La mezcla deberá poseer un contenido mínimo de finos que proporcione cierta cohesión a la mezcla, para evitar que se produzca segregación, éstos finos deberán ser no plásticos, de preferencia provenientes de la molienda de los agregados gruesos utilizados.

Con base en las recomendaciones del consultor del proyecto Ernest Schrader, se utilizó un valor máximo de 6% de finos.

6.2.4. Cemento

En general se consideran tres grandes grupos de presas de acuerdo a su contenido de cemento, éstas son: presas de bajo contenido de cemento ($70-110 \text{ kg/m}^3$), presas de alto contenido de cemento ($150-270 \text{ kg/m}^3$) y presas con contenido de cemento medio ($110-150 \text{ kg/m}^3$).

Para el caso del proyecto San Francisco se decidió utilizar contenidos de cemento entre 75 y 105 kg/m^3 debido al gran costo que significaría emplear mayores cantidades de cemento y considerando que los requerimientos de diseño no son tan altos.

6.2.5. Agua

La cantidad exacta de la misma se deberá establecer realizando pruebas pequeñas de Hormigón compactado con rodillo.

La proporción de agua estará en función del origen de los agregados, de la cantidad de finos que posea la muestra y la adición de materiales finos como “filler”, éste último demanda más agua por ser materiales con diámetros muy cercanos a $75\mu\text{m}$ los mismos que poseen grandes absorciones.

6.3. Metodología Empleada

6.3.1. Dosificaciones Propuestas

Primero se debe examinar el comportamiento de dosificaciones pequeñas de hormigón compactado con rodillo para determinar la humedad óptima, y luego realizar pruebas a una escala mayor (170 dm^3), para caracterizar el HCR de una mejor manera.

Las dosificaciones propuestas para las pruebas pequeñas se muestran a continuación:

	Diseños (kg/m³)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Cemento GU								
Cemento HE	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0
Agua	125,0	125,0	125,0	109,0	96,0	119,0	125,0	132,0
Piedra 38 mm	600,0	435,0	600,0	600,0	600,0	435,0	435,0	435,0
Piedra 19 mm	600,0	489,0	600,0	600,0	655,0	489,0	489,0	489,0
Gravilla 12,5 mm		544,0				272,0	272,0	272,0
Arena Triturada	655,0	435,0	655,0	655,0	655,0	544,0	544,0	544,0
Arena Natural	327,0	272,0	327,0	327,0	327,0	435,0	435,0	435,0
Densidad	2337	2406	2420	2430	2348	2414	2431	2384

Tabla III Dosificaciones propuestas para pruebas pequeñas (1)

	Diseños (kg/m³)							
	9	10	11	12	13	14	15	16
Cemento GU					105,0	105,0	105,0	95,0
Cemento HE	105,0	105,0	105,0	105,0				
Agua	125,0	118,5	132,0	111,5	125,0	118,5	111,5	118,5
Piedra 38 mm	602,0	602,0	602,0	602,0	602,0	602,0	602,0	602,0
Piedra 19 mm	602,0	602,0	602,0	602,0	602,0	602,0	602,0	602,0
Gravilla 12,5 mm								
Arena Triturada	656,0	656,0	656,0	656,0	656,0	656,0	656,0	656,0
Arena Natural	328,0	328,0	328,0	328,0	328,0	328,0	328,0	328,0
Densidad	2434	2447	2424	2444	2385	2435	2435	2430

Tabla IV Dosificaciones propuestas para pruebas pequeñas (2)

6.3.2. Preparación de muestras

Con las dosificaciones propuestas se procedió a la elaboración de cada una de estas para obtener resultados que permitan tener una idea del comportamiento del HCR.

6.3.3. Determinación del porcentaje de agua libre óptimo.

Para la determinación del porcentaje de agua libre óptimo se elaboraron varios diseños, en los cuales se modificaba la cantidad de agua de manera similar a la metodología empleada en la elaboración del ensayo proctor que se realiza a los suelos.



Figura 12 Martillo vibratorio Hilti

La diferencia entre el proctor y el ensayo que se efectúa al HCR para determinar el porcentaje de agua libre óptimo se encuentra en el equipo empleado y la forma de compactación.

En hormigón compactado con rodillo el molde tiene un volumen de 7 dm^3 (Olla de Washington) y se compacta con un martillo vibratorio hasta que la pasta comience a fluir.

El porcentaje de agua libre óptimo resultante servirá para los ensayos posteriores, ya que se desea obtener la máxima densidad con este tipo de hormigón, la cual influirá en la resistencia.



Figura 13 Compactación del HCR en la Olla de Washington

6.3.3.1. Curvas Densidad vs. porcentaje de agua libre óptimo

Las curvas fueron las siguientes:

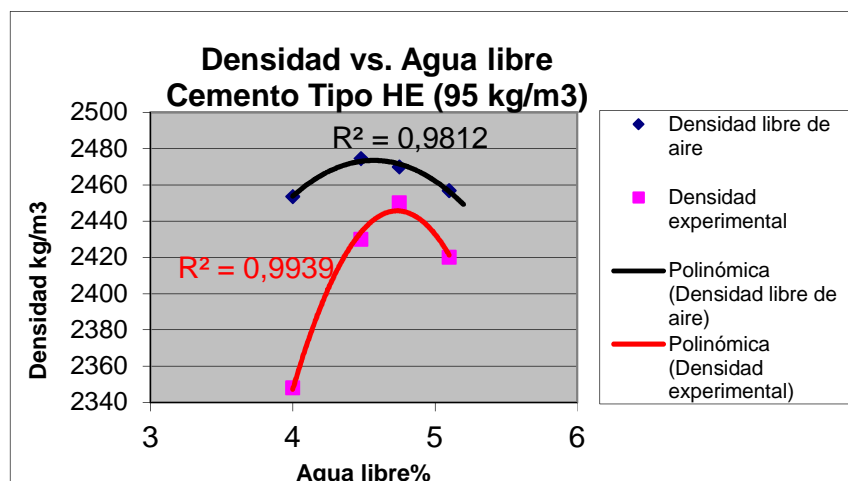


Figura 14 Curva densidad-porcentaje de agua libre con 95 kg/m³ de cemento tipo HE, sin incluir gravilla

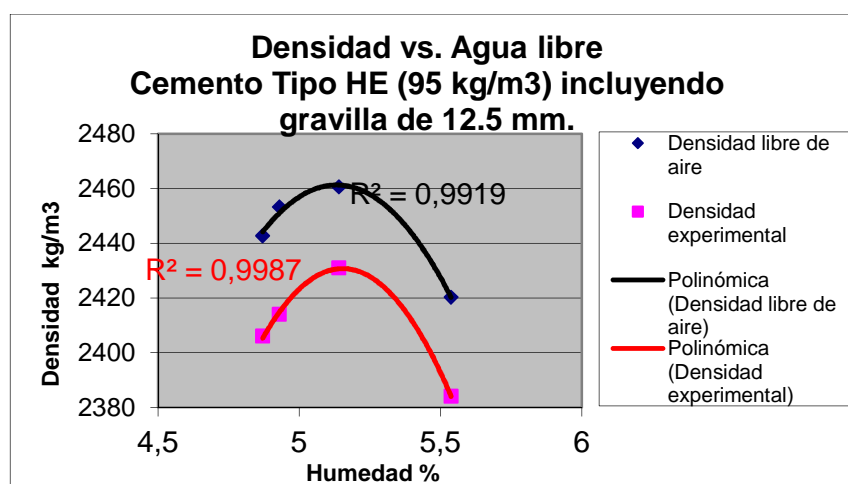


Figura 15 Curva densidad-porcentaje de agua libre con 95 kg/m³ de cemento tipo HE, incluyendo gravilla de 12.5 mm

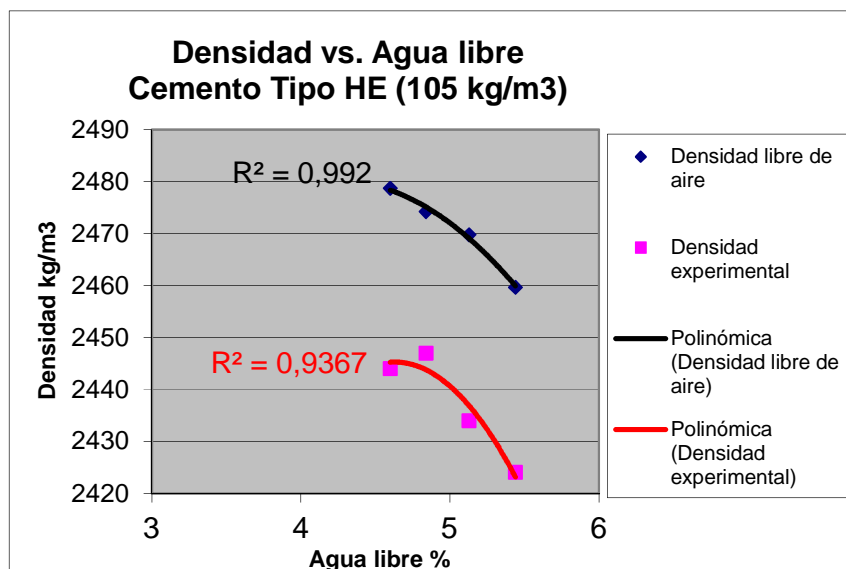


Figura 16 Curva densidad-porcentaje de agua libre con 105 kg/m³ de cemento tipo HE

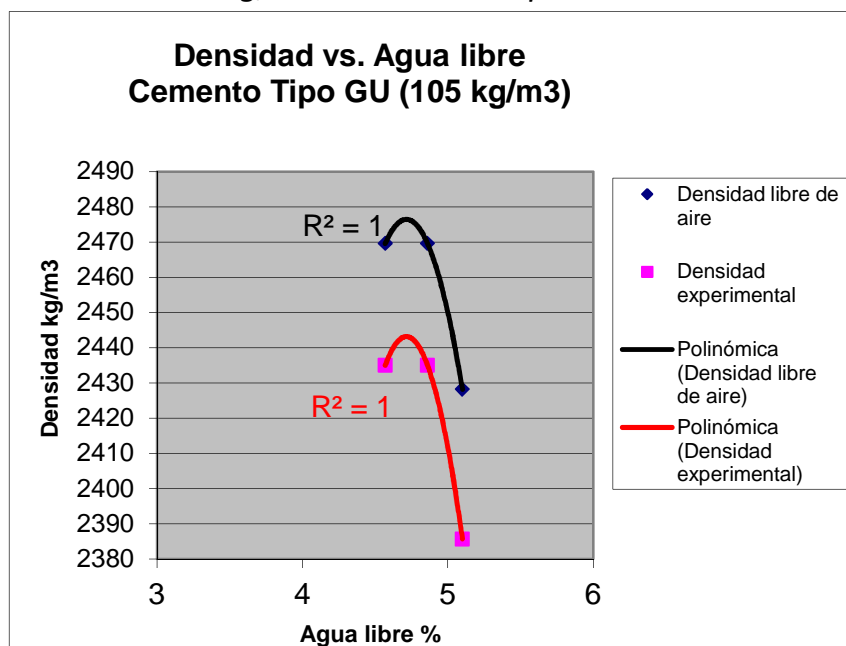


Figura 17 Curva densidad-porcentaje de agua libre con 105 kg/m³ de cemento tipo GU

6.3.3.2. Análisis de las curvas Densidad vs. Agua libre

Al comparar las gráficas para las dosificaciones con y sin gravilla se puede notar que en aquella que no se emplea gravilla el rango de agua libre respecto a la óptima, es mucho más amplio es decir un incremento de agua en la dosificación respecto al agua libre óptima no provocará cambios notables en la densidad; en cambio cuando se usa gravilla la curva se vuelve más sensible y una pequeña variación de agua respecto al agua libre óptima repercute en grandes variaciones en la densidad y por ende en la resistencia.

La comparación de estos gráficos también demuestra que se obtienen mayores resistencias en ausencia de gravilla. Por lo cual se optará por diseños sin gravilla.

La comparación entre las figuras 16 y 17 establece que el cemento HE como es su característica da mejores resultados en resistencia a edades tempranas.

6.3.4. Elaboración de Ensayos

Una vez conocido el comportamiento del HCR en pequeñas proporciones se realizaran pruebas a una mayor escala para evaluar de mejor manera el comportamiento de este tipo de hormigón.

Las dosificaciones propuestas para estas pruebas fueron las siguientes:

	<i>Diseños (kg/m³)</i>					
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
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
Densidad	2404	2420	2435	2420	2428	2452

Tabla V Dosificaciones propuestas para producción masiva

6.3.4.1. Resistencia a la compresión

En este ensayo, así como en tracción por compresión diametral (TCD), módulo elástico, trabajabilidad y pulso

ultrasonico se emplearon cilindros de dimensiones 150 x 300 mm de diámetro y altura respectivamente, esto fue debido a la restricción de que el molde tiene que tener como mínimo tres veces el tamaño máximo del agregado (TMA) empleado, el cual para el Proyecto San Francisco es 37.5 mm.

Los equipos usados para la elaboración de las muestras para este y los ensayos de: Tracción por compresión diametral, Módulo elástico, Ultrasonido y Tiempo de trabajabilidad son los siguientes:

El equipo empleado fue el siguiente:

Martillo vibratorio Pertenece a la marca HILTI, con el cual se compactaron los especímenes de 300 x 150 mm.

Las características del martillo cumplen con la norma ASTM C 1435.

Moldes metálicos. De dimensiones 150 x 300 mm de diámetro y altura respectivamente los cuales fueron

llenados con material en tres capas de igual espesor y compactadas con el martillo vibratorio hasta notar que la pasta comience a fluir.

Los moldes de este tipo son reusables y cumplen con la especificación ASTM C470

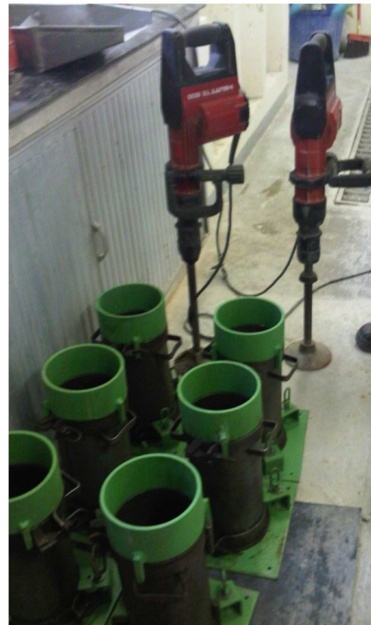


Figura 18 Martillos de compactación y moldes metálicos

Bandeja de mezclado Con capacidad de 30 decímetros cúbicos, la cual permita un correcto mezclado de los agregados con la pasta.



Figura 19 Bandeja de mezclado

El equipo empleado para la prueba de compresión fue el siguiente:

Prensa Hidráulica. Debe tener una capacidad suficiente para aplicar la carga por medio de un manejo mecánico.

La carga se debe aplicar de una forma continua a una velocidad constante, evitando provocar impactos a la muestra.

La prensa empleada para este ensayo es modelo ELE ADR 2000. Se aplicó una carga de 5.30 kN/s para cilindros de dimensiones 150 x 300 mm.



Figura 20 Prensa ELE ADR 2000kN

Procedimiento

Para poder tener un resultado óptimo del ensayo a compresión y de acuerdo con la norma ASTM C39 es necesario que las probetas hayan pasado por un proceso

de curado. Después de que han sido retiradas del tanque de curado y hasta el momento en que sea ensayada la muestra se debe mantener en condición húmeda, utilizando cualquier método para lograrlo.

Se coloca la probeta entre los soportes de la prensa y se asegura la misma. Luego se aplica la carga de forma continua hasta el momento de la falla. Finalmente se registra la carga máxima y la resistencia soportada por el cilindro durante el ensayo.

6.3.4.2. Resistencia a la tracción por compresión diametral

Para la realización de este ensayo, el equipo empleado fue el siguiente:

Prensa Hidráulica. Se utilizó la misma prensa empleada en el ensayo de compresión.

Para este ensayo la velocidad de carga de 2.10 kN/s para probetas de 150 x 300 mm.

Dispositivo de Sujeción Dado que la probeta es de mayor dimensión que los soportes de la prensa, es necesario utilizar un dispositivo de sujeción (molde metálico) para que la carga sea distribuida de manera uniforme sobre el cilindro.

Laminas de madera para apoyos Se empleo dos láminas de madera de 3 y 50 mm de espesor y ancho respectivamente, las cuales son colocadas en los extremos de contacto entre el cilindro y el molde metálico.



Figura 21 Dispositivo de sujeción y láminas de madera

Procedimiento

Se ubica la probeta en el interior del dispositivo de sujeción y entre estos se introducirá las láminas de madera de tal forma que se encuentren centradas previo a llevar el conjunto a la prensa para el ensayo. Se aplica la carga al cilindro de forma continua hasta llegar a la rotura. Se registran la carga máxima y la resistencia a tracción por compresión diametral

6.3.4.3. Modulo de Elasticidad y Módulo Secante

Los equipos utilizados para este ensayo son:

Prensa Hidráulica Debe ser de características similares a las mencionadas anteriormente, modelo ELE ADR 2000, la cual permita aplicar una carga continua.

Extensómetro Longitudinal El dispositivo del extensómetro longitudinal deberá estar situado de tal forma que su movimiento de deformación ocurra a lo

largo del mismo eje del cilindro y deberá estar ajustado concéntricamente.



Figura 22 Extensómetro longitudinal y Deformímetro

Procedimiento

Dado que es un hormigón especial el cual se espera obtenga su resistencia de diseño a un año, a diferencia de un hormigón convencional el cual alcanza su resistencia de diseño a los 28 días, se ha analizado de forma exhaustiva al HCR realizando los ensayos a diferentes edades para tener una proyección del alcance de su resistencia.

A cada edad se analiza una pareja de cilindros con el fin de tener resultados más precisos.

Antes de proceder al ensayo se debe determinar la frecuencia de carga a la cual se va a leer el deformímetro dependiendo de la edad que tenga. Se registraran las respectivas deformaciones para cada intervalo establecido.

6.3.4.4. Conductividad Térmica

Los equipos usados para la elaboración de las muestras fueron:

Moldes metálicos. De dimensiones 150 x 150 x 500 mm para la elaboración de vigas.

Caladora de núcleos. Para la extracción de núcleos de 100 mm de diámetro.

Cortadora. Para cortar los núcleos extraídos con un espesor de 40 mm



Figura 23 Extracción de núcleos

Los implementos que se usó para la elaboración de este ensayo son:

- Calentador de agua por inmersión.
- Fuente – Termocupla (buque superior)
- Receptor (buque inferior)
- Termopares (alambres de cobre y constantan)
- Galvanómetro
- Cronómetro



Figura 24 Ensayo para determinar la conductividad térmica del HCR marca CENCO

Procedimiento.

La muestra cuya dimensión es 100 mm de diámetro y 40 mm de altura se colocan entre los buques.

Se pone agua dentro de la fuente del buque superior y se enciende el calentador de agua por inmersión para elevar la temperatura de la misma y de esta manera lograr que el calor comience a transmitirse por la muestra de HCR y llegue al receptor.

Tanto emisor como receptor se encuentran al inicio de la prueba a temperatura ambiente y entre ellos se conectan los terminales del galvanómetro con el cual se toman los valores de corriente que se reportan a cada minuto.

Si la muestra se encuentra en condiciones húmedas no se darán lecturas sino hasta cuando el calor haya sido capaz de remover el agua de la misma y llegar al receptor. Este proceso puede tardar más de diez minutos. Luego se sigue con la toma de datos hasta cuando los valores de corriente medidos en el galvanómetro ya no varían.

Con los datos obtenidos se realiza la gráfica tiempo versus logaritmo de la corriente (t vs $\text{Log } i$) cuyas unidades deberán estar en segundos y amperios respectivamente; de este gráfico se obtiene la pendiente

que sirve para establecer la conductividad térmica del material ensayado.

Usando la formulación:

$$m = - \frac{kA}{2.303 l Mc}$$

En donde:

m= Pendiente del gráfico tiempo vs Log (i)

k= conductividad térmica [cal/(s m °C)]

A= Área de la muestra [m].

l= Espesor de la muestra [m].

M= Masa de la muestra [g].

c= calor específico del cobre [cal/(g °C)].

6.3.4.5. Coeficiente de dilatación térmica

Los especímenes para este ensayo fueron elaborados con los siguientes equipos:

Moldes metálicos. De dimensiones 102 x 102 x 286 mm, considerando las menores dimensiones de 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.

Procedimiento

Se llena la vigueta en dos capas las cuales deben ser compactadas hasta notar que fluya la pasta, entre capa y capa se colocará un terminal (termocupla) para medir la temperatura en el centro de la muestra.



Figura 25 Vigueta metálica de dimensiones 102 x 102 x 286 mm

A los 6 días de su elaboración se lleva a la muestra al horno y se comienza a elevar gradualmente la temperatura del mismo, de tal manera que al sétimo día la temperatura en el interior de la muestra, medida con la termocupla sea de aproximadamente 70 °C.

Se comienza la toma de muestras de temperatura y dilataciones a medida que la vigueta comienza a enfriarse. Todos estos datos sirven para determinar al coeficiente de dilatación térmica el cual es el valor de la pendiente del gráfico deformación unitaria versus temperatura.



Figura 26 Aparato para medir dilataciones

6.3.4.6. Velocidad de Pulso Ultrasónico

Los equipos utilizados son:

Equipo de velocidad de pulso El equipo de velocidad de pulso que se utilizó es de procedencia Suiza marca PROCEQ modelo Pundit Lab.

Este consiste de una unidad de pantalla, dos transductores que se ponen en contacto con la probeta, un generador de pulsaciones de 54 kHz, dos cables BNC de 1.5 m, un gel acoplador y una varilla de calibración.

Procedimiento

Antes de realizar cualquier tipo de ensayo se deberá calibrar el equipo utilizando la barra de calibración para verificar el correcto funcionamiento del equipo.



Figura 27 Barra de Calibración del Equipo de pulso ultrasónico

Se registrara en el equipo la longitud de la probeta a la cual se le realizara el ensayo y posteriormente se aplicara el gel acoplador sobre los transductores o directamente en las caras de la probeta.

Se colocara los transductores directamente opuestos el uno contra el otro presionándolos firmemente sobre la superficie de la muestra hasta poder obtener una lectura de la velocidad del pulso y de su tiempo que tardo en llegar de un transductor al otro a través de la probeta.



Figura 28 Determinación del pulso ultrasónico

6.3.4.7. Trabajabilidad

Procedimiento

Una vez que ya se ha logrado una caracterización del hormigón se procederá a realizar la prueba de trabajabilidad con los dos tipos de cementos con los cuales se han hecho los estudios previos HE y GU.

Se procederá a realizar un batch de HCR, el cual después de haber logrado una mezcla homogénea, se tomara la hora en la cual se realizara el primer cilindro como tiempo cero. Después de esto se dejara descansar la

mezcla por un periodo en la bandeja mezcladora cubierto por un plástico.

Luego se procederá a compactar otro cilindro de HCR y así sucesivamente.

En total se tomara un total de seis muestras

6.4 Curado Acelerado de Probetas

Mediante este procedimiento se pueden predecir las resistencias que alcanzará el hormigón a edades futuras. Esta técnica muy útil ya que permite realizar el control de calidad del hormigón en periodos muy cortos.

Los resultados reportados a un año plazo han sido producto de ensayar a probetas que han sido sometidas a curado acelerado.

6.4.1 Objetivo

Determinar las resistencias que alcanzará el hormigón compactado con rodillo a un año.

6.4.2 Equipos Utilizados

Tanque de curado acelerado. Debe ser hermético y mantener en su interior una temperatura constante.

6.4.3 Procedimiento

Los cilindros se colocarán en el interior del tanque de curado acelerado por el lapso de 16 días para acelerar el proceso de endurecimiento del hormigón.

En el periodo de de 16 días el procedimiento es el siguiente: durante el primer día se eleva paulatinamente la temperatura del agua que se encuentra en el interior del tanque desde temperatura ambiente hasta 90°C, los siguientes 14 días el agua deberá permanecer a esta temperatura y se debe evitar abrir el tanque de curado porque esta acción al igual que un cambio brusco en la temperatura provocaría un choque térmico en el hormigón, lo cual afectaría la estructura del

mismo repercutiendo en resultados erróneos. El día 15 se deberá comenzar a disminuir la temperatura gradualmente hasta que el agua llegue nuevamente a temperatura ambiente.

La placa de apoyo sobre la cual se colocan los cilindros no deberá impedir la circulación del agua por la base de los mismos; el espacio libre entre probetas y el nivel de agua sobre las mismas deberá ser como mínimo 100 mm de acuerdo a las especificaciones para este tipo que da la norma ASTM C 684

El detalle del procedimiento para el curado acelerado fue dado por recomendación del Dr. Ernest Schrader consultor del Proyecto, basado en experiencias propias e Investigaciones hechas por otros autores, las cuales confirman los resultados obtenidos.

En el anexo 11 se encuentra el procedimiento para este ensayo

CAPITULO VII

7. Resultados Obtenidos

7.1. Resistencia a la compresión vs. Tiempo

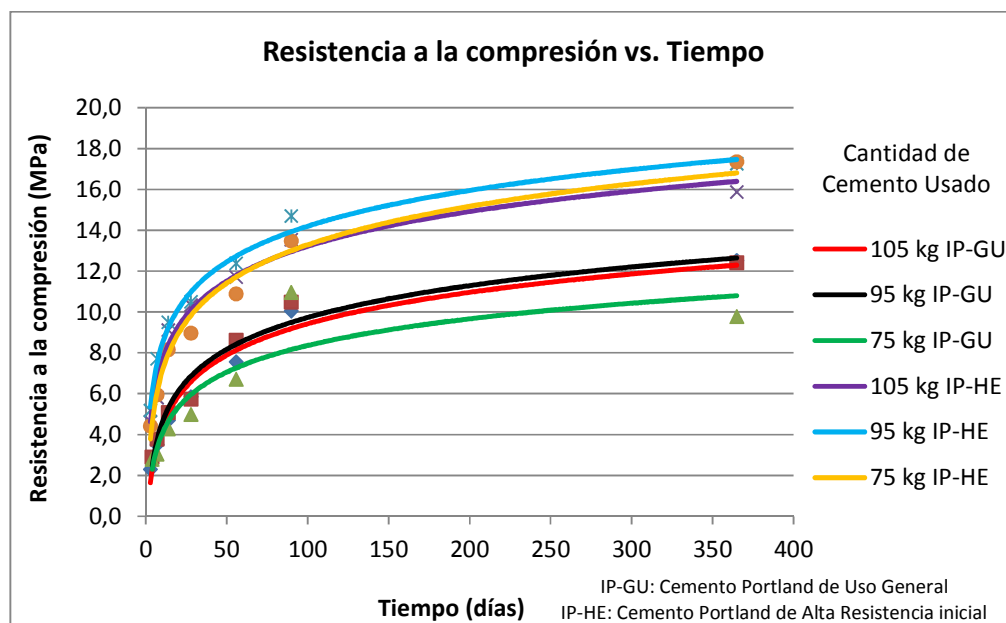


Figura 29 Curva Resistencia a la compresión vs. Tiempo

7.2. Resistencia a la tracción por compresión diametral (TCD) vs. Tiempo

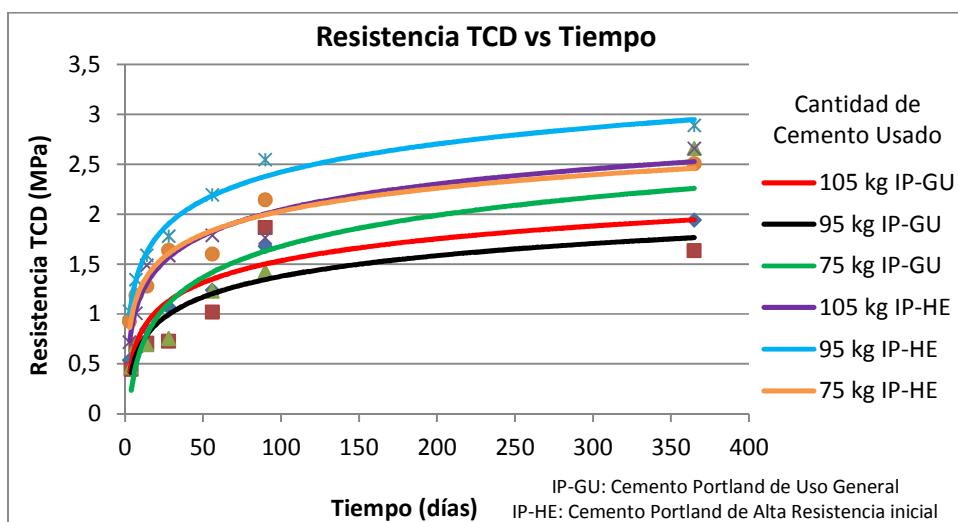


Figura 30 Curva Resistencia a tracción por compresión diametral vs. Tiempo

7.3. Módulo de Elasticidad vs. Tiempo

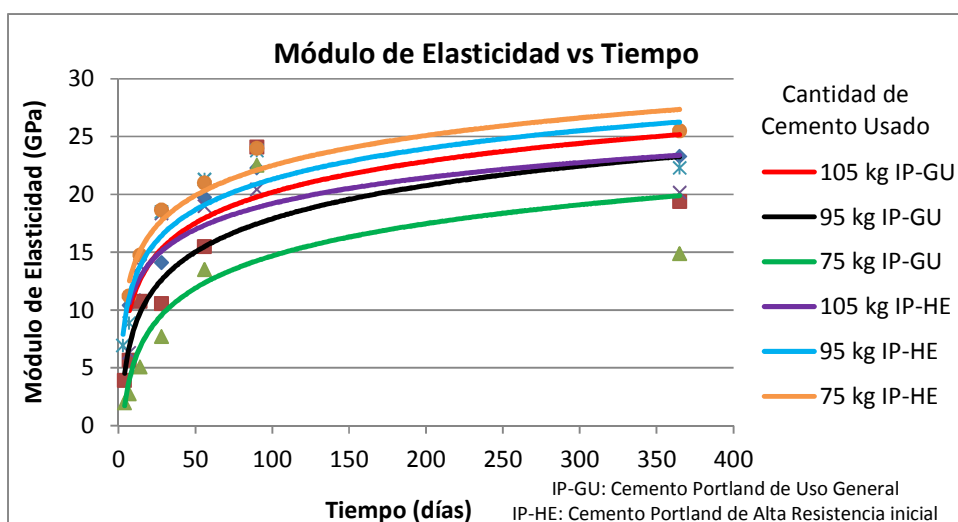


Figura 31 Curva Módulo de Elasticidad vs. Tiempo

7.4. Módulo Secante vs Tiempo

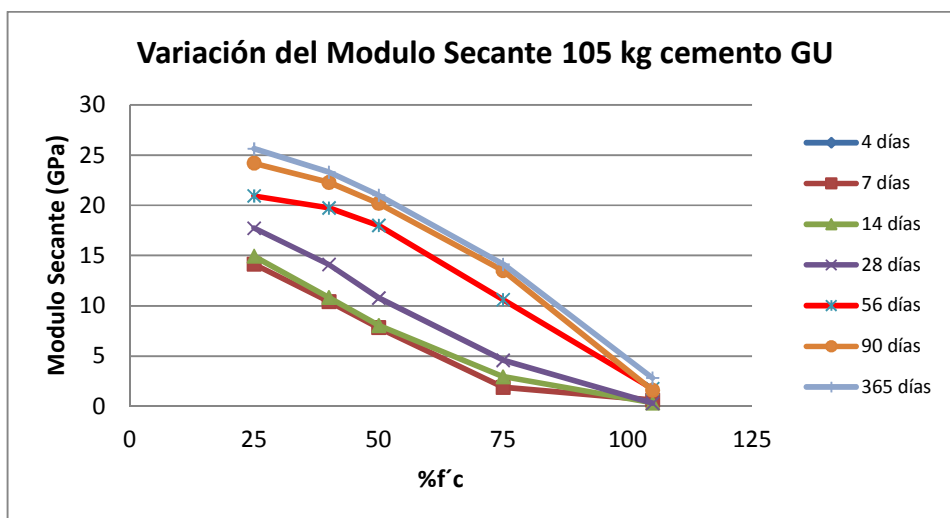


Figura 32 Variación del Módulo Secante (105 kg GU) vs. Porcentaje de Resistencia

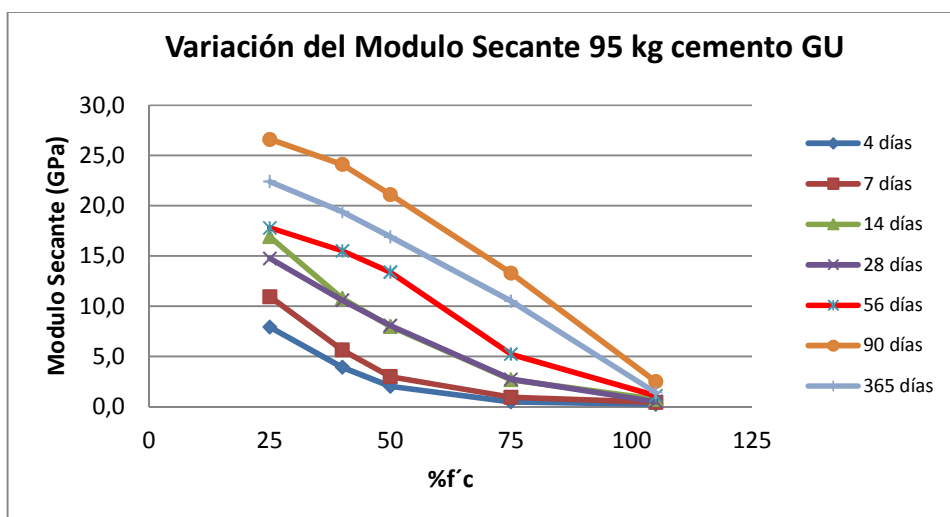


Figura 33 Variación del Módulo Secante (95 kg GU) vs. Porcentaje de Resistencia

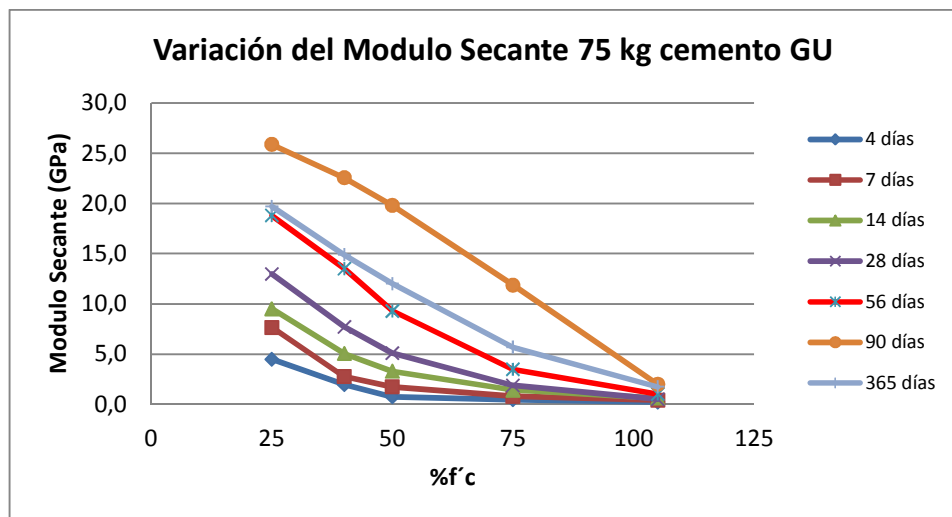


Figura 34 Variación del Módulo Secante (75 kg GU) vs. Porcentaje de Resistencia

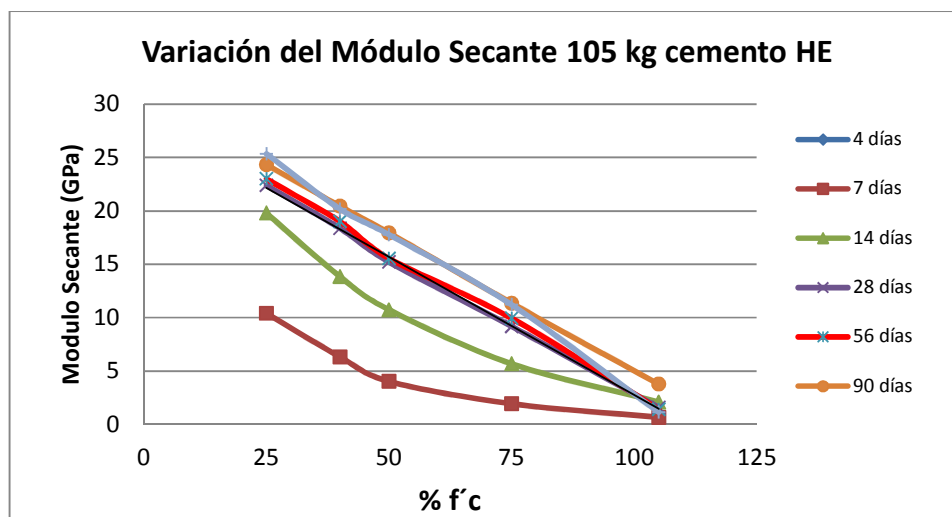


Figura 35 Variación del Módulo Secante (105 kg HE) vs. Porcentaje de Resistencia

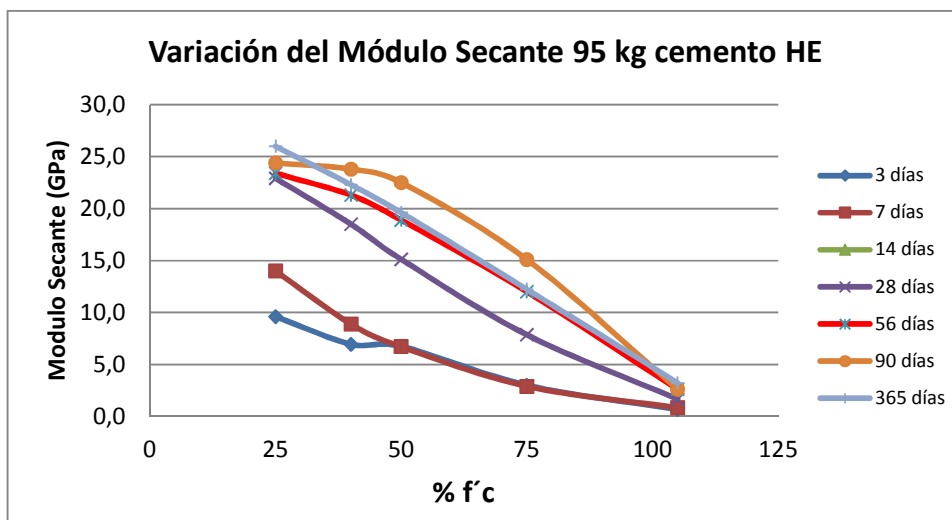


Figura 36 Variación del Módulo Secante (95 kg HE) vs. Porcentaje de Resistencia

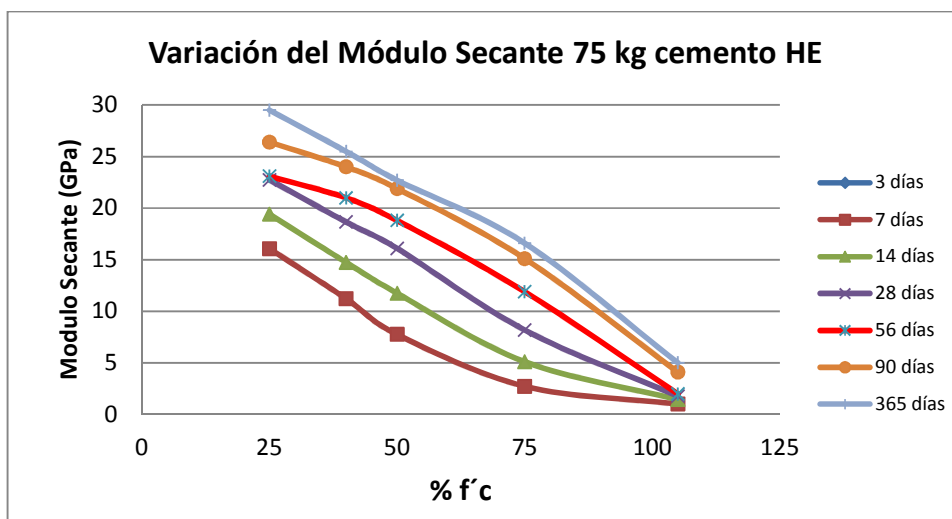


Figura 37 Variación del Módulo Secante (75 kg HE) vs. Porcentaje de Resistencia

7.5. Correlación Resistencia a la compresión vs. Velocidad de Pulso Ultrasónico

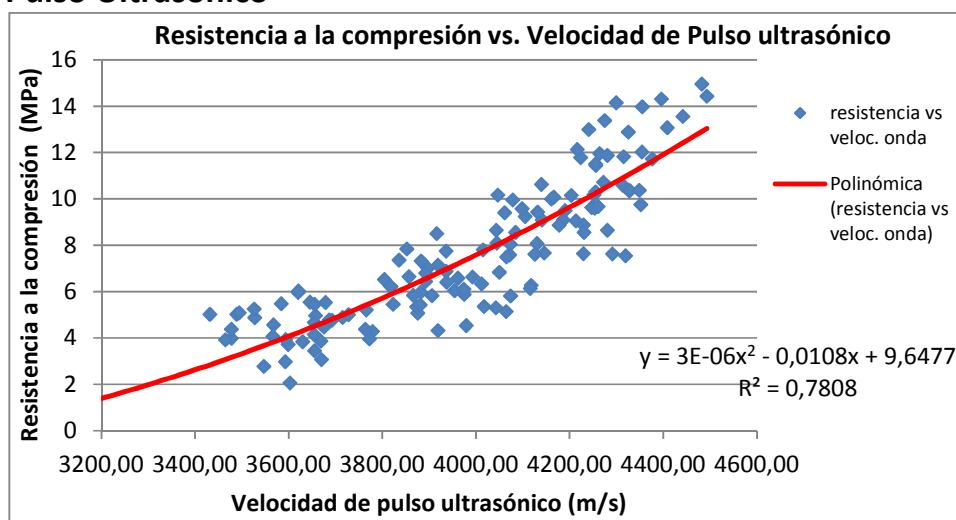


Figura 38 Correlación Resistencia a la compresión vs. Velocidad de pulso ultrasónico

7.6. Correlación Resistencia a la tracción (TCD) vs. Velocidad de Pulso Ultrasónico

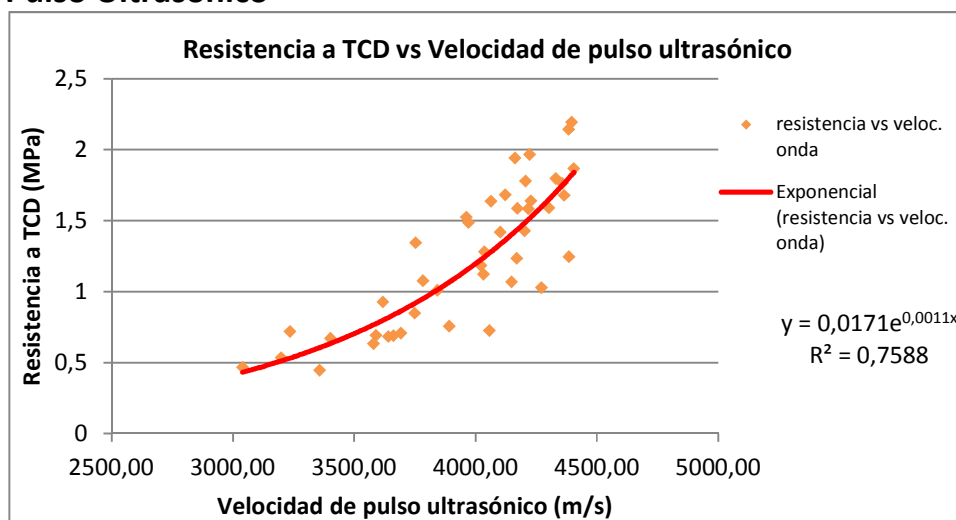


Figura 39 Correlación Resistencia a la tracción por compresión diametral vs. Velocidad de pulso ultrasónico

7.7. Correlación Modulo de Elasticidad vs Velocidad de Pulso Ultrasónico

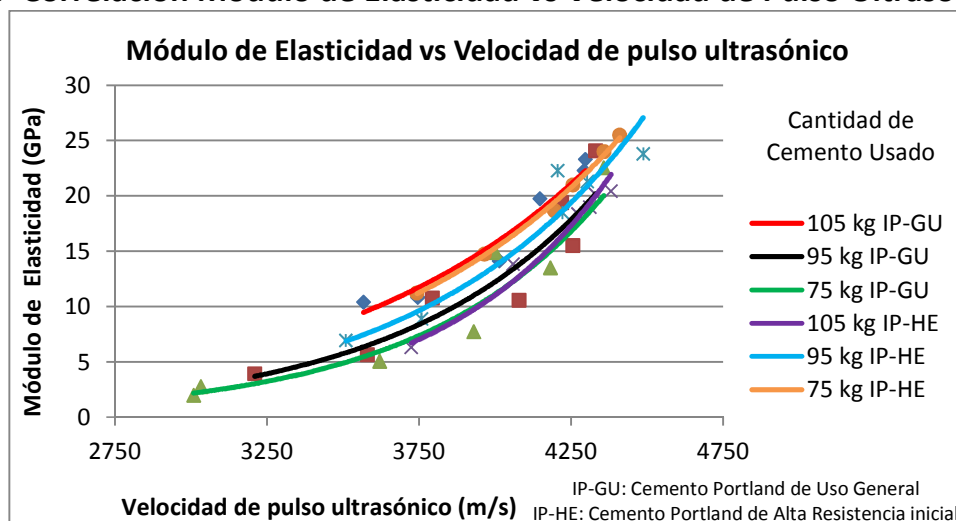


Figura 40 Correlación Módulo de Elasticidad vs. Velocidad de pulso ultrasónico

7.8. Correlación Resistencia a la compresión vs Módulo de Elasticidad

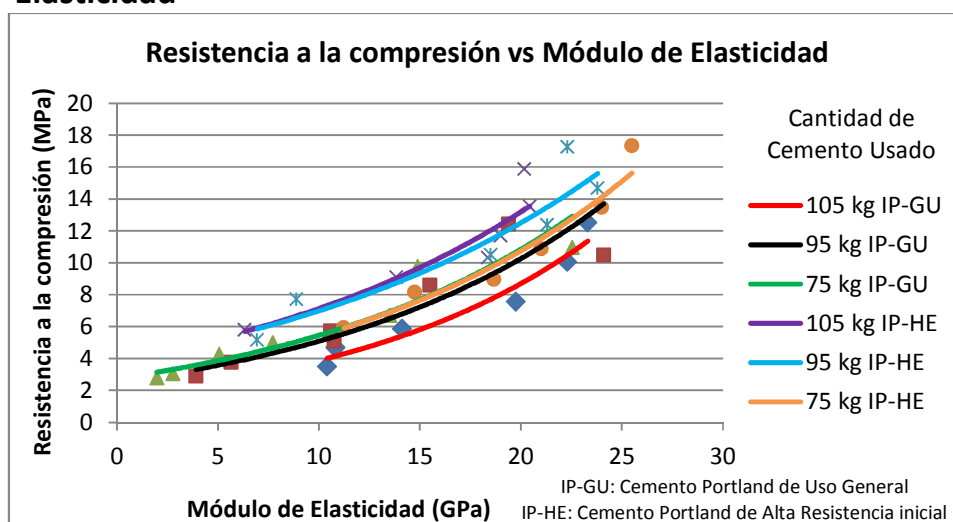


Figura 41 Correlación Resistencia a la compresión vs. Módulo de Elasticidad

7.9. Correlación Resistencia a la tracción por compresión diametral (TCD) vs Módulo de Elasticidad

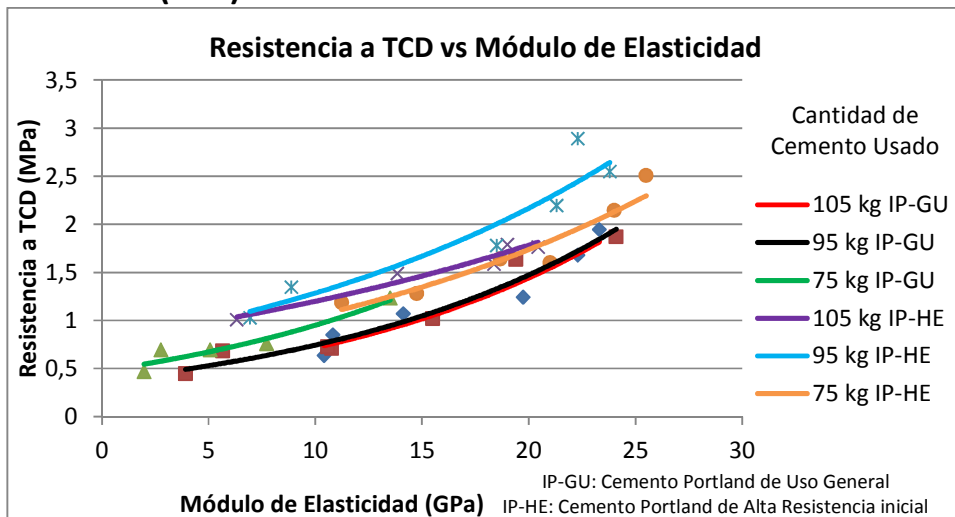


Figura 42 Correlación Resistencia a la tracción por compresión diametral vs. Módulo de Elasticidad

7.10. Coeficiente de Dilatación Térmica

Los resultados obtenidos fueron:

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 VI Resultados de Coeficiente de dilatación térmica

La obtención de estos valores se muestra en detalle en el anexo 8.

7.11. Constante de conductividad Térmica

Los resultados obtenidos fueron:

CONSTANTE DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	
Muestra 1	1.66 J/(s m °C)
Muestra 2	1.66 J/(s m °C)

Tabla VII Resultados de Conductividad térmica

El detalle se muestra en el anexo 9.

7.12. Resistencia a la compresión vs. Tiempo de trabajabilidad

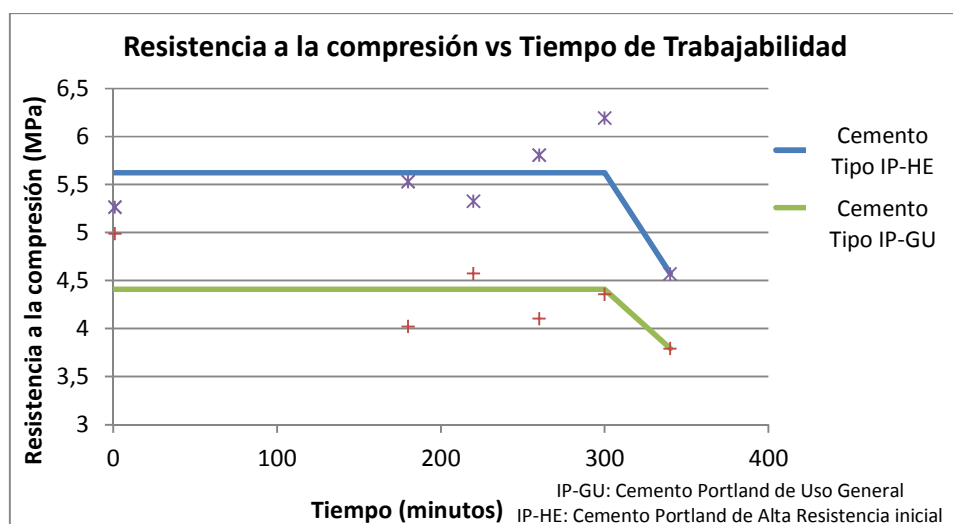


Figura 43 Resistencia a la compresión vs. Tiempo de Trabajabilidad

7.13. Ductilidad vs. Tiempo.

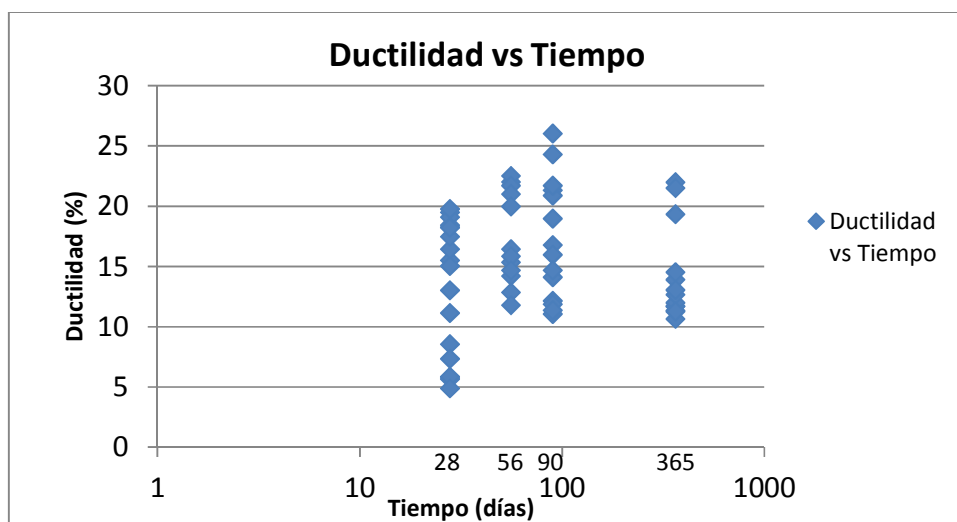


Figura 44 Ductilidad vs. Tiempo

CAPITULO VIII

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 μm , 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 tempranas 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 ($f'c=14$ 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 MPa 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 el anexo 10).

- 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.

CAPITULO IX

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.
- Las correlaciones efectuadas servirán para futuros proyectos, permitiendo caracterizar hormigón compactado con rodillo

mediante ensayos no destructivos como la velocidad de pulso ultrasónico.

- 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).

ANEXOS

ANEXO 1. Fórmulas para la determinación de Densidad y Absorción de agua del Agregado grueso

Densidad de volumen a 23°C del árido grueso en estado saturado superficialmente seco (kg/m³)

$$D_{sss} = \frac{B}{B - C} \times 1000$$

Densidad aparente del árido a 23°C (kg/m³)

$$D = \frac{A}{A - C} \times 1000$$

Porcentaje de absorción de agua del árido (%)

$$P_o = \frac{B - A}{A} \times 100$$

En donde:

A= masa en el aire de la muestra secada al horno (g).

B= masa en el aire de la muestra en estado superficialmente seco (g).

C= masa en el agua de la muestra en estado saturado (g).

D_s = densidad de volumen a 23 °C del árido grueso seco (kg/ m³).

D_{sss} = densidad de volumen a 23 °C del árido grueso en estado saturado superficialmente seco (kg/ m³).

D= densidad aparente del árido a 23 °C (kg/ m³).

P_o = porcentaje de absorción de agua del árido grueso (%)

Piedra 38 mm

D_s:	2610	kg/m ³
D_{sss}:	2687	kg/m ³
D:	2720	kg/m ³
Po:	1,05	%

Piedra 19 mm

D_s:	2610	kg/m ³
D_{sss}:	2633	kg/m ³
D:	2720	kg/m ³
Po:	1,53	%

ANEXO 2. Fórmulas para la determinación de Densidad y Absorción de agua del Agregado fino.

Densidad de volumen a 23°C del árido fino seco (kg/m³)

$$D_s = \frac{A}{B + S - C} \times 1000$$

Densidad de volumen a 23°C del árido fino en estado saturado superficialmente seco (kg/m³)

$$D_{sss} = \frac{S}{B + S - C} \times 1000$$

Densidad aparente del árido a 23°C (kg/m³)

$$D = \frac{A}{A + B - C} \times 1000$$

Porcentaje de absorción de agua del árido (%)

$$P_o = \frac{S - A}{A} \times 100$$

En donde:

A= masa en el aire de la muestra secada al horno (g).

B= masa del matraz lleno de agua hasta la marca de calibración (g).

S= masa en el aire de la muestra en estado superficialmente seco (g).

C= masa del matraz con la muestra llena de agua hasta la marca de calibración (g).

D_s = densidad de volumen a 23 °C del árido fino seco (kg/ m³).

D_{sss} = densidad de volumen a 23 °C del árido fino en estado saturado superficialmente seco (kg/m^3).

D = densidad aparente del árido a 23 °C (kg/m^3).

P_o = porcentaje de absorción de agua del árido grueso (%)

Arena Triturada

Ds:	2533	kg/m^3
Dsss:	2588	kg/m^3
D:	2682	kg/m^3
Po:	2,19	%

Arena Natural

Ds:	2443	kg/m^3
Dsss:	2529	kg/m^3
D:	2673	kg/m^3
Po:	3,52	%

ANEXO 3. Granulometrías de agregado grueso y fino

Piedra 38 mm

Granulometría del agregado grueso INEN 696 ASTM C 448					
Tamiz		Retenido parcial (g)	Retenido parcial %	Retenido acumulado %	Pasante acumulado %
INEN	ASTM				
100 mm	4 in.	---	---	---	---
90 mm	3½ in.	---	---	---	---
75 mm	3 in.	---	---	---	---
63 mm	2½ in.	---	---	---	---
50 mm	2 in.	0,0	0	0	100
37.5 mm	1½ in.	0,0	0	0	100
25 mm	1 in.	12058,0	73	73	27
19 mm	¾ in.	4341,0	26	99	1
12.5 mm	½ in.	---	---	---	---
9.5 mm	3/8 in.	85,0	1	100	0
4,75 mm	No. 4	---	---	---	---
2,36 mm	No. 8	---	---	---	---
1,18 mm	No. 16	---	---	---	---
300 µm	No. 50	---	---	---	---
150 µm	No. 100	---	---	---	---
BANDEJA		66,5	0	100	0
Módulo de finura : 8,0					

Piedra 19 mm

Granulometría del agregado grueso INEN 696 ASTM C 448					
Tamiz		Retenido parcial (g)	Retenido parcial %	Retenido acumulado %	Pasante acumulado %
INEN	ASTM				
100 mm	4 in.	---	---	---	---
90 mm	3½ in.	---	---	---	---
75 mm	3 in.	---	---	---	---
63 mm	2½ in.	---	---	---	---
50 mm	2 in.	---	---	---	---
37.5 mm	1½ in.	---	0	0	100
25 mm	1 in.	0,0	0	0	100
19 mm	¾ in.	2686,0	27	27	73
12.5 mm	½ in.	5173	52	79	21
9.5 mm	3/8 in.	1158,0	12	90	10
4,75 mm	No. 4	870,0	9	99	1
2,36 mm	No. 8	---	---	---	---
1,18 mm	No. 16	---	---	---	---
300 µm	No. 50	---	---	---	---
150 µm	No. 100	---	---	---	---
BANDEJA		105,5	1	100	0
Módulo de finura :				7,16	

Arena Triturada

Tamiz		Retenido	Retenido	Retenido	Pasante
INEN	ASTM	Parcial (g)	Parcial %	Acumulado %	Acumulado %
9,50 mm	3/8 in.	1,0	0	0	100
4,75 mm	No. 4	21,5	3	3	97
2,36 mm	No. 8	213,5	31	34	66
1,18 mm	No. 16	162,5	23	57	43
600 µm	No. 30	101,0	14	71	29
300 µm	No. 50	78,0	11	83	18
150 µm	No. 100	53,0	8	90	10
BANDEJA		69,5	10	100	0
MÓDULO DE FINURA :					3,4

Arena Natural

Tamiz		Retenido	Retenido	Retenido	Pasante
INEN	ASTM	Parcial (g)	Parcial %	Acumulado %	Acumulado %
9,50 mm	3/8 in.	4,0	1	1	99
4,75 mm	No. 4	1,5	0	1	99
2,36 mm	No. 8	36,0	5	6	94
1,18 mm	No. 16	100,0	14	20	80
600 µm	No. 30	129,0	18	39	61
300 µm	No. 50	196,5	28	67	33
150 µm	No. 100	162,5	23	90	10
BANDEJA		70,5	10	100	0
MÓDULO DE FINURA :					2,2

ANEXO 4. Determinación de los materiales más finos que 75 μm

Piedra 38 mm

Peso Seco Inicial:	5100,5	g
Peso Seco Final después del Lavado:	5071	g
Porcentaje menor a 75 micrómetros (ASTM #200):	0,6	%

Piedra 19 mm

Peso Seco Inicial:	2600	g
Peso Seco Final después del Lavado:	2578	g
Porcentaje menor a 75 micrómetros (ASTM #200):	0,8	%

Arena Triturada

Peso Seco Inicial:	746,27	g
Peso Seco Final después del Lavado:	694	g
Porcentaje menor a 75 micrómetros (ASTM #200):	7,0	%

Arena Natural

Peso Seco Inicial:	744,86	g
Peso Seco Final después del Lavado:	703	g
Porcentaje menor a 75 micrómetros (ASTM #200):	5,6	%

ANEXO 5. Determinación de grumos de arcilla y materiales deleznales

Piedra 38 mm

TAMIZ (PAS./RET.) mm.	% EN PESO DE LA FRACCIÓN	PESO INICIAL DE LA FRACCIÓN (g.)	PESO FINAL DE LA FRACCIÓN (g.)	% DE PARTICULAS DELEZNABLES Y GRUMOS DE ARCILLA (Fracción Ponderada)
38 x 19	99,4	3372,13	3349,90	0,66
19 x 9,5	0,6	56,06	48,10	0,08
9,5 x 4,75	-----		-----	-----

% DE PARTICULAS DELEZNABLES Y GRUMOS DE ARCILLA DE LA MUESTRA

0,74 %

Piedra 19 mm

TAMIZ (PAS./RET.) mm.	% EN PESO DE LA FRACCIÓN	PESO INICIAL DE LA FRACCIÓN (g.)	PESO FINAL DE LA FRACCIÓN (g.)	% DE PARTICULAS DELEZNABLES Y GRUMOS DE ARCILLA (Fracción Ponderada)
38 x 19	12,9	1238,77	1236,86	0,02
19 x 9,5	70,0	2501,54	2498,97	0,07
9,5 x 4,75	17,2	1248,16	1241,84	0,09

% DE PARTICULAS DELEZNABLES Y GRUMOS DE ARCILLA DE LA MUESTRA

0,18 %

Arena Triturada

Peso Retenido en Tamiz ASTM # 16	119,93 g
Peso Retenido en Tamiz ASTM # 20	118,62 g
Cantidad de Grumos de Arcilla	1,1 %

Arena Natural

Peso Retenido en Tamiz ASTM # 16	100,03 g
Peso Retenido en Tamiz ASTM # 20	98,65 g
Cantidad de Grumos de Arcilla	1,4 %

ANEXO 6. Presencia de Materia orgánica

Arena Triturada

COLOR DE LA MUESTRA ENSAYADA	EQUIVALENCIA COLORIMETRICA	PRESENCIA DE IMPUREZAS
Claro	1	No

Arena Natural

COLOR DE LA MUESTRA ENSAYADA	EQUIVALENCIA COLORIMETRICA	PRESENCIA DE IMPUREZAS
Amarillo	2	No

ANEXO 7. Gradación Granulométrica Propuesta (1)

Proyecto : **SAN FRANCISCO**

Material Nº 1: **ASTM # 4**

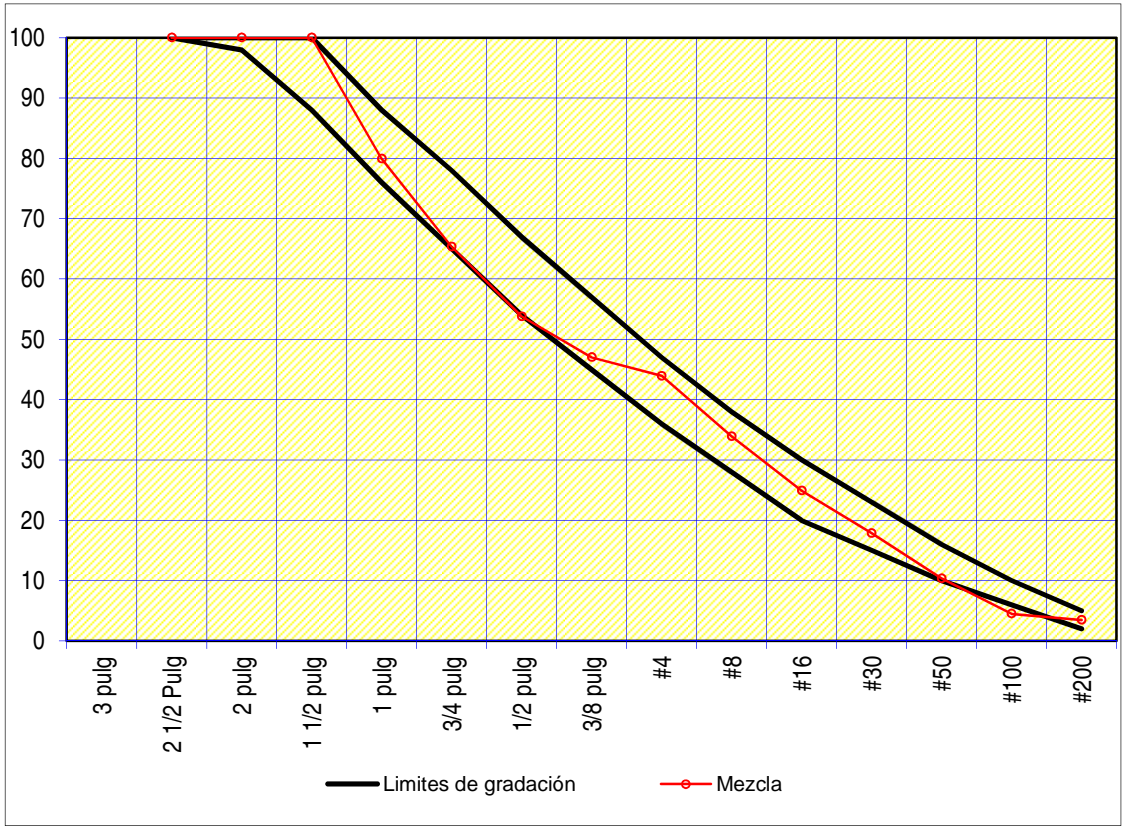
Material Nº 2: **ASTM # 56**

Material Nº 3: **CRUSHED SAND**

Material Nº 4: **NATURAL SAND**

Material Nº 5: **GRAVILLA (12.5 X 5.0 mm)**

Tamices	Mat Nº 1 1 27,5%		Mat Nº 2 2 27,5%		Mat Nº 3 3 30,0%		Mat Nº 5 5 0,0%		Mat Nº 4 4 15,0%		Total
3	100,0	27,5	100,0	27,5	100,0	30,0	100,0	0,0	100,0	15,0	100,0
2 1/2	100,0	27,5	100,0	27,5	100,0	30,0	100,0	0,0	100,0	15,0	100,0
2	100,0	27,5	100,0	27,5	100,0	30,0	100,0	0,0	100,0	15,0	100,0
1 1/2	100,0	27,5	100,0	27,5	100,0	30,0	100,0	0,0	100,0	15,0	100,0
1	27,0	7,4	100,0	27,5	100,0	30,0	100,0	0,0	100,0	15,0	79,9
3/4	1,0	0,3	73,0	20,1	100,0	30,0	100,0	0,0	100,0	15,0	65,4
1/2	0,0	0,0	32,0	8,8	100,0	30,0	100,0	0,0	100,0	15,0	53,8
3/8	0,0	0,0	10,0	2,8	98,0	29,4	31,3	0,0	99,0	14,9	47,0
#4	0,0	0,0	1,0	0,3	96,0	28,8	3,0	0,0	99,0	14,9	43,9
#8	0,0	0,0	0,0	0,0	66,0	19,8	1,0	0,0	94,0	14,1	33,9
#16	0,0	0,0	0,0	0,0	43,0	12,9	0,0	0,0	80,0	12,0	24,9
#30	0,0	0,0	0,0	0,0	29,0	8,7	0,0	0,0	61,0	9,2	17,9
#50	0,0	0,0	0,0	0,0	18,0	5,4	0,0	0,0	33,0	5,0	10,4
#100	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	3,0	0,0	0,0	10,0	1,5	4,5
#200	0,7	0,2	0,4	0,1	8,4	2,5	0,0	0,0	4,3	0,6	3,5
Mod finura	8,0	2,2	7,2	2,0	3,4	1,0	6,6	0,0	2,2	0,3	5,5



Gradación Granulométrica Propuesta (2)

Proyecto : SAN FRANCISCO

Material Nº 1: ASTM # 4

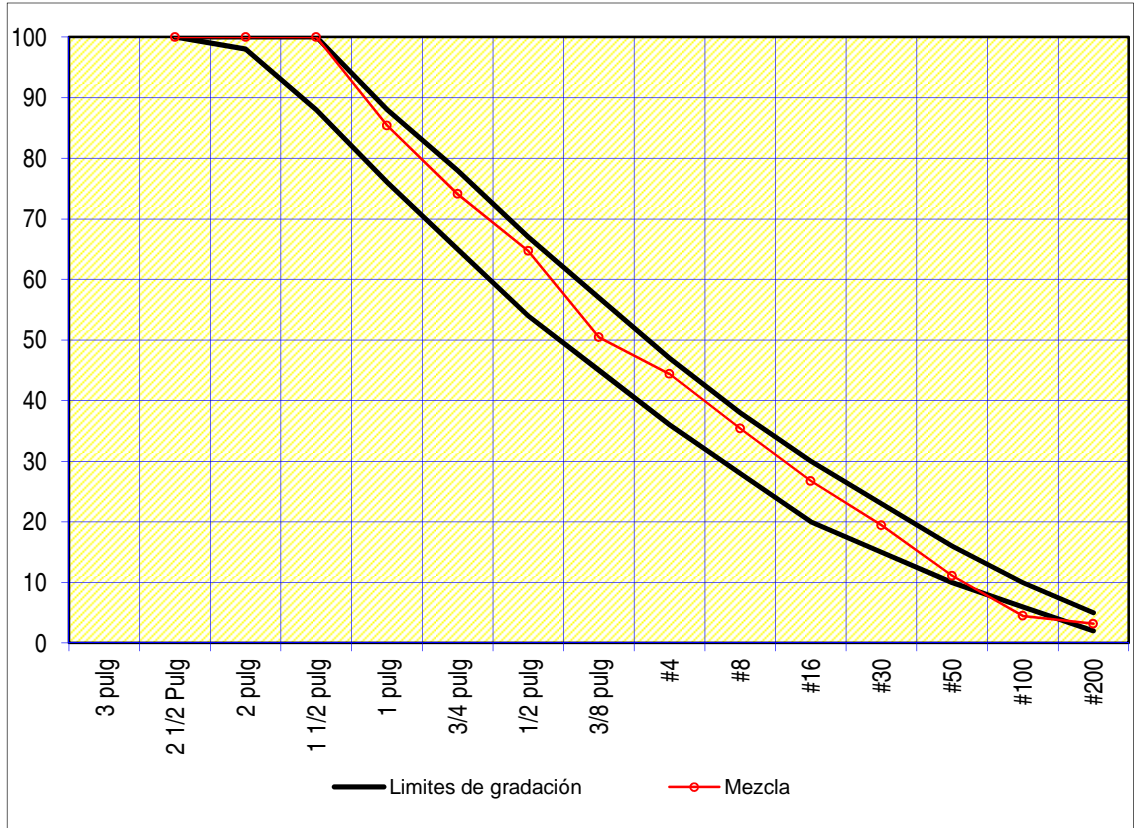
Material Nº 2: ASTM # 56

Material Nº 3: CRUSHED SAND

Material Nº 4: NATURAL SAND

Material Nº 5: GRAVILLA (12.5 X 5.0 mm)

Tamices	Mat Nº 1	20,0%	Mat Nº 2	22,5%	Mat Nº 3	25,0%	Mat Nº 5	12,5%	Mat Nº 4	20,0%	Total
3	100,0	20,0	100,0	22,5	100,0	25,0	100,0	12,5	100,0	20,0	100,0
2 1/2	100,0	20,0	100,0	22,5	100,0	25,0	100,0	12,5	100,0	20,0	100,0
2	100,0	20,0	100,0	22,5	100,0	25,0	100,0	12,5	100,0	20,0	100,0
1 1/2	100,0	20,0	100,0	22,5	100,0	25,0	100,0	12,5	100,0	20,0	100,0
1	27,0	5,4	100,0	22,5	100,0	25,0	100,0	12,5	100,0	20,0	85,4
3/4	1,0	0,2	73,0	16,4	100,0	25,0	100,0	12,5	100,0	20,0	74,1
1/2	0,0	0,0	32,0	7,2	100,0	25,0	100,0	12,5	100,0	20,0	64,7
3/8	0,0	0,0	10,0	2,3	98,0	24,5	31,3	3,9	99,0	19,8	50,5
#4	0,0	0,0	1,0	0,2	96,0	24,0	3,0	0,4	99,0	19,8	44,4
#8	0,0	0,0	0,0	0,0	66,0	16,5	1,0	0,1	94,0	18,8	35,4
#16	0,0	0,0	0,0	0,0	43,0	10,8	0,0	0,0	80,0	16,0	26,8
#30	0,0	0,0	0,0	0,0	29,0	7,3	0,0	0,0	61,0	12,2	19,5
#50	0,0	0,0	0,0	0,0	18,0	4,5	0,0	0,0	33,0	6,6	11,1
#100	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	2,5	0,0	0,0	10,0	2,0	4,5
#200	0,7	0,1	0,4	0,1	8,4	2,1	0,0	0,0	4,3	0,9	3,2
Mod finura	8,0	1,6	7,2	1,6	3,4	0,9	6,6	0,8	2,2	0,4	5,3

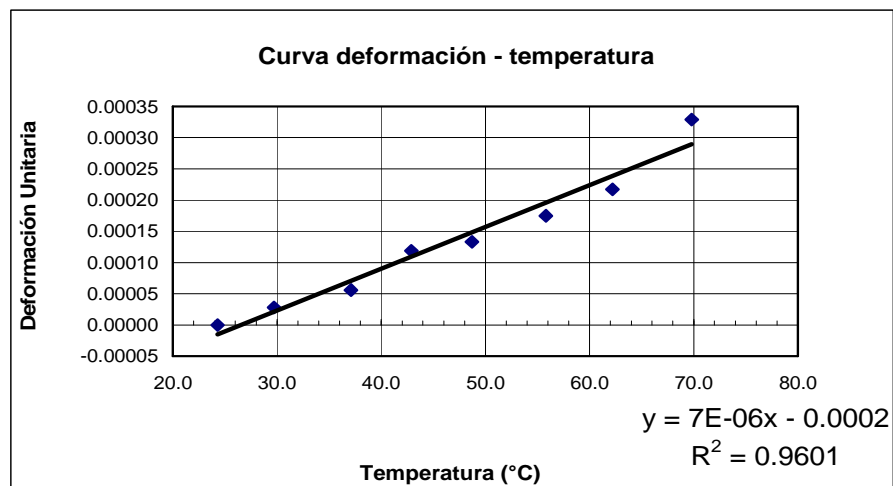


ANEXO 8. Determinación del Coeficiente de Dilatación Térmica

Fecha moldeo: 21/07/2011
Fecha ensayo: 28/07/2011
Muestra: 1
Elemento:

Diseño: HCR San Francisco
Edad: 7 días
Condición: Muestra húmeda
Lado: 102 mm
Longitud: 286 mm
Coefficiente de dilatación térmica: 7 E-06 (1/°C)

Temperatura (°C)	Deformación Unitaria
24.3	0.00000
69.8	0.00033
62.2	0.00022
55.8	0.00017
48.7	0.00013
42.9	0.00012
37.1	0.00006
29.7	0.00003

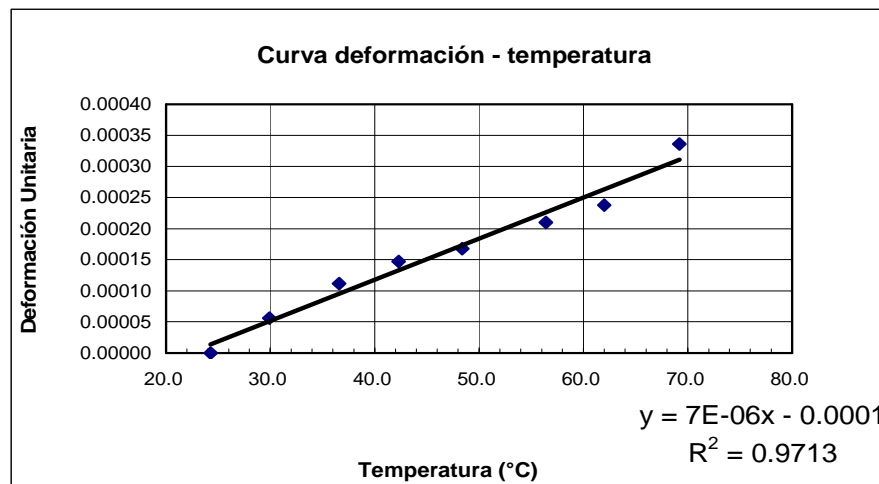


Determinación del Coeficiente de Dilatación Térmica

Fecha moldeo: 21/07/2011
Fecha ensayo: 28/07/2011
Muestra: 2
Elemento:

Diseño: HCR San Francisco
Edad: 7 días
Condición: Muestra húmeda
Lado: 103 mm
Longitud: 286 mm
Coeficiente de dilatación
térmica: 7 E-06 (1/°C)

Temperatura °C	Deformación Unitaria
24.3	0.00000
69.2	0.00034
62.0	0.00024
56.4	0.00021
48.4	0.00017
42.3	0.00015
36.6	0.00011
29.9	0.00006



ANEXO 9. Determinación de Conductividad Térmica.

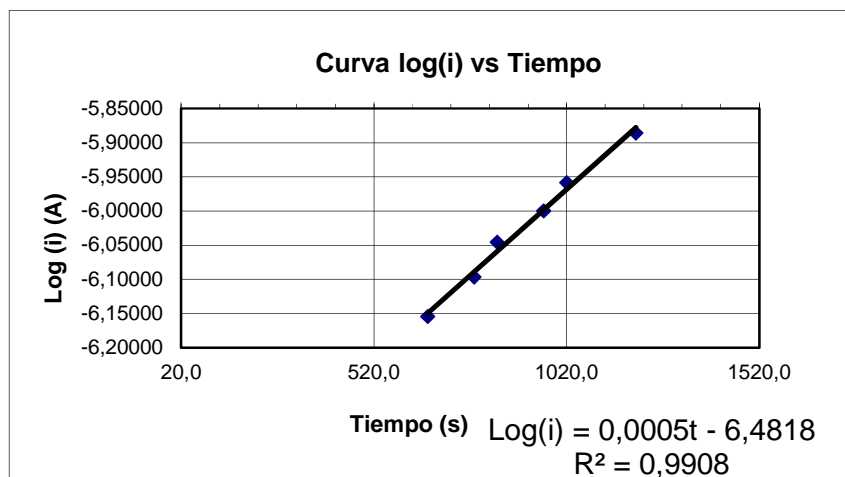
Fecha moldeo: 11/08/2011
Fecha ensayo: 19/08/2011
Muestra: 1
Diseño: HCR San Francisco
Edad: 8
Condición: Muestra húmeda
Diámetro: 100 mm
Espesor [l]: 40 mm
Masa [M]: 727,71 g
Área [A]: 0,007853982 m²
Calor esp. Cu [c] 0,093 cal/(g °C)

$$m = -kA / (2,303 IMc)$$

Conductividad térmica

[k]: 1,66 (J/s m °C)

Tiempo (s)	(log (i)) (A)
660,0	-6,15490
780,0	-6,09691
840,0	-6,04576
960,0	-6,00000
1020,0	-5,95861
1200,0	-5,88606



Determinación de Conductividad Térmica.

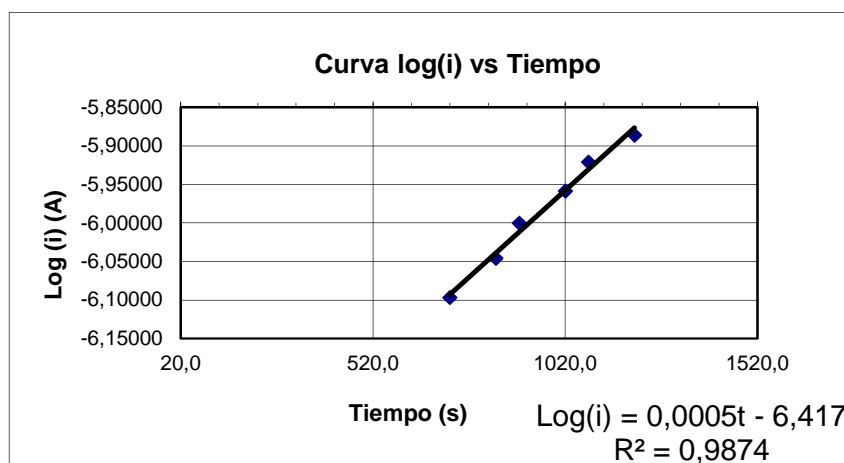
Fecha moldeo: 11/08/2011
Fecha ensayo: 19/08/2011
Muestra: 2
Diseño: HCR San Francisco
Edad: 8
Condición: Muestra húmeda
Diámetro: 100 mm
Espesor [l]: 40 mm
Masa [M]: 727,54 g
Área [A]: 0,007853982 m²
Calor esp. Cu [c] 0,093 cal/(g °C)

$$m = -kA / (2,303 IMc)$$

Conductividad termica

[k]: 1,66 (J/s m °C)

Tiempo (s)	(log (i)) (A)
720,0	-6,09691
840,0	-6,04576
900,0	-6,00000
1020,0	-5,95861
1080,0	-5,92082
1200,0	-5,88606



ANEXO 10. Coeficiente de derivación para distintas relaciones.

Ensayo	Coeficiente de correlación
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

ANEXO 11.

Presas CCR Chontal & San Francisco.

Procedimiento para el ensayo de curado acelerado aplicando al Concreto Compactado con Rodillo (CCR)

Con el fin de predecir la resistencia última a largo plazo tanto del CCR como del Concreto Convencional, los cilindros de prueba pueden ser sometidos a un procedimiento especial de curado acelerado. Un mínimo de tres (3) cilindros son sugeridos para cada mezcla a ser ensayada. El procedimiento detallado de este ensayo, utilizado con gran éxito en el pasado con el diseño y construcción de presas de CCR es detallado a continuación.

Aplicando este procedimiento se obtendrá una razonable y conservadora indicación de la resistencia última del concreto a largo plazo, sometido a condiciones de curado normal. No se conocerá si esta resistencia a largo plazo será alcanzada a 90, 180 o un año, pero el resultado indicará la resistencia final a largo plazo o resistencia potencial que alcanzará el concreto bajo condiciones de curado normal.

- Curar los cilindros de prueba en un tanque de curado estandarizado o cuarto húmedo por tres (3) días a 21 °C (70 °F). Los cilindros de prueba de las mezclas más pobres por su debilidad deberán colocarse en el tanque de curado o cuarto húmedo, dejando sin remover los moldes de PVC que los protegen. Los cilindros de las mezclas de CCR con alta resistencia y de Concreto Convencional se les puede remover estos moldes de PVC a uno (1) y hasta siete (7) días después dependiendo de su resistencia.

- Sumergir totalmente en agua los cilindros de prueba al iniciar el día cuatro (4). EL tanque donde está el agua debe estar cubierto. Un tanque especial con una fuente de agua caliente y una excelente circulación de esta agua caliente se requiere. Alternativamente los cilindros pueden ser colocados en un recipiente con agua que este cubierto y este a su vez colocado dentro de un horno que pueda controlar la temperatura. Se debe asegurar que los cilindros están totalmente en agua.
- Desde el inicio del día 4 al inicio del día 5 (24 horas) elevar la temperatura del agua desde 21°C (+2,-5) a 90°C a una tasa uniforme cerca de 2.9 °C/hr (70 °F a 194 °F a una tasa uniforme de 5.1 °F/h).
- Mantener la temperatura del agua a 90°C (+2,-5) (194°F) durante al menos los siguientes siete (7) días (Inicio del día 5 hasta el inicio del día 12). Una duración más larga y hasta de 14 días es deseable, pero con este procedimiento no necesariamente se obtienen incrementos adicionales en la resistencia del concreto. En cualquier caso debe asegurarse que el agua no se evapore o que se requiera adicionar agua.
- Desde el inicio del día 12 hasta el inicio del día 13 (24 horas), disminuir la temperatura desde los 90°C a 21 °C a una tasa uniforme de cerca de 2.9°C/hr (194 °F a 70°F a una tasa uniforme de 5.1 °F/hr). Este proceso puede estar acompañado aplicando enfriamiento natural.
- Mantener los cilindros a una temperatura de 21°C durante las siguiente 24 horas (día 13).
- Ensayar los cilindros de prueba a los 14 días.

La figura I, resume el procedimiento a seguir durante la ejecución del ensayo de curado acelerado.

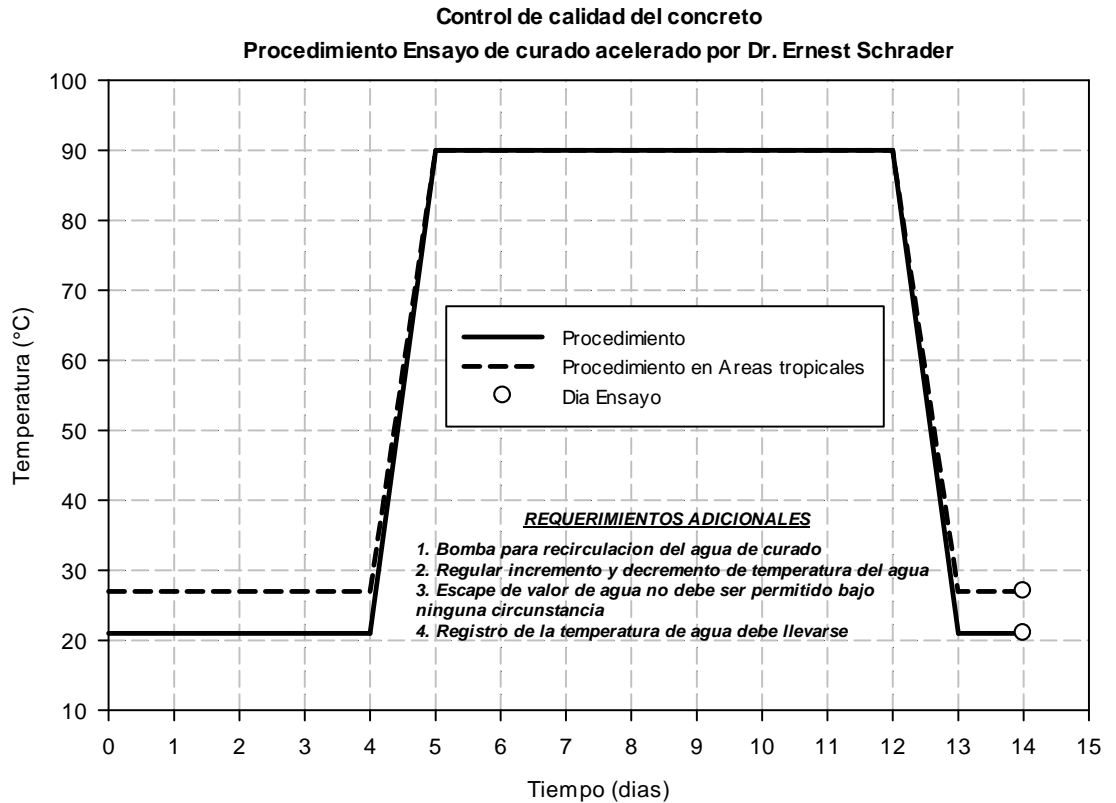


Figura I. Procedimiento del ensayo de curado acelerado, sugerido por el Dr. Ernest Schrader

Notas:

La resistencia obtenida del ensayo de curado acelerado normalmente será equivalente al 90-100% de la resistencia a largo plazo (1 año)

La temperatura inicial y final del ensayo de curado acelerado puede ser de 27 °C en áreas tropicales, pero debe ser indicada en el reporte. La tasa de calentamiento y enfriamiento serpa ajustada a cerca de 2.6 °C/hr, o el

tiempo requerido para realizar el calentamiento u enfriamiento puede ser reducido a cerca de 22 horas para realizar este cambio.

Cuando el tiempo es un factor crítico, el curado inicial puede reducirse a un día. Esta reducción es comúnmente menos crítica en mezclas que tengan a los 28 días resistencias que excedan los 20 MPa o 3,000 psi, y más crítica en mezclas de baja resistencia. La resistencia obtenida será más conservadora para estimar la resistencia del concreto a largo plazo.

Cuando el tiempo es crítico, puede ser necesario reducir la duración de la aplicación de la alta temperatura de curado (90 °C) a los 7 días del inicio de la prueba o ligeramente menos. El ensayo proveerá una estimación más conservadora de la resistencia del concreto a largo plazo.

Cuando el tiempo es crítico, el día final de estabilización de temperatura a 21 °C (70 °F) puede ser reducida un poco, pero es importante que el interior y el exterior del cilindro de prueba este a temperaturas similares.

ANEXO 12. Datos de Ductilidad vs Tiempo.

	<i>Tiempo (días)</i>			
	28	56	90	365
Resistencia (MPa)	5,65	12,84	12,14	13,91
	11,13	15,35	11,87	11,71
	15,52	16,43	16,76	11,35
	8,54	14,22	15,98	11,68
	19,48	22,03	14,12	10,64
	15,05	22,50	11,06	11,98
	18,42	21,70	21,34	12,68
	5,76	15,85	20,87	14,52
	16,43	21,02	24,29	21,99
	5,88	19,98	21,72	19,33
	19,11	11,78	26,03	21,52
	13,02	14,68	18,98	11,27
	4,88		14,67	13,04
	7,34		11,36	
	17,47			
	18,29			
	19,77			
	18,21			

BIBLIOGRAFÍA

1. Dirección web: <http://www.e-mas.co.cl>
2. Dirección web:
<http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/3339/1/5861.pdf>
3. Dirección web: <http://www.elconstructorcivil.com>
4. Dirección web: <http://biblioteca.duoc.cl/bdigital/esco>
5. INEN 695 Áridos para Hormigón. Muestreo
6. INEN 696 Áridos para hormigón. Determinación de la Granulometría.
7. INEN 697 Áridos para hormigón. Determinación de los Materiales más finos que 75um.
8. INEN 862 Áridos para hormigón. Determinación del contenido total de humedad.
9. INEN 856 Árido fino para hormigón. Determinación de la densidad y absorción del agua.
10. INEN 857 Árido grueso para hormigón. Determinación de la densidad y absorción del agua.

11. INEN 858 Áridos para hormigón. Determinación de la Masa Unitaria y del Porcentaje de Huecos
12. ASTM C 33 – 03 Standard Specifications for Concrete Aggregates.
13. ASTM C 136 – 06 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.
14. ASTM C 117 – 04 Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (N. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing.
15. ASTM C 127 – 07 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregates.
16. ASTM C 128 – 07a Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregates.
17. 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.
18. ASTM C 39 – 01 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.

19. ASTM C617 - 98(2003) Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens.
20. ASTM C496 / C496M - 04e1 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
21. ASTM C 469 – 94 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson`s Ratio of Concrete in Compression.
22. Instituto Salvadoreño del Concreto, “Presas de Concreto Compactado con Rodillo”, 2003
23. US Army Corps of Engineers. (2000), “Roller-Compacted Concrete”, Junio del 2011
24. Dunstan Malcolm “Rolled compacted concrete dams”, 2003