



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

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

TESIS DE GRADO

Previo a la Obtención del Título de:

INGENIERO CIVIL

Presentada por:

Cristian Marcelo Valarezo Tandazo

Walter Danilo Lojano Lucero

Guayaquil - Ecuador

Año - 2012

AGRADECIMIENTO

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

DEDICATORIA

PARA TODOS LOS
QUE ME APOYARON
DURANTE TODA MI
VIDA ACADÉMICA Y
EN EL DESARROLLO
DE ESTE TRABAJO
TESIS.

DEDICATORIA

PARA MI FAMILIA Y A
TODA UNA VIDA
ACADEMICA EN LA
ESPOL.

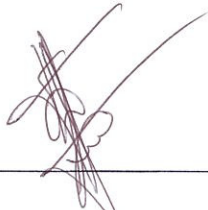
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Ing. Eduardo Santos B.
SUBDECANO DE LA FICT



Ing. Hugo Egüez Álava
DIRECTOR DE TESIS



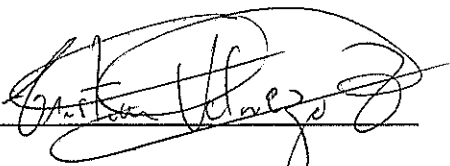
Ing. Eduardo Santos B.
VOCAL



Ing. Cristian Velasco O.
VOCAL SUPLENTE

DECLARACION 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”



Cristian Marcelo Valarezo Tandazo



Walter Danilo Lojano Lucero

RESUMEN

El presente trabajo es un "estudio de materiales para la determinación de mezclas de hormigón compactado con rodillo (HCR) para la presa Chontal". La primera parte consta de una descripción general del proyecto Chontal, se describen los objetivos del proyecto, características de la Presa y la ubicación de la cantera para la provisión de materiales para la elaboración del HCR; además se presenta información general acerca de la tecnología del HCR para presas y métodos de dosificaciones de HCR.

En la segunda parte se realiza la caracterización de los materiales disponibles para la elaboración del HCR con el fin de comprobar su idoneidad, luego se realizan pruebas preliminares con cada tipo de cemento disponible, elaborando curvas densidad vs humedad con el objetivo de determinar el contenido óptimo de humedad. Luego se procede a estudiar las propiedades mecánicas del HCR mediante ensayos de resistencia a compresión simple, módulo de elasticidad y resistencia a la tracción indirecta; debido a que el HCR para presas se diseña para que alcance los valores especificados de resistencia a la edad de un año, se implementó un procedimiento de curado acelerado con el objeto de estimar estos datos.

Adicionalmente se realizaron estudios del tiempo de trabajabilidad del HCR, coeficiente de expansión térmica y conductividad térmica, permeabilidad al aire del material y correlaciones entre la velocidad ultrasónica y la resistencia mecánica los cuales complementan los estudios de las propiedades mecánicas.

En la tercera parte se realiza el análisis de los resultados, interpretando las correspondencias entre resistencia a compresión simple vs tiempo, resistencia a la tracción indirecta vs tiempo, modulo de elasticidad vs tipo de cemento entre otros análisis. Con esta información se determinaron las dosificaciones y tipo de cemento más convenientes a ser utilizados en la elaboración del HCR para la presa Chontal, así como también nos permitió entender el comportamiento mecánico de este material.

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
INDICE GENERAL.....	II
ABREVIATURAS.....	III
SIMBOLOGIA.....	IV
INDICE DE FIGURAS.....	V
INDICE DE TABLAS.....	VI
CAPITULO 1	
1. INTRODUCCION.	1
1.1. Antecedentes.	3
1.2. Objetivos.	4
1.3. Alcance.	5
CAPITULO 2.	
2. TECNOLOGIA DEL HORMIGON COMPACTADO CON RODILLO PARA PRESAS.	6
2.1. Antecedentes del HCR.	6
2.2. Definición del HCR.	8
2.3. Características de los materiales utilizados en mezclas de HCR.	9
2.3.1. Características de los agregados.	9
2.3.2. Características del material cementante.	11
2.3.3. Aditivos.	11
2.4. Métodos de diseño de dosificaciones del HCR.	12

2.5. Comportamiento del HCR en estado fresco y endurecido.	14
2.6. Características constructivas del HCR.	18
CAPITULO 3	
3. PROYECTO HIDROELECTRICO "CHONTAL"	21
3.1. Ubicación geográfica.	22
3.2. Objetivos del proyecto.	24
3.3. Características de la presa.	25
3.4. Ubicación de la cantera de materiales para la elaboración del HCR.	26
CAPITULO 4	
4. CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN LAS DOSIFICACION.	28
4.1. Agregados.....	29
4.1.1. granulometría.....	29
4.1.2. gravedad especifica, densidad y absorción	32
4.1.3. reacción álcali-agregado.....	34
4.1.4. porcentaje de finos.....	43
4.1.5. Impurezas orgánicas.....	44
4.1.6. Resistencia a la abrasión.	46
4.1.7. Examen petrográfico de la granodiorita y arena natural.....	47
4.2. Material cementante.....	49
4.2.1. Tipos de cemento.....	50
4.2.2. Características físicas y químicas del material cementante.....	50

4.3. Características del filler.	54
4.4. Características del agua a utilizar.	54
4.5. Resultados de la caracterización de los materiales.	55
 CAPITULO 5	
5. PRUEBAS PRELIMINARES DE LA DOSIFICACIÓN.	60
5.1. Dosificaciones propuestas.	61
5.2. Descripción de equipos de trabajo.	64
5.3. Preparación de muestras.	67
5.4. Parámetros a medir.	68
5.5. Resultados de las pruebas preliminares de la dosificación.....	71
5.5.1. Curvas densidad vs humedad.	71
5.5.2. Tablas de resultados obtenidos.	74
5.5.3. Análisis de resultados.	75
 CAPITULO 6.	
6. ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DEL HCR.....	77
6.1. Dosificaciones propuestas.	79
6.2. Descripción de equipos de trabajo.	80
6.3. Preparación de muestras.	84
6.3.1. Parámetros a medir.	91
6.4. Curado de las muestras.	93
6.4.1. Curado acelerado de muestras.	94
6.4.2. Descripción de equipos de trabajo.	94

6.4.3. Procedimiento de curado acelerado.	96
6.5. Ensayos mecánicos en las muestras.	98
6.5.1. Ensayo de resistencia a la compresión simple y modulo de elasticidad.	99
6.5.1.1. Descripción de equipos.	99
6.5.1.2. Preparación de muestras.	101
6.5.1.3. Procedimiento de ensayo.	102
6.5.2. Ensayo de tracción indirecta.	105
6.5.2.1. Descripción de equipos.	105
6.5.2.2. Preparación de muestras y procedimiento de ensayo.	106
6.6. Resultados del estudio de las propiedades mecánicas del HCR.	108

CAPITULO 7.

7. PROPIEDADES TERMICAS DEL HCR.	112
7.1. Dosificación propuesta.	113
7.2. Descripción de equipos de trabajo.	114
7.3. Ensayo de coeficiente de dilatación térmica.	121
7.3.1. Preparación de muestras.	122
7.3.2. Parámetros a medir.	124
7.3.3. Procedimiento de ensayo.	124
7.4. Ensayo de conductividad térmica.	127
7.4.1. Preparación de muestras.	131
7.4.2. Procedimiento de ensayo.	133

7.5. Resultados del estudio de las propiedades térmicas del HCR.....	134
7.5.1. Resultados del ensayo de coeficiente de dilatación térmica...	135
7.5.2. Resultados del ensayo de conductividad térmica del HCR....	137

CAPITULO 8

8. TIEMPO DE TRABAJABILIDAD DEL HCR.	139
8.1. Dosificaciones propuestas.	140
8.2. Descripción de equipos de trabajo.	142
8.3. Preparación de muestras.	144
8.4. Parámetros a medir.	146
8.5. Ensayos mecánicos en las muestras.	147
8.6. Resultados del estudio del tiempo de trabajabilidad.	147

CAPITULO 9

9. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN EL HCR.	149
9.1. Ensayo de pulso ultrasónico.	150
9.1.1. Objetivo del ensayo.	152
9.1.2. Factores que afectan los resultados del ensayo de pulso ultrasónico.	152
9.1.3. Descripción de equipos de trabajo.	153
9.1.4. Procedimiento de ensayo.	154
9.1.5. Resultados del ensayo de pulso ultrasónico.	157
9.2. Ensayo de permeabilidad al aire en el HCR.	159

9.2.1. Dosificación propuesta.	160
9.2.2. Descripción de equipos de trabajo.	160
9.2.3. Preparación de muestras.	163
9.2.4. Procedimiento de ensayo.	165
9.2.5. Resultados del ensayo.	167

CAPITULO 10

10.ANALISIS DE RESULTADOS	168
10.1. Densidad del HCR.	168
10.2. Propiedades mecánicas del HCR.	171
10.2.1. Curvas resistencia a compresión simple vs tiempo.....	171
10.2.2. Curvas resistencia a tracción indirecta vs tiempo.....	173
10.2.3. Modulo de elasticidad vs contenido de cemento.....	175
10.2.4. Modulo secante vs tiempo.....	180
10.3. Correlaciones obtenidas entre la resistencia a la compresión simple, modulo de elasticidad y resistencia a la tracción indirecta...	186
10.4. Ductilidad del HCR.....	188
10.5. Curado convencional vs curado acelerado.....	190
10.6. Propiedades térmicas del HCR.....	193
10.7. Tiempo de trabajabilidad del HCR.....	194
10.8. Permeabilidad al aire del HCR.....	198

10.9.	Correlaciones entre la velocidad de pulso ultrasónico y las propiedades mecánicas del HCR.....	199
10.10.	Variación de la velocidad de pulso ultrasónico en los cilindros.....	202
CAPITULOS 11		
10.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	204
10.1.	Conclusiones.....	204
10.2.	Recomendaciones.....	209
APENDICES		
BIBLIOGRAFIA		

ABREVIATURAS

%f'c	Porcentaje de la resistencia a la compresión simple
a/c	Relación agua cemento
ASTM	Sociedad americana de ensayos y materiales
C.A.	Curado acelerado
C _{180días}	Curado convencional de 180 días
CTH	Centro técnico del Hormigón
D1	Primera dosificación
D2	Segunda dosificación
D3	Tercera dosificación
D4	Cuarta dosificación
D5	Quinta dosificación
D6	Sexta dosificación
D7	Séptima dosificación
D8	Octava dosificación
DLA	Densidad libre de aire
E.P.	Empresa publica
E _c	Modulo de elasticidad
f'c	Resistencia a la compresión simple
ft	Resistencia a la tracción indirecta
GU	General use
GU-95 kg/m ³	Mezcla con 95 kilogramos de cemento GU
HE	High early
HE-95 kg/m ³	Mezcla con 95 kilogramos de cemento HE
INEN	Instituto ecuatoriano de normalización
MH	Moderate heat
MH-95 kg/m ³	Mezcla con 95 kilogramos de cemento MH
ND	No disponible
Pe	Presión cámara exterior
Pi	Presión cámara interior
SSS	Saturado superficialmente seco
t ₁	Primer tiempo Vebe
t ₂	Segundo tiempo Vebe
t ₃	Tercer tiempo Vebe
TMA	Tamaño máximo de agregado

SIMBOLOGIA

%	Porcentaje
μm	Micrómetro
cal/g	Calorías por gramo
dm^3	Decímetro cubico
g/l	Gramos por litro
GPa	Gigapascal
GWh	Gigawatt-hora
HP	Caballos de fuerza
Hz	Herz
J	Joule
kg	Kilogramo
kg/m^2	Kilogramos por metro cuadrado
kg/m^3	Kilogramos por metro cubico
kN	Kilonewton
kN/s	Kilonewton por segundo
KT	Permeabilidad al aire
m	Metro
m/s	Metro por segundo
m^2	Metro cuadrado
m^2/kg	Metros cuadrados por kilogramo
m^3	Metro cubico
m^3/s	Metros cúbicos por Segundo
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
MW	Megawatt
Na_2O	Oxido de sodio
NaOH	Hidróxido de sodio
No	Número de tamiz
$^{\circ}\text{C}$	Grados centígrados
$^{\circ}\text{C}/\text{hora}$	Grados centígrados por hora
s	Segundo

INDICE DE FIGURAS

- Figura 3.1 Mapa de la ubicación de la presa Chontal.
- Figura 3.2 Deposito de arena natural.
- Figura 4.1 Agregado grueso.
- Figura 4.2 Agregado fino
- Figura 4.3 Ensayo de reactividad álcali-agregado según la norma ASTM C 1260. Arena natural y cemento Holcim tipo I.
- Figura 4.4 Ensayo de reactividad álcali-agregado según la norma ASTM C 1260. Granodiorita y cemento Holcim tipo I.
- Figura 4.5 Ensayo de reactividad álcali-agregado según la norma ASTM C 1567. Granodiorita y cemento Holcim tipo HE (20% adición puzolanica).
- Figura 4.6 Ensayo de reactividad álcali-agregado según la norma ASTM C 1567. Granodiorita y cemento Holcim tipo GU (35% adición puzolanica).
- Figura 4.7 Ensayo de reactividad álcali-agregado según la norma ASTM C 1567. Arena natural y cemento Holcim Tipo HE.
- Figura 4.8 Ensayo de reactividad álcali-agregado según la norma ASTM C 227 (INEN 867). Granodiorita y cemento Holcim Tipo HE.
- Figura 4.9 Ensayo de colorímetro.
- Figura 4.10 Estructura interna de la granodiorita
- Figura 4.11 Granos componentes de la arena natural
- Figura 4.12 Curva granulométrica del material grueso piedra No 67.
- Figura 4.13 Curva granulométrica del material grueso N°5
- Figura 4.14 Curva granulométrica de la arena natural.
- Figura 4.15 Curva granulométrica de la arena triturada.
- Figura 5.1 Granulométrica propuesta para el HCR.
- Figura 5.2 Balanza.
- Figura 5.3 Mezcladora tipo artesa.
- Figura 5.6 Martillo Hilti y apisonador circular.
- Figura 5.5 a) Olla de Washington. b) Detalles del aparato.
- Figura 5.4 Discos de madera, collarines y tamiz.
- Figura 5.7 Preparación de la mezcla.
- Figura 5.8 Determinación de densidad del HCR.
-

Figura 6.1 Plancha metálica no absorbente.
Figura 6.2 Martillo Hilti y apisonador circular.
Figura 6.3 Mezcladora para hormigón.
Figura 6.4 a) Aparato Vebe. b) Detalles del aparato.
Figura 6.5 Cilindros de 300x150 mm.
Figura 6.6 Balanza.
Figura 6.7 Discos de madera, collarines y tamiz.
Figura 6.8 Materiales pesados previo a la elaboración del HCR.
Figura 6.9 Proceso de mezclado en seco.
Figura 6.10 Mezclado del HCR.
Figura 6.11 a) Mezclado manual de HCR b) HCR protegido de la pérdida de humedad.
Figura 6.12 a) Proceso de compactación del HCR. b) Cilindros fijados mediante tablero base.
Figura 6.13 Uso de collarines para la elaboración de la tercera capa de los cilindros.
Figura 6.14 Procedimiento para lograr un acabado en los cilindros.
Figura 6.15 Uso de plástico para la prevención de la pérdida de humedad en los cilindros.
Figura 6.16 Medición de la densidad de las mezclas.
Figura 6.17 a) Curado convencional. b) Curado acelerado.
Figura 6.18 a) Cámara de Curado acelerado. b) Bomba de recirculación.
Figura 6.19 Termocuplas y sensores para el control de la temperatura.
Figura 6.20 Procedimiento de curado acelerado.
Figura 6.21 Prensa hidráulica.
Figura 6.22 Extensómetro para cilindros de 300x150 mm.
Figura 6.23 a) Cilindros en proceso de nivelación. b) Cilindros para ensayo.
Figura 6.24 Cilindro preparado para ensayo de compresión simple y modulo de elasticidad.
Figura 6.25 Molde para ensayo de tracción indirecta.
Figura 6.26 a) Cilindro preparado para ensayo de tracción indirecta. b) Cilindro en proceso de ensayo.
Figura 7.1 Curva granulométrica propuesta para estudio de las propiedades térmica del HCR.
Figura 7.2 Balanza.
Figura 7.3 Mezcladora de aspas.
Figura 7.4 a) Olla de Washington b) Esquema de la olla de Washington.
Figura 7.5 a) Moldes de acero para probetas. b) Molde de acero para vigas.
Figura 7.6 a) Martillo Kango y apisonador rectangular. b) Martillo Hilti y apisonador circular.
Figura 7.7 a) Caladora de núcleos. b) Cortadora para hormigón.
Figura 7.8 Horno de convección.
Figura 7.9 Recipiente térmico.
Figura 7.10 Termocupla de 0.1o C de precisión.

Figura 7.11 Lector de longitud.

Figura 7.12 Equipos para ensayo. a) Buques del equipo de conductividad. b) Galvanómetro.

Figura 7.13 a) Elaboración de probeta. b) Colocación de termocupla.

Figura 7.14 Probetas para ensayo.

Figura 7.15 Colocación de las probetas en el horno.

Figura 7.16 Procedimiento de ensayo.

Figura 7.17 Representación grafica del ensayo de conductividad térmica.

Figura 7.18 Elaboración de viga.

Figura 7.19 a) Calado de núcleos en la viga. b) Corte de núcleos.

Figura 7.20 Discos para ensayo de conductividad térmica.

Figura 7.21 Procedimiento de ensayo. a) disco en proceso de ensayo. b) esquema de ensayo.

Figura 7.22 Resultados de ensayo de coeficiente de dilatacion termica- Probeta uno.

Figura 7.23 Resultados de ensayo de coeficiente de dilatacion termica- Probeta dos.

Figura 7.24 Resultados de ensayo de conductividad térmica- Disco uno.

Figura 7.25 Resultados de ensayo de conductividad térmica- Disco dos.

Figura 8.1 Martillo Hilti y apisonador circular.

Figura 8.2 Mezcladora tipo artesa.

Figura 8.3 Cilindros de 300x150mm.

Figura 8.4 Balanza.

Figura 8.5 Discos de madera, collarines y tamiz.

Figura 8.6 a) Elaboración de muestras. b) Cilindros terminados.

Figura 8.7 Cilindros dentro de la piscina de curado.

Figura 9.1 Cambio en la longitud de recorrido de la onda.

Figura 9.2 Equipo de ultrasonido.

Figura 9.3 Equipo y herramientas para realizar el ensayo de pulso ultrasónico.

Figura 9.4 Muestra en procedimiento de ensayo.

Figura 9.5 a) Detalles de la celda con doble cámara de vacío. b) Esquema del equipo.

Figura 9.6 Cortadora para hormigón.

Figura 9.7 Horno de convección.

Figura 9.8 Corte de cilindro para obtención de muestras.

Figura 9.9 a) Muestras para ensayo. b) Secado de las muestras en el horno.

Figura 9.10 Partes del equipo de Permeabilidad.

Figura 9.11 Etapas del ensayo de permeabilidad al aire.

Figura 10.1 Densidades obtenidas en el estudio de las propiedades mecánicas del HCR.

Figura 10.2 Resistencia a la compresion simple vs Tiempo.

Figura 10.3 Resistencia a la traccion indirecta vs Tiempo.

Figura 10.4 Modulo de elasticidad vs contenido de cemento.

Figura 10.5 Comparación de la eficiencia de los cementos tipo HE, GU y MH.
Figura 10.6 Variación del módulo secante para 75 kg/m³ de cemento.
Figura 10.7 Variación del módulo secante para 95 kg/m³ de cemento.
Figura 10.8 Variación del módulo secante para 105 kg/m³ de cemento.
Figura 10.9 Resistencia a la tracción indirecta vs resistencia a la compresión simple.
Figura 10.10 Módulo de elasticidad vs resistencia a la compresión simple.
Figura 10.11 Módulo de elasticidad vs resistencia a la tracción indirecta.
Figura 10.12 Ductilidad del HCR.
Figura 10.13 Curado acelerado vs curado convencional (180 días).
Figura 10.14 Resultados del estudio del tiempo de trabajabilidad del HCR.
Figura 10.15 Velocidad de pulso ultrasónico vs tiempo a la cual se elaboró los cilindros.
Figura 10.16 Correlación entre resistencia a la compresión simple y velocidad de pulso ultrasónico.
Figura 10.17 Correlación entre resistencia a la tracción indirecta y velocidad de pulso ultrasónico.
Figura 10.18 Correlación entre módulo de elasticidad y velocidad de pulso ultrasónico.

INDICE DE TABLAS

- Tabla 3.1 Características de la presa.
 - Tabla 3.2 Características del embalse y estructura.
 - Tabla 4.1 Densidad y absorción de los agregados gruesos y finos.
 - Tabla 4.2 Porcentaje de finos presente en el agregado.
 - Tabla 4.3 Características del cemento GU.
 - Tabla 4.4 Características del cemento HE
 - Tabla 4.5. Características del cemento MH
 - Tabla 4.6 Resultados de ensayos del agregado utilizado para el diseño del HCR
 - Tabla 5.1 Dosificaciones con cemento HE.
 - Tabla 5.2 Dosificaciones con cemento GU.
 - Tabla 5.3 Dosificaciones con cemento MH.
 - Tabla 5.4 Densidades alcanzadas con cemento HE.
 - Tabla 5.5 Densidades alcanzadas con cemento GU.
 - Tabla 5.6 Densidades alcanzadas con cemento MH.
 - Tabla 6.1 Dosificaciones con cemento HE.
 - Tabla 6.2 Dosificaciones con cemento GU.
 - Tabla 6.3 Dosificaciones con cemento MH.
 - Tabla 6.4 Resultados obtenidos con cemento HE.
 - Tabla 6.5 Resultados obtenidos con cemento GU.
 - Tabla 6.6 Resultados obtenidos con cemento MH.
 - Tabla 7.1 Dosificación propuesta para estudio de las propiedades térmicas del HCR.
 - Tabla 7.2 Parámetros medidos en la mezcla.
 - Tabla 7.3 Coeficiente de dilatación térmica del HCR
 - Tabla 7.4 Conductividad térmica del HCR.
 - Tabla 8.1 Dosificaciones propuestas para estudio de tiempo de trabajabilidad.
 - Tabla 8.2 Temperatura y humedad de trabajo.
 - Tabla 8.3 Resistencia a la compresión simple.
 - Tabla 9.1. Clasificación de la calidad del hormigón propuesta por Leslie y Cheesman.
-

Tabla 9.2 Velocidad de pulso ultrasónico promedio obtenidas con cada tipo y contenido de cemento.

Tabla 9.3 Dosificación con cemento HE

Tabla 9.4 Resultado del ensayo de permeabilidad.

Tabla 10.1 Resumen estadístico de las densidades obtenidas.

Tabla 10.2 Coeficiente de dilatación térmica del HCR.

Tabla 10.3 Conductividad térmica del HCR.

Tabla 10.4 Resultados del ensayo de permeabilidad en el HCR.

Tabla 10.5 Calidad del hormigón en función de su permeabilidad.

Tabla 10.6 Velocidad de pulso ultrasónico promedio obtenida en los extremos y en el centro de las muestras preparadas con cemento HE-95 kg/m³.

Tabla A.1 Gradación granulométrica de la Piedra No 67.

Tabla A.2 Gradación granulométrica de la Piedra No 5.

Tabla A.3 Gradación granulométrica de la Arena Triturada.

Tabla A.4 Gradación granulométrica de la Arena Natural.

Tabla A.5 Gradación granulométrica propuesta para el HCR.

Tabla A.6 Gradación granulométrica propuesta para estudio de propiedades térmicas del HCR.

Tabla B.1 Resultados del estudio de las propiedades mecánicas del HCR obtenidos con el cemento HE.

Tabla B.2 Resultados del estudio de las propiedades mecánicas del HCR obtenidos con el cemento GU.

Tabla B.3 Resultados del estudio de las propiedades mecánicas del HCR obtenidos con el cemento MH.

Tabla C.1 Resultados para barra-uno.

Tabla C.2 Resultados para barra-dos.

Tabla C.3 Resultados para disco-uno.

Tabla C.4 Resultados para disco-tres.

Tabla D.1 Velocidad de pulso ultrasónico obtenidas en los extremos y en el centro de las muestras preparadas con cemento HE-75 kg/m³

Tabla D.2 Velocidad de pulso ultrasónico promedio obtenida en los extremos y en el centro de las muestras preparadas con cemento HE-95 kg/m³.

Tabla D.3 Velocidad de pulso ultrasónico promedio obtenida en los extremos y en el centro de las muestras preparadas con cemento HE-105 kg/m³

Tabla D.4 Velocidad de pulso ultrasónico promedio obtenida en los extremos y en el centro de las muestras preparadas con cemento GU-75 kg/m³.

Tabla D.5 Velocidad de pulso ultrasónico promedio obtenida en los extremos y en el centro de las muestras preparadas con cemento HE-95 kg/m³.

Tabla D.6 Velocidad de pulso ultrasónico promedio obtenida en los extremos y en el centro de las muestras preparadas con cemento GU-105 kg/m³

Tabla D.7 Velocidad de pulso ultrasónico promedio obtenida en los extremos y en el centro de las muestras preparadas con cemento MH-75 kg/m³.

Tabla D.8 Velocidad de pulso ultrasónico promedio obtenida en los extremos y en el centro de las muestras preparadas con cemento MH-95 kg/m³.

CAPITULO I

1. INTRODUCCION.

El HCR es una nueva forma de construir y diseñar obras de ingeniería civil y se ha convertido en el más importante adelanto tecnológico en lo concerniente a la construcción de proyectos de presas, básicamente por las siguientes razones:

- Permite altas velocidad de construcción lo que se traduce en bajos costos de construcción.
 - Utiliza menores cantidades de material cementante que el hormigón convencional.
-

Para la construcción de la presa "Chontal", los diseñadores han implementado el uso de HCR para el núcleo de la presa, siendo necesario realizar un estudio que permita determinar una dosificación adecuada utilizando los agregados disponibles; en este trabajo se presenta el estudio de los materiales para el diseño del HCR, el mismo que se llevo a cabo en el laboratorio del Centro Técnico del Hormigón (CTH) ubicado en la ciudad de Guayaquil. Para elaborar el HCR se dispuso de cuatro materiales provenientes de un proceso de trituración (piedra No 5, piedra No 67, arena triturada y filler), los mismos que provienen de una roca ígnea llamada granodiorita junto con una arena natural. En el estudio se utilizaron tres cementos Portland compuestos clasificados según la norma INEN 2380 como tipo HE, GU y MH.

Los requerimientos de resistencia a compresión simple y de módulo de elasticidad para el HCR a la edad de un año que se utilizará en la presa "Chontal" son (5)¹:

Resistencia a la compresión simple= 14MPa

Módulo de elasticidad= 20GPa

¹Estos requerimientos fueron establecidos en los estudios realizados a través de la empresa HIDROEQUINOCIO E.P.

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

1.1. Antecedentes.

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

1.2. Objetivos.

1.2.1. Objetivo generales.

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

✓

1.2.2. Objetivos específicos.

- ✓ Determinar las propiedades mecánicas del HCR con los diferentes tipos y contenidos de cemento utilizado.
 - ✓ Determinar el coeficiente de dilatación térmica y la conductividad térmica del HCR.
 - ✓ Determinar el tiempo máximo de trabajabilidad del HCR.
 - ✓ Evaluar la durabilidad del HCR.
 - ✓ Obtener correlaciones entre las propiedades mecánicas del HCR y la velocidad de pulso ultrasónico.
-

1.1. Alcance.

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

Estudios anteriores han demostrado que el HCR alcanza su resistencia máxima a largo plazo, por lo cual el material se diseña para que alcance una cierta resistencia a la edad de un año. Sin embargo en el estudio de la mezcla no es práctico esperar tanto tiempo, por lo que se decidió adoptar un procedimiento de curado acelerado para estimar estas propiedades. Los resultados obtenidos del procedimiento de curado acelerado se compararon con los obtenidos de un curado convencional de 180 días con el fin de corroborar su veracidad.

CAPITULO 2

2. TECNOLOGIA DEL HORMIGON COMPACTADO CON RODILLO PARA PRESAS.

2.1. Antecedentes del HCR.

La tecnología de hormigón compactado con rodillo es el resultado de la búsqueda de un ahorro económico en la construcción de proyectos de presas; entre los primeros intentos para lograr este fin podemos citar las presa "Alpe Gera" en Italia y la presa "Manicouagan I" en Canadá en la década de los 60, lo innovador de estas presas fue el uso de un hormigón de bajo contenido de cemento y de revenimiento cero, el cual estaba diseñado para ser transportado y esparcido mediante equipos de movimiento de tierras, sin embargo para su

consolidación requería del uso de vibradores de inmersión. Durante esta década se presentaron varias ideas interesantes que se convirtieron en el punto de partida de posteriores investigaciones que llevaron al desarrollo del HCR, entre estas se destaca el Paper "The Optimun Gravity Dam", el cual proponía la construcción de un terraplén usando material granular proveniente de depósitos naturales enriquecido con cemento, con la característica especial que se pueda transportar, colocar y compactar a altas velocidades utilizando equipos para movimientos de tierra.

En la década de los 70 se iniciaron investigaciones por parte del cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos que resultaron en la construcción de la presa "Willow Creek" en 1982, una presa de HCR de bajo contenido de cemento que se convirtió en la primera construida completamente de este material. Al mismo tiempo se llevaron a cabo investigaciones por parte de la "Bureau of Reclamation"¹ acerca de los contenidos de ceniza volante en el hormigón que condujeron al desarrollo del HCR de alto contenido de pasta, el cual se utilizó en la construcción de la presa "Upper Stillwater" en 1988. Japón también llevó a cabo investigaciones que

¹ "Bureau of Reclamation" es una agencia gubernamental de los Estados Unidos encargada del manejo de los recursos hídricos.

resultaron en su propia tecnología de hormigón compactado con rodillo utilizada en las cimentaciones de las presas "Shimajigawa" y "Okana" en 1978 y luego en la construcción de la mayor parte de la presa "Shimajigawa" en 1980 con lo cual se convirtió en la primera presa en el mundo que usaba HCR en mayor proporción. (Hansen & Reinhardt, 1991)(6).

Desde los años 80 hasta ahora se han llevado a cabo varios proyectos de presas de HCR, los cuales superan más de 200 alrededor del mundo y que han sido desarrollados gracias a la reducción de costos logrados mediante esta tecnología (Dunstan, 2003)(3).

2.2. Definición del HCR.

El código ACI define el HCR como "*un hormigón que en su estado no endurecido puede soportar un rodillo mientras es compactado*" (ACI, 1999)(1). El HCR es un hormigón de revenimiento cero en el cono de Abrams, que genera un bajo calor por la hidratación del cemento y que está diseñado para utilizar equipos de movimiento de tierra para su trasportación, colocación y compactación; las presas construidas con este material toman la ventajas que tienen las presas de tierra sobre

las presas de hormigón convencional en lo concerniente al proceso constructivo y al mismo tiempo se reducen los volúmenes de material debido a las altas resistencias que tiene el HCR con respecto a los materiales utilizados en presas de tierra (Hansen & Reinhardt, 1991)(6).

2.3. Características de los materiales utilizados en mezclas de HCR.

2.3.1. Características de los agregados.

Los agregados utilizados en la elaboración del HCR generalmente cumplen con los estándares para agregados de hormigón convencional²; sin embargo también se han utilizado exitosamente agregados que no cumplen con estos estándares, todo dependiendo de los requerimientos técnicos del proyecto y de la disponibilidad de materiales.

Para reducir el potencial de segregación y facilitar la compactación del HCR se debe seleccionar un adecuado tamaño máximo de agregado (TMA); en los primeros proyectos de presas de HCR el TMA se limitó a 75mm en Estados Unidos y a 150mm

² ASTM C 33 "especificaciones para agregados utilizados en hormigón".

en Japón. Sin embargo con la experiencia se ha llegado a determinar que un TMA entre 38 y 50mm es más fácilmente compactable y menos susceptible de segregación.

Las granulometrías utilizadas en HCR se caracterizan por tener una mayor proporción de agregados finos respecto a las granulometrías para hormigón convencional, logrando reducir la tendencia a la segregación, y la proporción de vacíos.

En mezclas de HCR con bajo contenido de cemento generalmente se adicionan filler (material pasante tamiz No 200) para rellenar los vacíos existentes entre los agregados; dependiendo de la cantidad de material cementante y del TMA el requerimiento de filler normalmente está entre un 3% a 8% del volumen total de los agregados. El filler afecta directamente a la trabajabilidad de las mezclas, permeabilidad del HCR y se caracteriza por ser un material no plástico.

En cualquier tipo de hormigón se busca que los agregados ocupen el mayor volumen posible en la mezcla para minimizar la cantidad de agua y de material cementante, con lo que se logra reducir los costos y problemas referidos al cemento; así se tiene

que en HCR las mezclas se diseñan para que los agregados ocupen cerca del 80% del volumen total de la mezcla (ACI, 1999)(1).

2.3.2. Características del material cementante.

En obras masivas como las presas de hormigón se utilizan cementos puzolanicos con el fin de reducir el calor generado por su hidratación; varios tipos de puzolanas han sido utilizadas en la dosificación del HCR, todo depende de su disponibilidad, características de la puzolana y de las condiciones a que será expuesto el HCR; con el uso de puzolanas se logra reducir los costos del cemento además que estas le proveen una mayor trabajabilidad a las mezclas. La proporción de cemento más adiciones puzolanicas utilizados en HCR ha variado desde 60 a 248 kg/m³ (ACI, 1999)(1).

2.3.3. Aditivos.

Reductores de agua, retardadores e incorporadores de aire constituyen los aditivos utilizados en HCR. La función de los reductores de agua y retardadores ha sido aumentar la

trabajabilidad de las mezclas, extender el tiempo de trabajabilidad, reducir la demanda de agua e incrementar el tiempo para el inicio y final del fraguado; estas características permiten obtener juntas con mayor cohesión entre capas y una menor infiltración a través de estas. Los incorporadores de aire son utilizados en zonas donde el HCR está expuesto a ciclos de hielo y deshielo, el aire incorporado permite al hormigón resistir los daños causado por las escarchas de hielo, además de hacerlo impermeable y más trabajable (ACI, 1999)(1).

2.4. Métodos de diseño de dosificaciones del HCR.

Desde los inicios del HCR varios métodos de dosificación han sido desarrollados, los cuales se han utilizado exitosamente en varios proyectos de presas. En todos los métodos de dosificación se distinguen claramente dos enfoque de diseño: métodos basados en la relación existente entre la relación agua-cemento y la resistencia (ley de Abrams) y métodos basados en la relación entre la densidad y la humedad en el cual se busca el contenido de humedad que produzca la máxima densidad (ACI, 1999)(1).

Entre los métodos de diseño de dosificaciones del HCR tenemos:

El método del cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos, el cual ha sido utilizado en más de 7 proyectos de presas, este método se basa en la ley de Abrams y establece mínimas relaciones entre volumen de pasta y mortero, entre volumen de agregado fino y agregado grueso y también establece un mínimo volumen de mortero como porcentaje del volumen total de la mezcla.

El método del HCR con alto contenido de pasta, el cual fue desarrollado por la "Bureau of Reclamation" de los Estados Unidos, también se basa en la ley de Abrams y las mezclas de HCR diseñadas por este método se caracterizan por tener una baja permeabilidad y alta cohesión en las juntas, para lograr este objetivo se utilizan altos contenidos de pasta en la mezcla pero al mismo tiempo se utilizan grandes contenidos de puzolana para reducir del calor generado por la hidratación del cemento.

El método del HCR de bajo contenido de cemento, el cual fue desarrollado para la construcción de la presa "Willow Creek" y es utilizado frecuentemente para diseñar mezclas de HCR con contenidos de cemento menor de 120 kg/m^3 . Este se basa en la relación entre la

densidad y la humedad, buscando el contenido óptimo de humedad. Las presas construidas con este material generalmente se diseñan junto con pantallas impermeables y morteros de adherencia entre capas con el objetivo de evitar las infiltraciones.

Finalmente existe otro método desarrollado por los japoneses el cual también trabaja con la ley de Abrams, utiliza un TMA de 150mm y se caracteriza por utilizar una alta relación entre agregado fino y agregado grueso para evitar la segregación; el uso de este método se ha limitado solamente a Japón debido a que ha sido diseñado acorde a los métodos de diseño y construcción utilizados por ellos (ACI, 1999) (Hansen & Reinhardt, 1991)(1)(6).

2.5. Comportamiento del HCR en estado fresco y endurecido.

Debido a que en estado no endurecido el HCR se caracteriza por ser un hormigón de revenimiento cero en el cono de Abrams, la trabajabilidad se mide utilizando el aparato Vebe, constituyendo el tiempo Vebe una medida de la trabajabilidad de las mezclas. Las mezclas de HCR con altos contenidos de cemento son más trabajables y tienen menos tendencia a la segregación que las

mezclas con bajo contenido de cemento debido a los altos contenidos de pasta y mortero. Las mezclas con alto contenido de pasta generalmente tienen un tiempo Vebe de 20 a 30 segundos versus una mezcla con bajo contenido de pasta que tiene un tiempo Vebe mayor de 45 segundos³ (Hansen & Reinhardt, 1991)(6).

El HCR en estado endurecido presenta varias propiedades que son de interés para el diseñador de la mezclas; la resistencia a la compresión simple del HCR es un parámetro que se utiliza para satisfacer los requerimientos de cargas y durabilidad de la estructura, los mismos que han variado desde 6.9 a 34.5 MPa. a la edad de un año (ACI, 1999)(1). El modulo de elasticidad es requerido también para propósitos de diseño, este es afectado principalmente por el tipo de agregado, el volumen de pasta y está directamente relacionado con la resistencia a la compresión simple del HCR; en proyectos de presas se requiere mezclas con bajos módulos de elasticidad lo cual le proporciona una ductilidad adecuada a la estructura, evitando el colapso repentino de las mismas cuando son sometidas a cargas sísmicas.

³ Se considera mezclas de bajo contenido de cemento aquellas con contenidos de cemento menor que aproximadamente 120 kg/m³.

La resistencia a la tracción en el HCR es otro parámetro requerido para propósitos de diseños, las relaciones entre resistencia a la tracción y la resistencia a la compresión simple en el HCR se encuentra entre 0.05 a 0.15 dependiendo de la calidad de los agregados, edad y método de ensayo (ACI, 1999)(1); en HCR la resistencia a la tracción directa es menor que la resistencia a la tracción indirecta y generalmente la resistencia a la tracción indirecta en el HCR se asume un 10 % de la resistencia a la compresión simple (ACI, 1999)(1). La relación entre la resistencia a la tracción directa y la resistencia a la compresión simple en el HCR y en los hormigones convencionales decrece con la edad y con el aumento de la resistencia a la compresión simple (ACI, 1999)(1).

La resistencia al corte del HCR es uno de los parámetros más críticos en el diseño de presas, pues de la resistencia al corte en las juntas del HCR depende la estabilidad de la presa en lo concerniente al deslizamiento e infiltraciones a través de estas juntas. La resistencia al corte del HCR esta generalmente entre un 16% a 39% de la resistencia a la compresión simple usándose generalmente un valor conservador del 10% para propósitos de diseño (ACI, 1999)(1). Cuando no están disponibles valores del ángulo de fricción interna del HCR este se asume en cuarenta y cinco grados. En HCR las mezclas

con bajos contenidos de pasta son más permeables que las mezclas diseñadas con altos contenidos de pasta, así se han obtenido valores de coeficiente de permeabilidad desde 2×10^{-2} a 4×10^{-10} cm/s (Hansen & Reinhardt, 1991)(6), Sin embargo las infiltraciones se dan mayormente a través de las juntas cuando no se han tratado adecuadamente (ACI, 1999)(1).

La contracción por secado del HCR induce esfuerzos de tracción que si no se toman en cuenta podrían convertirse en un problema. Sin embargo los cambios de volumen ocasionados por el secado del hormigón son menores en el HCR comparados con el hormigón convencional debido a que la contracción del hormigón está directamente relacionada con el contenido de pasta en la mezcla (ACI, 1999)(1). En el análisis térmico de las presas son requeridos parámetros como el calor específico, el coeficiente de dilatación térmica, el crecimiento adiabático de temperatura y la conductividad térmica; estas propiedades dependen directamente de las propiedades térmicas de los agregados utilizados en las dosificaciones (ACI, 1999)(1).

2.6. Características constructivas del HCR.

Durante la fase de construcción se llevan a cabo controles de las distintas etapas constructivas, estos controles abarcan desde ensayos de la calidad de los materiales, monitoreo del mezclado en planta, transporte hasta control de densidad in-situ, curado y tratamiento de juntas. Para la compactación del HCR generalmente se utiliza rodillos de 15 y 20 toneladas, con un número de pasadas que depende directamente de la trabajabilidad y el espesor de la capa a compactar. Como regla general se ha adoptado que el espesor tiene que ser como mínimo 3 veces el TMA, determinándose en base a la experiencia que un espesor de 30 cm es el más apropiado en presas de bajo contenido de cemento (Hansen & Reinhardt, 1991)(6). Sin embargo en Japón se utiliza espesores de capa de 50 a 70 cm los cuales se han encontrados adecuados para las mezclas diseñadas por ellos. Luego de la compactación del HCR se llevan a cabo controles de las densidades in-situ mediante el uso de densímetros nucleares, el criterio de calidad generalmente utilizado indica que ninguna densidad

medida debe dar menos del 90% de la densidad libre de aire⁴ (DLA), y que el 98% de las densidades medidas debe estar encima de 95% de la DLA (Hansen & Reinhardt, 1991)(6). Paralelamente se llevan a cabo controles de la trabajabilidad de las mezclas previo a su colocación mediante ensayos con el aparato Vebe, además de tomarse muestras para control de la calidad y verificación de la resistencia de las mezclas de HCR mediante ensayos de resistencia a la compresión simple (ACI, 1999) (Hansen & Reinhardt, 1991)(1)(6).

Las juntas que se forman en las presas de HCR debido al proceso constructivo constituyen zonas de debilidad cuando no se les da el tratamiento adecuado. El curado constituye parte del tratamiento que se le da a la junta para lograr una adecuada adherencia entre las capas; este se realiza manteniendo húmeda la superficie de la junta hasta la colocación de la siguiente capa. Cuando la siguiente capa se coloca después de que el material de la junta ha comenzado a fraguar se forma una junta fría, la que es una zona de debilidad debido a la baja resistencia al corte que allí se desarrolla; para una temperatura de 21 °C una junta fría se forma alrededor de 4 a 6 horas después de la colocación del HCR (ACI, 1999)(1), como solución a este problema

⁴ La densidad libre de aire se define como la densidad que tendría el HCR para un contenido de aire del 0%.

generalmente se utiliza un mortero con el propósito de darle cohesión a la junta lo que la impermeabiliza y aumenta su resistencia al corte; cabe destacar que en Japón todas las presas se construyen utilizando un mortero para dar adherencia entre las juntas al igual que en mezclas con bajo contenido de cemento (Hansen & Reinhardt, 1991)(6).

El proceso desde el mezclado hasta la compactación del HCR debe llevarse a cabo dentro de aproximadamente 45 minutos, dependiendo de las condiciones climáticas pues reducciones en la trabajabilidad y por lo tanto en la resistencia del HCR se pueden presentar, además de no aprovecharse al máximo las ventajas constructivas del HCR (ACI, 1999)(1).

CAPITULO 3

3. PROYECTO HIDROELÉCTRICO “CHONTAL”.¹

El proyecto hidroeléctrico “Chontal” es el resultado de un estudio exhaustivo y detallado llevado a cabo en la cuenca del río Guayllabamba, una de las cuencas más grandes que tiene el Ecuador. La presa “Chontal” forma parte de un sistema integrado de varias centrales hidroeléctricas, cuyos estudios de pre factibilidad se empezaron hace más de 30 años, pero por la falta de inversión se abandonaron hasta que en el año 2008 el consejo provincial de Pichincha decidió retomarlos. Para continuar con los estudios el consejo provincial de Pichincha creó la empresa estatal HIDROEQUINOCCIO E.P. que tiene como objetivo la generación de energía eléctrica a partir de la cuenca del río Guayllabamba.

¹ Información presentada en este capítulo fue proporcionada por la empresa HIDROEQUINOCCIO E.P.(3).

Cuando HIDROEQUINOCCIO E.P. entrega los estudios y diseños definitivos de las presas "Chontal" y "Villadora" a la consultora Geodata-Astec, ésta detecta problemas concernientes con la geología (paleo-cauce) en todo el tramo del río Guayllabamba, los cuales afectaban especialmente a la presa "Villadora". La empresa realizó estudios facultativos y se llegó a establecer que existía un lugar donde se podía construir una presa alta con una central adjunta, la cual tendría la misma cantidad de energía prevista inicialmente por los dos proyectos, de esta manera las dos presas quedaron unificadas en un solo proyecto. Luego en el 2010 el consorcio Geodata- Astec establece el diseño de la presa anunciando la utilización del HCR en su construcción.

3.1. Ubicación geográfica.

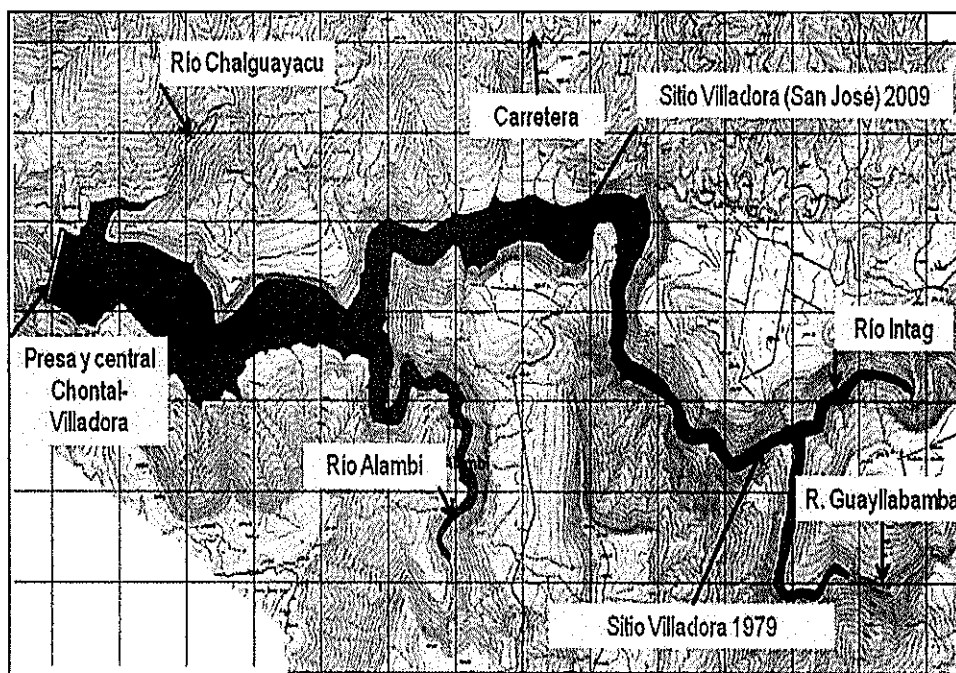
El Proyecto Hidroeléctrico Chontal, está ubicado sobre el río Guayllabamba al noroeste del Ecuador, en el límite de las provincias de Pichincha e Imbabura. Las obras del Proyecto se ubican a 100 km. al noroeste de Quito y se accede a él por la vía Calacalí - La Independencia, con un tramo asfaltado de 74 km. hasta el desvío a la población de Guala y por un camino afirmado de 26 km que llega al

sitio de San Roque por la vía en construcción Selva Alegre – Saguangal. La zona se caracteriza por tener un clima tropical con temperaturas de hasta 25 °C y una humedad entre 80% a 90%.

En la siguiente figura se muestra un mapa de la ubicación de la presa Chontal.



a) Ubicación proyecto Chontal.



b) Detalle del lugar.

Figura 3.1 Mapa de la ubicación de la presa Chontal.²

3.2. Objetivo del proyecto.

- ✓ Obtener el desarrollo sustentable de los recursos hídricos a largo plazo.
- ✓ Evitar los posibles desastres naturales.
- ✓ Conjugar el manejo integrado de los recursos hídricos, conservación y preservación ambiental con el desarrollo económico y social.

² En la figura 3.1 aparece el nombre "Chontal-Villadora" debido a que la figura muestra que finalmente los dos proyectos se unificaron en uno solo.

- ✓ Cubrir la demanda de energía eléctrica que el país requiere en la actualidad (E.M.Tucci, 2009)(4).

3.3. Características de la presa.

Las características generales de la presa Chontal se describen en las siguientes tablas.

Potencia nominal	194MW
Generación media anual	1044GWh
Caudal de diseño	180m ³ /s
Caudal medio generado	100m ³ /s

Tabla 3.1 Características de la presa.

Embalse	
Volumen total de embalsado	53 millones de m ³
Superficie máxima inundada	151 Ha
Presa de HCR	
Altura máxima	142m
Volumen de hormigón	500.000 m ³
Evaluación de crecidas	
Crecida de diseño	4000 m ³ /s
Periodo de retorno	5000 años
Costo	388 millones de dólares

Tabla 3.2 Características del embalse y estructura.

La geometría de la presa es de forma trapezoidal con doble pendiente, su estructura interna está conformada de HCR el cual ocupa el mayor volumen de la presa, esta estructura interna estará recubierta con una capa de hormigón convencional de resistencia promedio 350 kg/m^2 , diseñada con el fin de cumplir con los requerimientos de resistencia establecido en el diseño y lograr un estructura impermeable. En los análisis estructurales realizados por empresa consultora Geodata-Astec se establecen los siguientes requerimientos mecánicos para el HCR a la edad de un año:

- ✓ Resistencia a la compresión simple= 14MPa
- ✓ Modulo de elasticidad = 20GPa

3.4. Ubicación de la cantera de materiales para la elaboración del HCR.

Para la explotación de los agregados a utilizarse en el HCR se ha escogido un macizo rocoso constituido por una roca ígnea plutónica intrusiva conocida como granodiorita y un depósito de arena natural de origen basáltico (ver figura 3.2). El depósito de granodiorita está ubicado a 500m del lugar de construcción de la presa chontal, en la orilla izquierda del Río Chalguyacu, hasta 600m aguas arriba de la

confluencia con el Río Guayllabamba (ver figura 3.1), mientras que la arena natural se extraerá de un depósito localizado a 7 kilómetros al oeste del proyecto, antes de la confluencia del río Magdalena con el Guayllabamba.

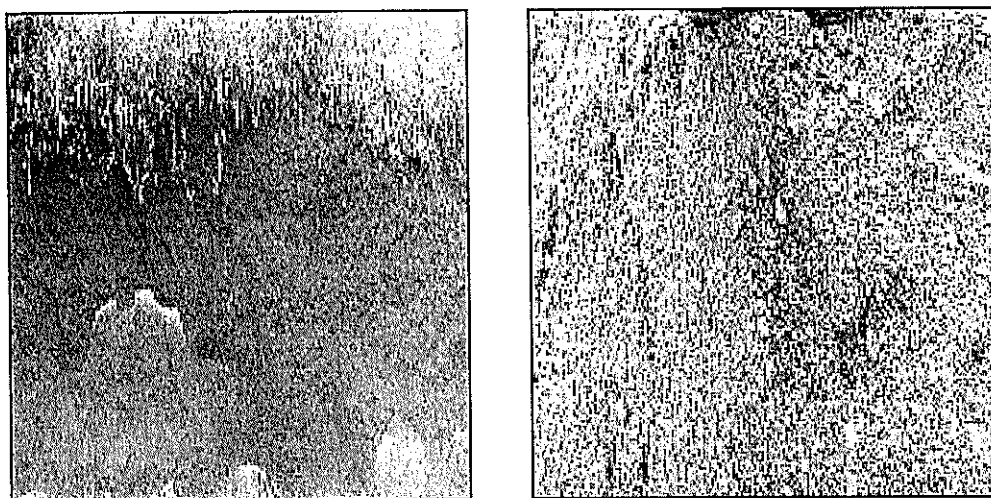


Figura 3.2 Deposito de arena natural.

CAPITULO 4

4. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN LAS DOSIFICACIÓN DEL HCR.

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

Para la elaboración del HCR a utilizar en la presa "Chontal" se dispone de dos piedras, una arena y filler (material pasante el tamiz No 200) provenientes de un proceso de trituración, junto con una arena proveniente de una fuente natural. Como material cementante se tiene

disponible tres tipos de cemento clasificados según la norma INEN 2380 como HE, GU y MH. En las siguientes secciones se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de los materiales.

4.1. Agregados¹

Una de las particularidades que define al HCR es la capacidad que tiene el agregado para trabajar en conjunto con el material cementante, debido a su buena conexión entre los diferentes tamaños de partículas, constituyendo aproximadamente un 80% del volumen total. A continuación se explican los ensayos y análisis realizados a los agregados disponibles para la elaboración del HCR.

4.1.1. Granulometría².

La gradación granulométrica y el tamaño máximo de los agregados (TMA) son parte importantes en el diseño del HCR. Determinar la granulometría de cada uno de los agregados disponibles nos permitirá determinar la proporción en que los mismos deben mezclarse para obtener un arreglo

¹La norma INEN 872 detalla los requisitos que deben cumplir los agregados empleados en hormigón.

² La norma INEN 696 describe el procedimiento a seguir para el análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.

granulométrico acorde a lo requerido para HCR. A continuación se muestra un resumen de los resultados obtenidos del análisis granulométrico realizado a los agregados.

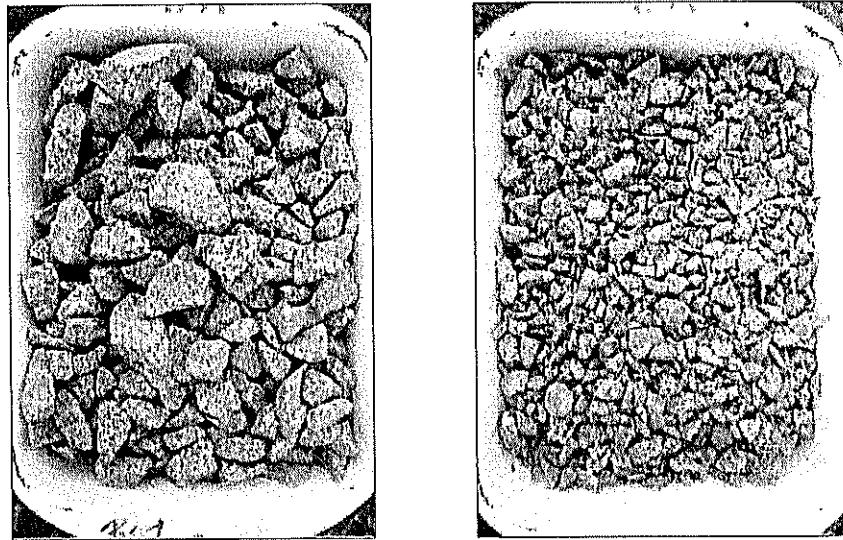
AGREGADO GRUESO

En hormigón se considera agregado grueso todo material que sea retenido en el tamiz No 4. Los resultados del ensayo de granulometría realizados en los dos agregados gruesos disponibles para este estudio, permiten clasificarlos de la siguiente manera:

Piedra N° 5 con un TMA de 38mm y un modulo de finura 7.7

Piedra N° 67 con un TMA de 19mm y un modulo de finura 6.7

En la siguiente figura se muestran los dos agregados gruesos disponibles para este estudio.



a) Piedra No 5

b) Piedra No 67

Figura 4.1 Agregado grueso.

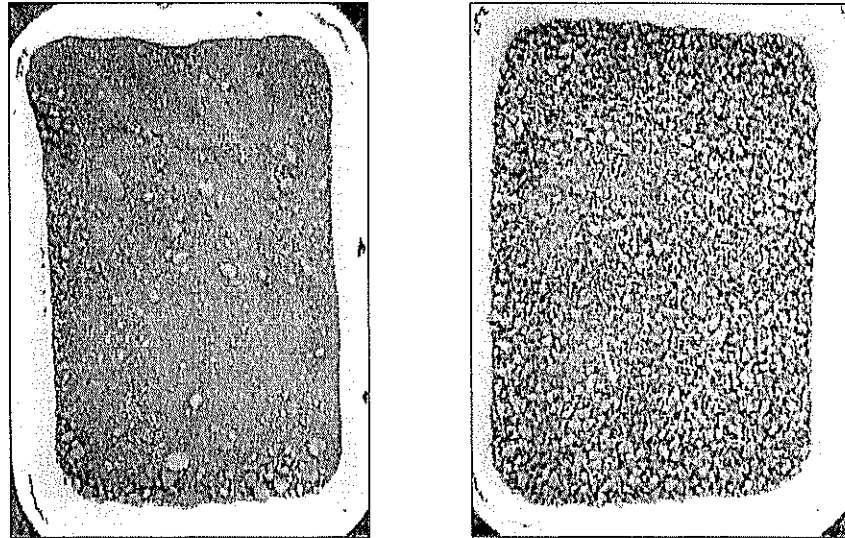
AGREGADO FINO

En hormigón es considerado agregado fino o arena todo material pasante el tamiz No 4. Los resultados del ensayo de granulometría realizados en los dos agregados finos disponibles para este estudio permiten clasificarlos de la siguiente manera:

Arena triturada proveniente de la trituración de granodiorita, de forma cubica- angular libre de contaminantes con un modulo de finura de 3.2.

Arena natural libre de impurezas con un modulo de finura de 2.9.

En la siguiente figura se muestran los dos agregados finos disponibles para este estudio.



a) Arena natural

b) Arena triturada

Figura 4.2 Agregado fino

4.1.2. Gravedad específica, densidad y absorción³.

Conocer la gravedad específica, densidad y absorción de los agregados es indispensable para poder realizar una dosificación constituyendo uno de los ensayos básicos que se realiza con los agregados. A continuación se detalla cada uno de estos términos y los resultados obtenidos en los ensayos.

³ Las normas INEN 856 y 857 describen los procedimientos para determinar la densidad, gravedad específica y la absorción de agregados finos y gruesos respectivamente.

Gravedad específica y densidad: En hormigón se determina la densidad del agregado en estado seco y en estado saturado superficialmente seco (SSS). La densidad se define como la relación entre el peso del material (en estado seco o SSS) y el volumen del mismo incluyendo los poros dentro del material. Adicionalmente se puede determinar la densidad aparente, la cual se define como la relación entre el peso del material y el volumen del mismo sin incluir los poros que existen dentro de éste. La gravedad específica es la relación entre la densidad del material (en estado seco o SSS) y la densidad del agua.

Absorción: La capacidad de absorción se determina encontrando el peso de un agregado bajo condición SSS y en condición seca. La diferencia en pesos expresada como porcentaje del peso seco es la capacidad de absorción de un agregado.

En la tabla 4.1 se detallan los resultados obtenidos de los ensayos de gravedad específica, densidad y absorción que se realizaron con los agregados disponibles.

Agregados	Piedra No 5	Piedra No 67	Arena triturada	Arena natural
Densidad en estado SSS (Kg/m³)	2737	2743	2697	2579
Densidad en estado seco (Kg/m³)	2719	2721	2659	2524
Densidad aparente (Kg/m³)	2769	2786	2765	2670
Absorción (%)	0,66	0,82	1,45	2,18

Tabla 4.1 Densidad y absorción de los agregados gruesos y finos.

4.1.3. Reacción álcali-agregado

La reacción álcali-agregado se produce entre los álcalis, usualmente aportados por el cemento y ciertos elementos reactivos que pueden tener algunos agregados, siempre que existan condiciones adecuadas de humedad, ocurre comúnmente en lugares húmedos y cálidos lo que produce una excesiva expansión en el hormigón y agrietamiento; son varios los ensayos establecidos para identificar agregados reactivos con los álcalis, entre los más conocidos están el ASTM C-227 (INEN 867), ASTM C1260, ASTM1567.

Para evitar problemas asociados con la reacción álcali-agregado especialistas en el tema recomiendan utilizar cementos de bajo contenido de álcalis solubles (menores a 0.6 % en peso como equivalente Na_2O), o contenidos de álcalis solubles que no rebasen 3 kg/m^3 en el hormigón; los cementos disponibles para este estudio se caracterizan por tener un contenido de álcalis solubles menor al 0.6% como Na_2O acorde al requisito opcional (tabla 2) en la norma INEN 152, por lo que clasificarían como cementos de bajo contenido de álcalis.

Para evaluar el potencial reactivo de los agregados disponibles (granodiorita, arena natural) se realizó primeramente pruebas de reactividad álcali-agregado utilizando el cemento tipo I acorde a los procedimientos establecidos en la norma ASTM C1260⁴, la cual nos permite conocer en 16 días si los agregados son potencialmente reactivos.

A continuación se muestran los resultados obtenidos.

⁴ La norma ASTM C1260 establece los procedimientos para determinar el potencial reactivo de los agregados con los álcalis.

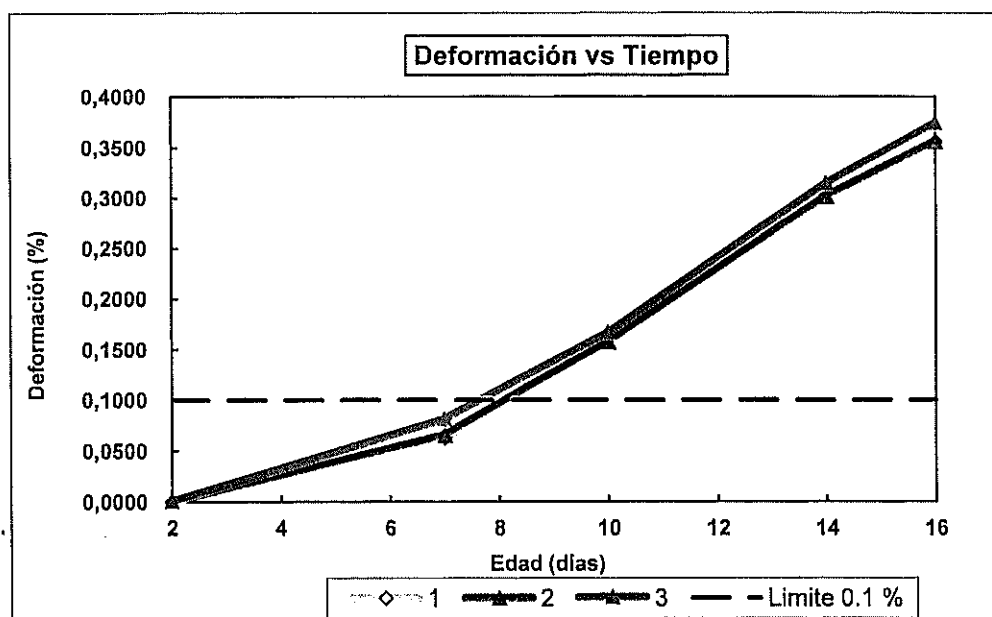


Figura 4.3 Ensayo de reactividad álcali-agregado según la norma ASTM C 1260. Arena natural y cemento Holcim tipo I.

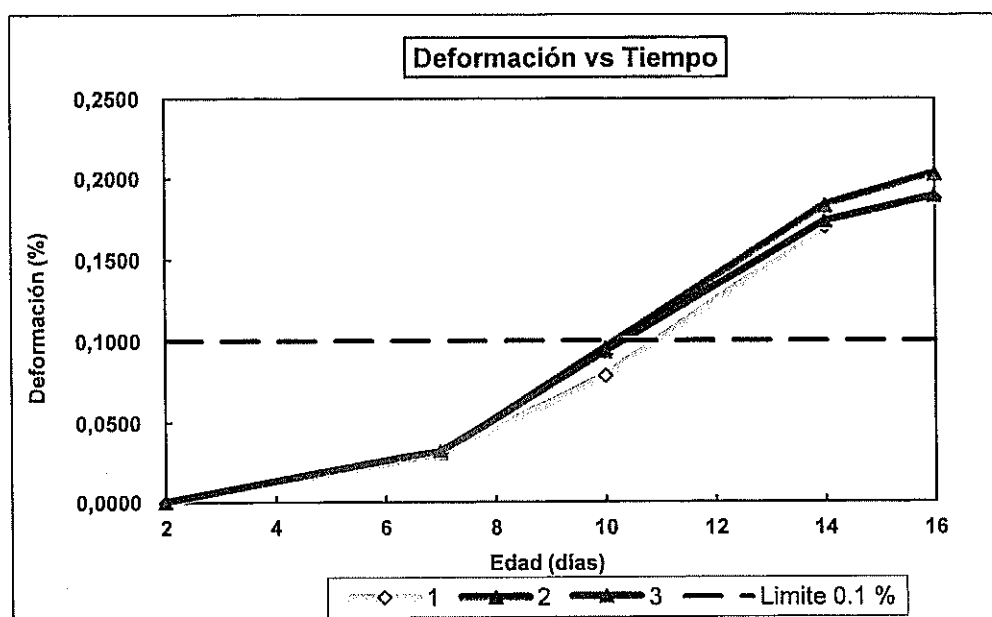


Figura 4.4 Ensayo de reactividad álcali-agregado según la norma ASTM C 1260. Granodiorita y cemento Holcim tipo I.

Los resultados del ensayo muestran que los agregados **son potencialmente reactivos**, pues la expansión obtenida en las barras ha sobrepasado el límite máximo de 0.1% a los 16 días después de haber sido preparadas. Obtenidos estos resultados se propuso realizar pruebas utilizando los cementos puzolanicos tipo HE y GU, pues es de conocimiento general que la puzolana es un material que ayuda a mitigar la reacción álcali-agregado. A continuación se muestran los resultados obtenidos⁵.

⁵ La norma ASTM C1567 establece los procedimientos para evaluar la potencial reacción álcali-sílice entre cementos compuestos y agregados.

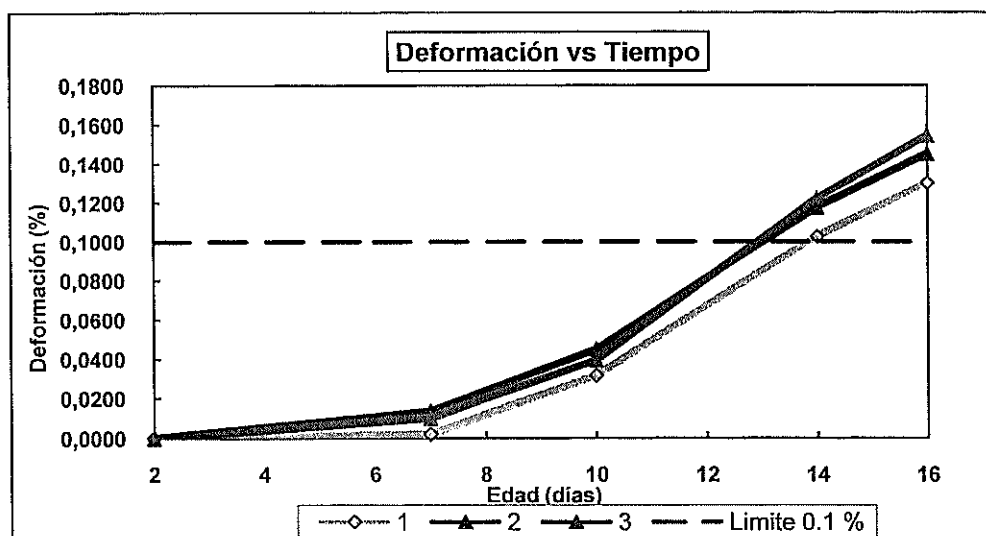


Figura 4.5 Ensayo de reactividad álcali-agregado según la norma ASTM C 1567. Granodiorita y cemento Holcim tipo HE (20% adición puzolanica).

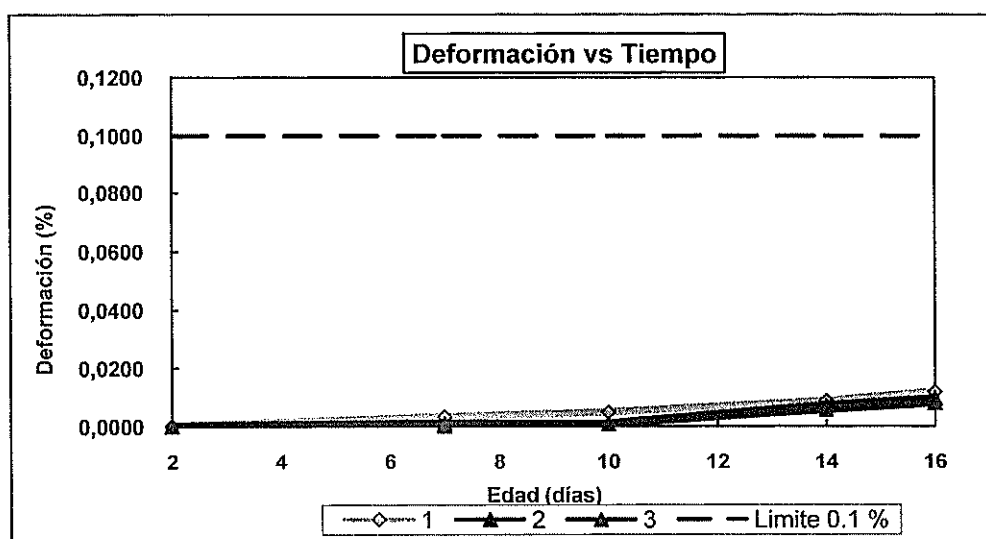


Figura 4.6 Ensayo de reactividad álcali-agregado según la norma ASTM C 1567. Granodiorita y cemento Holcim tipo GU (35% adición puzolanica).

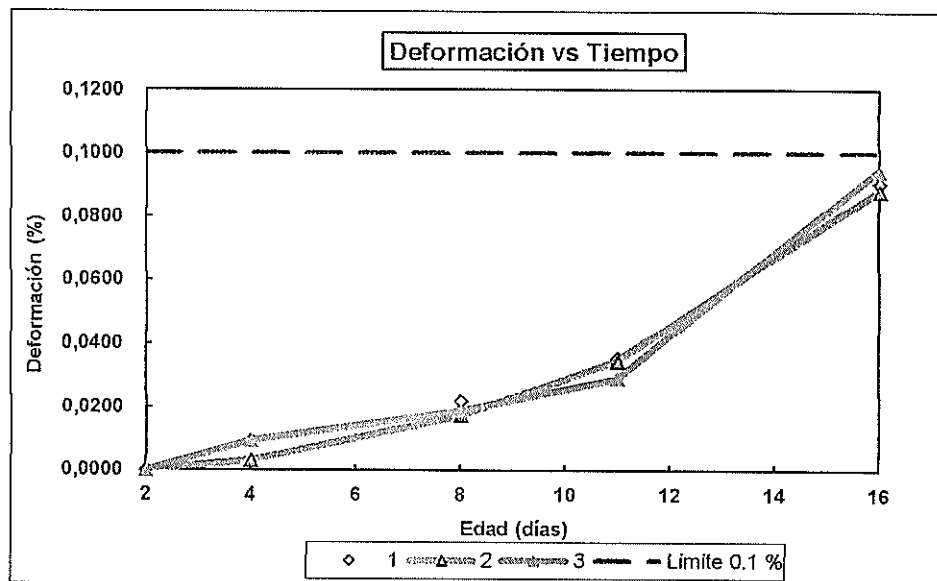


Figura 4.7 Ensayo de reactividad álcali-agregado según la norma ASTM C 1567. Arena natural y cemento Holcim Tipo HE.

Como era de esperarse los resultados muestran que el uso de cementos puzolanicos reduce el potencial expansivo debido a la reacción álcali-agregado obteniéndose mejores resultados con los cementos que tienen un mayor contenido de puzolana. En las figuras 4.6 y 4.7 se puede apreciar que las combinaciones de granodiorita con cemento GU y arena natural con cemento HE no son potencialmente reactivas, pues la proporción de puzolana presente en estos cementos es suficiente para mitigar la reacción álcali-agregado hasta niveles inocuos; sin embargo como se puede apreciar en la figura 4.5, la combinación de

granodiorita con cemento HE produce expansiones mayores a las admisibles, lo cual únicamente indica que **los agregados son potencialmente reactivos**, pues las expansiones que sufren las barras de mortero utilizadas para este ensayo, **no se deben** a la reacción química entre la sílice de los agregados y los álcalis del cemento sino que estas expansiones se deben a la reacción química entre la sílice de los agregados y los álcalis provenientes de una solución de hidróxido de sodio con una concentración 1 Molar (40 g/l de NaOH), la que se considera una concentración elevada que no representa la concentración de álcalis que realmente producirá el cemento .

Finalmente para conocer si la combinación de granodiorita con cemento tipo HE (y por ende la combinación de granodiorita con cemento tipo GU y MH) es potencialmente reactiva se recurrió al ensayo descrito en ASTM C 227 (INEN 867), en el cual no se utiliza ningún tipo de solución para generar álcalis sino que únicamente se trabaja con los álcalis generados por el cemento, la cual representa la condición real de trabajo. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

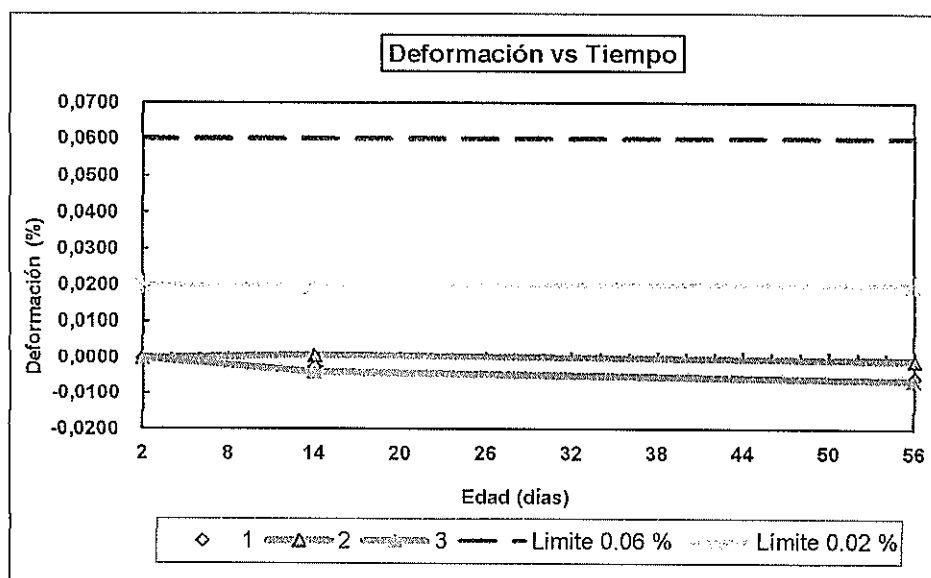


Figura 4.8 Ensayo de reactividad álcali-agregado según la norma ASTM C 227 (INEN 867). Granodiorita y cemento Holcim Tipo HE.

Los resultados obtenidos muestran que la combinación de granodiorita (Agregado considerado más reactivo) con el cemento HE no provoca expansión alguna sino que más bien el mortero experimenta una ligera retracción, la cual es propia de la hidratación del cemento. De esta manera podemos concluir que los agregados disponibles para este estudio no son reactivos con los cementos puzolánicos tipo HE, GU y MH pues se ha comprobado que con el cemento HE (cemento de menor contenido de puzolana) el nivel de expansión obtenido de las barras sujetas al ensayo ASTM C227 (INEN 867) tienen un nivel

menor al máximo admisible (0.02% a los 14 días y 0.06% a los 56 días acorde a la norma INEN 2380).

4.1.4. porcentaje de finos⁶

En hormigón es importante controlar el contenido de finos (material pasante el tamiz No 200) por las siguientes razones:

- ✓ A mayor presencia de finos habrá mayor demanda de agua, puesto que aumenta la superficie a mojar.
- ✓ Si estas partículas están adheridas a los agregados, estas impedirán una buena unión con la pasta, por lo cual la interface mortero-agregado será una zona débil por donde se puede ocasionar la rotura del hormigón.

Sin embargo en HCR a diferencia del hormigón convencional se requiere una mayor proporción de finos (no plásticos) debido a los bajos contenidos de material cementante que se utilizan; La experiencia ha mostrado que un contenido de finos de 3% a 8% del peso de los agregados es adecuado para proveer una

⁶ La norma INEN 697 describe los procedimientos para determinar el porcentaje de material más fino de 75 µm.

adecuada trabajabilidad y disminuir vacíos a las mezclas de HCR.

En la tabla 4.2 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos que se llevaron a cabo para determinar el contenido de finos de los agregados. Los procedimientos seguidos están especificados en la norma ASTM C 117 (INEN 697).

MATERIAL	Porcentaje pasante tamiz No 200 (75 μm)
Piedra No 5	0,2
Piedra No 67	0,2
Arena triturada	6.1
Arena natural	8,1

Tabla 4.2 Porcentaje de finos presente en el agregado.

4.1.5. Impurezas orgánicas⁷

La materia orgánica que se presenta en los agregados, especialmente en los finos consiste en tejidos animales y vegetales que están principalmente formados por carbono, nitrógeno y agua. Este tipo de materia puede afectar en forma

⁷ La norma INEN 855 describe los procedimientos para determinar las impurezas orgánicas en el agregado fino.

dañina ciertas propiedades del hormigón tales como su resistencia, durabilidad y desarrollo del proceso de fraguado. Por esta razón es importante controlar el contenido de materia orgánica en los agregados especialmente en la arena.

El ensayo más utilizado para detectar la existencia de materia orgánica en los agregados es el ensayo del colorimétrico, el cual se implemento para este estudio; el ensayo consiste en colocar una muestra del árido en una probeta, a la cual se le agrega una solución de hidróxido de sodio, la cual es agitada para luego dejar que esta repose por 24 horas, luego de lo cual se compara el color del líquido que sobrenada en la muestra con el comparador de colores para determinar si la muestra contiene impurezas orgánicas.

En la siguiente figura se muestran los resultados obtenidos para la arena de río y arena triturada.



Figura 4.9 Ensayo de colorímetro.

Como se observa en la figura 4.9 los resultados muestran que tanto la arena de río y arena triturada no presentan contaminación alguna de materia orgánica.

4.1.6. Resistencia a la abrasión⁸.

En HCR es necesario realizar este tipo de ensayo para verificar que los agregados no son deleznable, pues es necesario que estos no se fracturen durante su compactación, lo cual alteraría la composición granulométrica del HCR. Los resultados de este

⁸ En la norma INEN 860 y INEN 861 se describen los procedimientos para determinar la resistencia a la abrasión e impacto en la máquina de los ángeles.

ensayo dependen principalmente de las características de la roca madre y de su estructura interna.

A continuación se detallan los resultados obtenidos de la degradación de los áridos gruesos mediante el uso de la máquina De Los Ángeles.

Abrasión Piedra No 67= desgaste de Los Ángeles 36.5%

Abrasión Piedra No 5= desgaste de Los Ángeles 31.5%

4.1.7. Examen petrográfico de la granodiorita y arena natural.

La finalidad del análisis petrográfico es determinar la calidad del agregado y sus características mineralógicas con el objetivo de determinar si existen minerales potencialmente reactivos con los álcalis generados por el cemento.

Las características de la roca granodiorita se detalla a continuación:

Roca ígnea intrusiva, leocucrática (73,2% de mineral félsico y 26,8% de minerales máficos) según el método de Índice de coloración M' (conteo puntual de minerales claros y oscuros) (PETROECUADOR, 2010)(13).

Félsico: abundante en elementos livianos como el silicio, oxígeno, aluminio, sodio y potasio su palabra surge de la combinación de feldespato y sílice. Los minerales félsicos son normalmente de color claro.

Máficos: su nombre proviene de la presencia de los minerales como son magnesio y hierro y son de color oscuro.(HARVEY, 1987)(7).

El índice de coloración va a depender de la cantidad (en porcentaje) de mineral máfico, que este caso se encuentra entre un 10% y 35%. Así tenemos que por predominar el mineral félsico la roca se la conoce como roca ígnea leocucrática.

En la siguiente figura se muestra la estructura interna del agregado utilizado para el diseño del HCR.

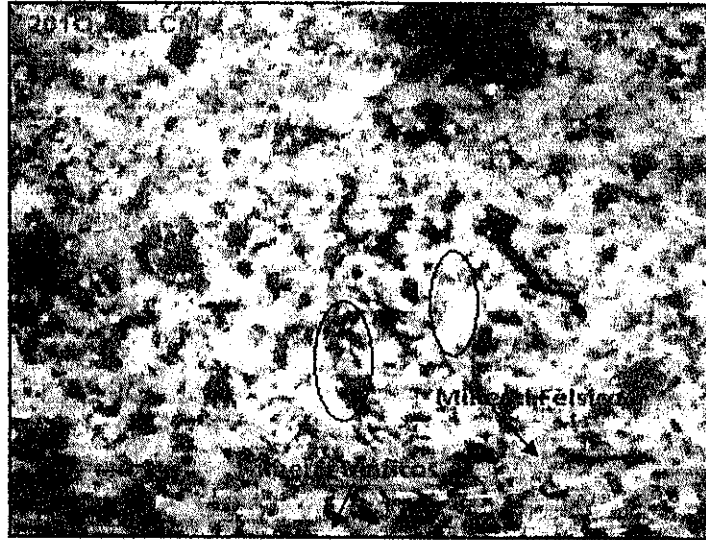


Figura 4.10 Estructura interna de la granodiorita

La figura 4.10 muestra el mineral material félsico (cuarzo compuesto principalmente por dióxido de silicio), el cual es el principal responsable de las expansiones observadas en los ensayos de álcali-agregado.

A continuación se detallan las características de la arena natural:

La arena posee granos de tamaño grueso a medio según la clasificación de UDDEN.

La arena es de origen ígneo, conformada microscópicamente por granos de arena media a muy fina, mal clasificada de feldespatos potásicos y cuarzo.

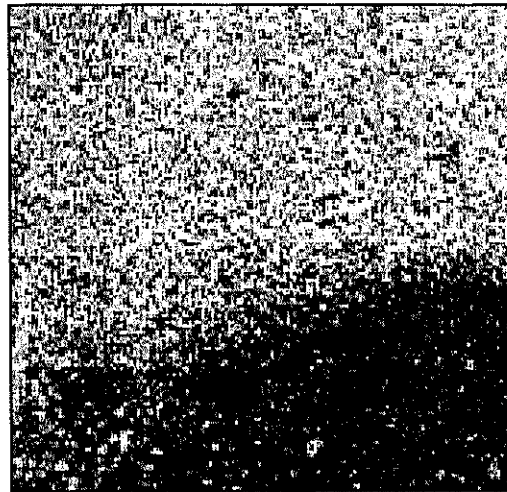


Figura 4.11 Granos componentes de la arena natural.

4.2. Material cementante

El tipo de material cementante utilizado debe generar un moderado calor de hidratación, para evitar en lo posible la formación de fisuras dentro de la masa del hormigón debido a esfuerzos de origen térmico.

4.2.1. Tipos de cemento

El ligante más apropiado para el diseño de presas tradicionalmente recomendado son los tipos II y tipo IV según la norma ASTM o un cemento mixto. En este estudio se utilizaron 3 tipos de cemento clasificados según la norma INEN 2380 como:

- ✓ Cemento GU
- ✓ Cemento HE
- ✓ Cemento MH

Estudios realizados han demostrado que el aumento de puzolana mejora la resistencia a los sulfatos y acrecienta la resistencia a la reacción álcali agregado, además mejora la trabajabilidad y provee de una elevada cohesión debido a su gran área específica, lo cual mejora la durabilidad del hormigón.

4.2.2. Características físicas y químicas del material cementante.

A continuación se describen las características físicas y químicas de los cementos utilizados para este estudio.

Cemento tipo GU.

El cemento de uso general tipo GU es adecuado para todas las aplicaciones donde las propiedades especiales no sean exigentes. Además este tipo de ligante es recomendado para hormigones masivos debido a su baja calor de hidratación.

En la siguiente tabla se muestran las características del cemento GU.

Resistencias a la Compresión simple	1 día	9,5MPa
	3 días	17,6 MPa
	7 días	22,4 MPa
	28 días	-
Porcentaje de puzolana		35%
Blaine		ND
Retenido tamiz No 325		8,40%
Fraguado inicial		168 minutos
Fraguado final		277 minutos
Expansión en la barra de mortero a los 14 días		ND
calor de hidratación 7 días (cal/g)		75

Tabla 4.3 Características del cemento GU.

Cemento Tipo HE.

El cemento tipo HE proporciona alta resistencia en edades tempranas, usualmente menos de una semana. Su uso en hormigón incluye pavimentos, pisos, edificios en concreto armado, puentes, tubería, productos de concreto prefabricado y otras aplicaciones donde se usa el cemento tipo III⁹.

En la tabla 4.4 se muestran las características del cemento HE.

Resistencias a la Compresión simple	1 día	14 MPa
	3 días	24,9 MPa
	7 días	31,4 MPa
	28 días	-
Porcentaje de puzolana		20%
Blaine		460m ² /kg
Retenido tamiz No 325		6,40%
Fraguado inicial		153 minutos
Fraguado final		274 minutos
Expansión en la barra de mortero a los 14 días		ND
calor de hidratación 7 días (cal/g)		82

Tabla 4.4 .Características del cemento HE

⁹ Para mayor información de los tipos de cemento I , II y III revisar la norma ASTM C 150

Cemento Tipo MH

Este tipo de ligante se caracterizan por su moderado calor de hidratación y se utiliza donde las exigencia de resistencias no son elevadas, esto se debe a la presencia considerada de puzolana la misma que reduce el potencial reactivo de la sílice del agregado con el álcali del cemento.

En la tabla 4.5 se muestran las características del cemento MH.

Resistencia a la Compresión simple	1 día	3,5 MPa
	3 días	7,65 MPa
	7 días	11 MPa
	28 días	17,6 MPa
Porcentaje de puzolana		45%
Blaine		ND
Retenido tamiz No 325		8,29%
Fraguado inicial		172 minutos
Fraguado final		275 minutos
Expansión en la barra de mortero a los 14 días		ND
calor de hidratación 7 días (cal/g)		52

Tabla 4.5. Características del cemento MH

4.3. Características del filler

4.3. Características del filler

Para obtener una granulometría continua, mejorar los efectos de compactación y evitar posibles vacíos dentro del hormigón se optó por utilizar un material de trituración del agregado granodiorita pasante del tamiz No 200, conocido como filler, el cual se caracteriza por ser un material fino no plástico.

Estudios anteriores han demostrado que la adición de filler en el diseño del HCR aumenta su densidad y mejora la compactación, esto se debe a que ayuda a ocupar los espacios vacíos que se generan dentro de la estructura. Sin embargo su porcentaje en la mezcla debe ser controlado ya que a mayor porcentaje aumenta la superficie a mojar y la demanda de agua.

4.4. Características del agua a utilizar.

El agua utilizada para este tipo de hormigón debe ser potable en lo posible libre de contaminantes; un agua contaminada podría ocasionar problema en el fraguado y en el desarrollo de la resistencia del hormigón.

4.5. Resultados obtenidos de la caracterización de los agregados.

En la tabla 4.6 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización del agregado utilizado para este estudio.

CARACTERISTICAS DEL AGREGADO					Norma
AGREGADOS	Piedra No 5	Piedra No 67	Arena Triturada	Arena Natural	
Modulo de finura	7,7	6,7	3,2	2,9	INEN 696
Porcentaje de Finos	0.2	0.2	6.1	8.1	INEN 697
Absorción (%)	0,66	0,82	2,1	1,4	INEN 856 - INEN 857
Densidad (SSS) (kg/m ³)	2737	2743	2579	2697	
Impureza orgánica	-	-	NO	NO	INEN 855
Resistencia a la Abrasión (%)	31.5%	36.5%	ND	ND	INEN 860 - INEN 861

Tabla 4.6 Resultados de ensayos del agregado utilizado para el diseño del HCR

En las siguientes figuras se muestran las curvas granulométricas obtenidas de los análisis granulométricos realizados con los agregados gruesos y finos.

CURVA GRANULOMÉTRICA

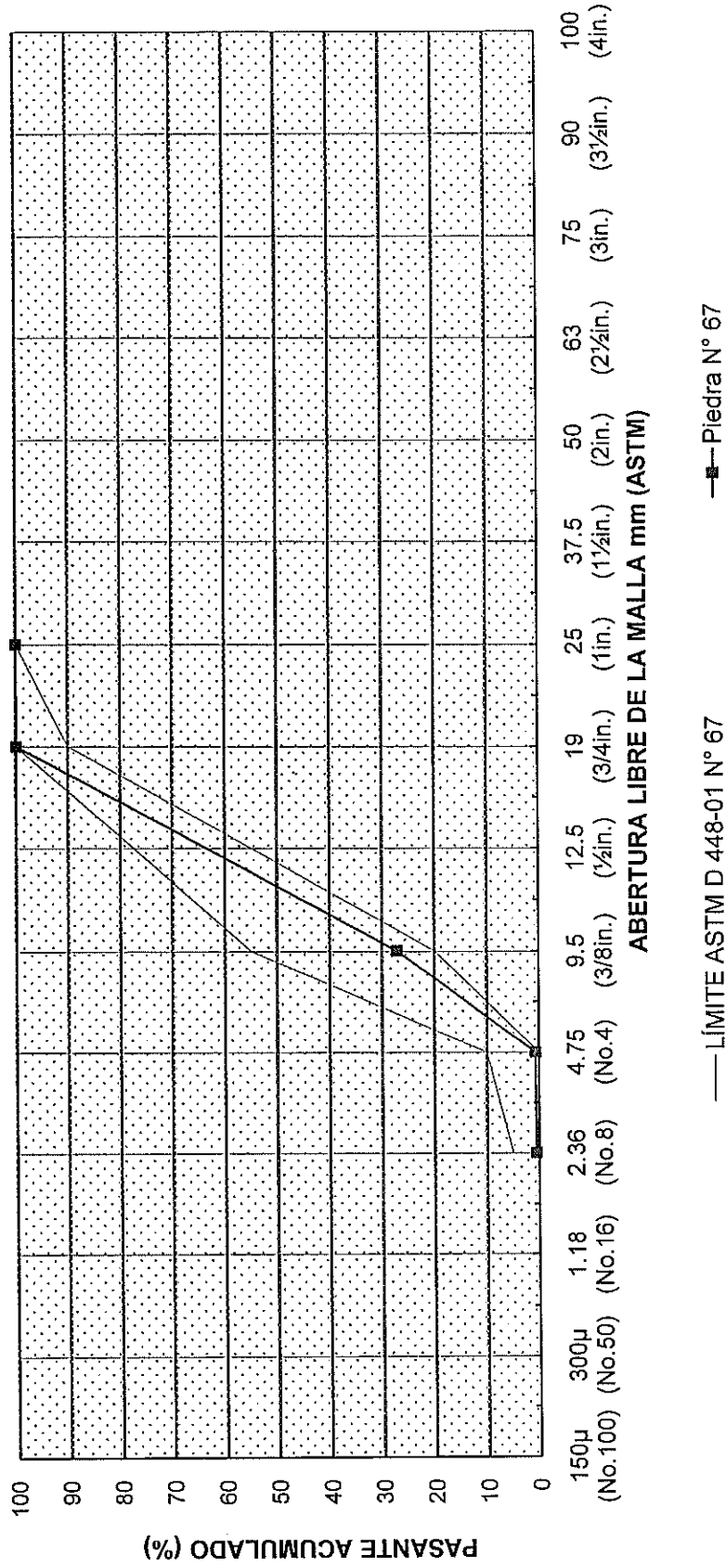


Figura 4.12 Curva granulométrica del material grueso piedra No 67.

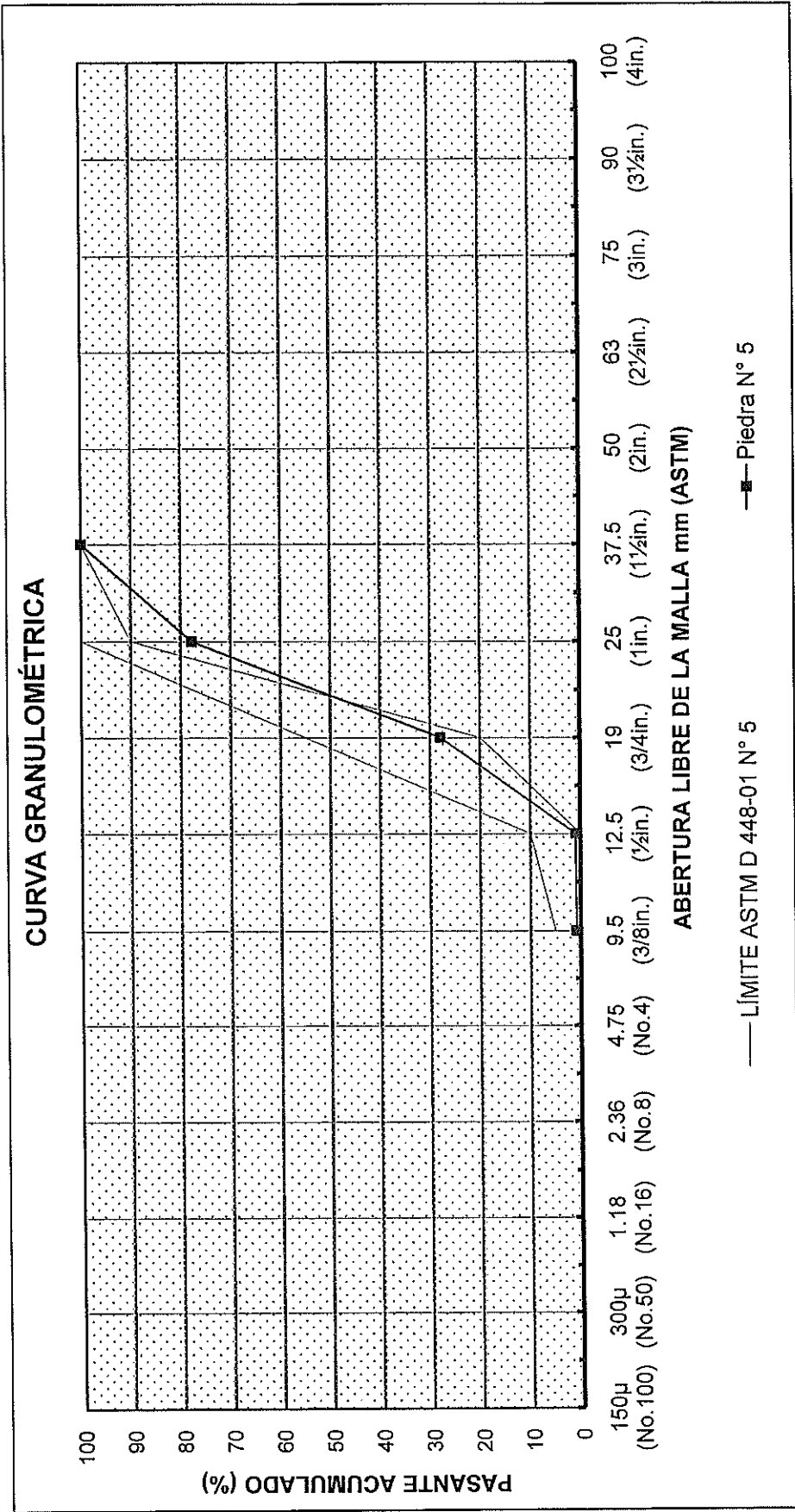


Figura 4.13 Curva granulométrica del material grueso N°5

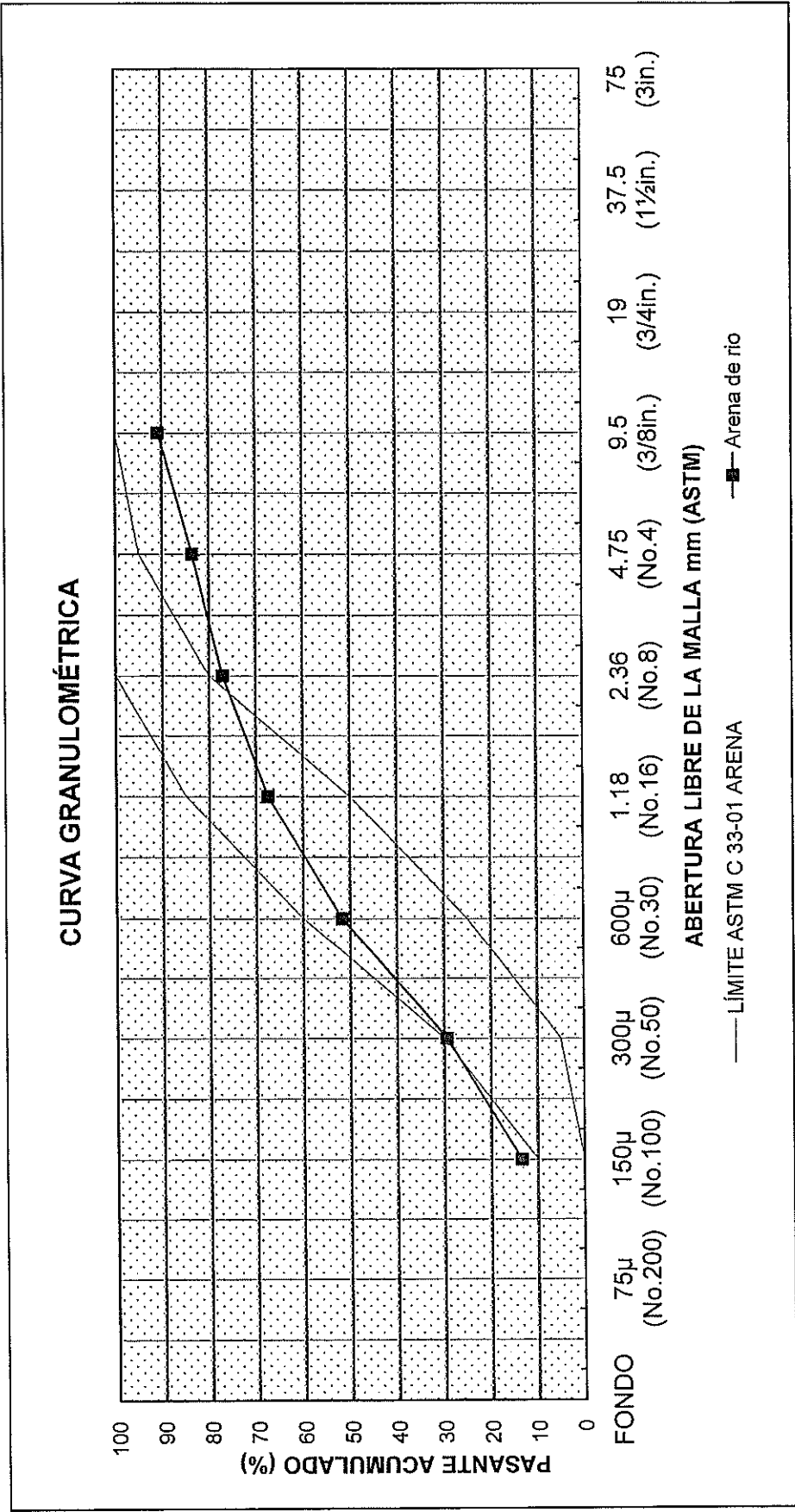


Figura 4.14 Curva granulométrica de la arena natural.

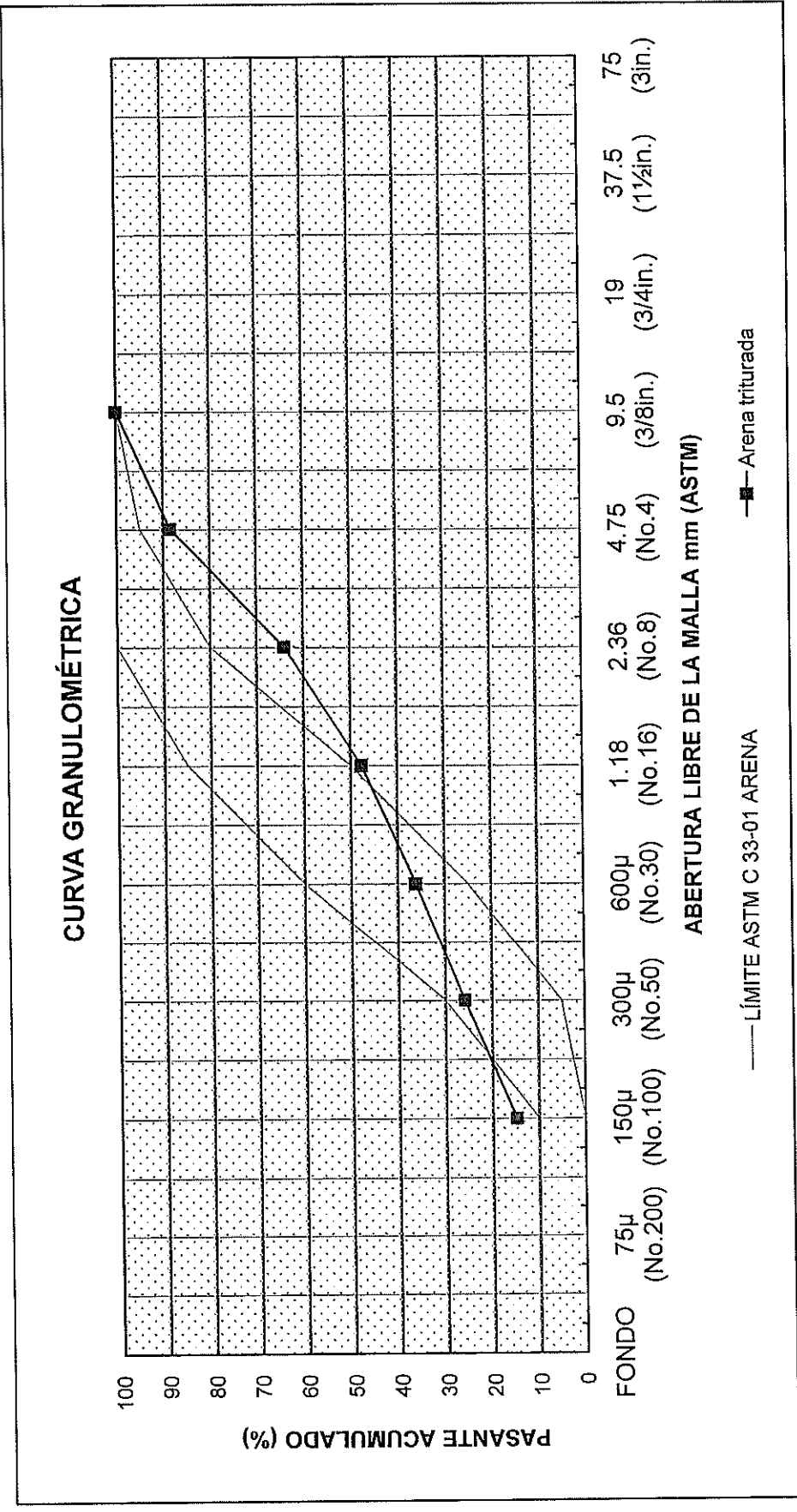


Figura 4.15 Curva granulométrica de la arena triturada.

CAPITULO 5

5. PRUEBAS PRELIMINARES DE LA DOSIFICACIÓN.

En este capítulo se presentan las dosificaciones de trabajo propuestas junto con los procedimientos y resultados de las pruebas preliminares realizadas a las mismas con el objetivo de determinar los contenidos de agua óptimos que produzcan la máxima densificación del material. Utilizando los resultados de estas pruebas se obtendrán las dosificaciones a utilizarse para el estudio de sus propiedades mecánicas.

5.1. Dosificaciones propuestas.

Previo a la dosificación del HCR es necesario realizar un ajuste granulométrico de los agregados disponibles buscando que este se ajuste a lo requerido para HCR. A continuación se muestra el arreglo granulométrico propuesto, el cual se enmarco dentro de los limites sugeridos para HCR de bajo contenido de cemento (Schrader, SpecGrad.doc, 2010)(16).

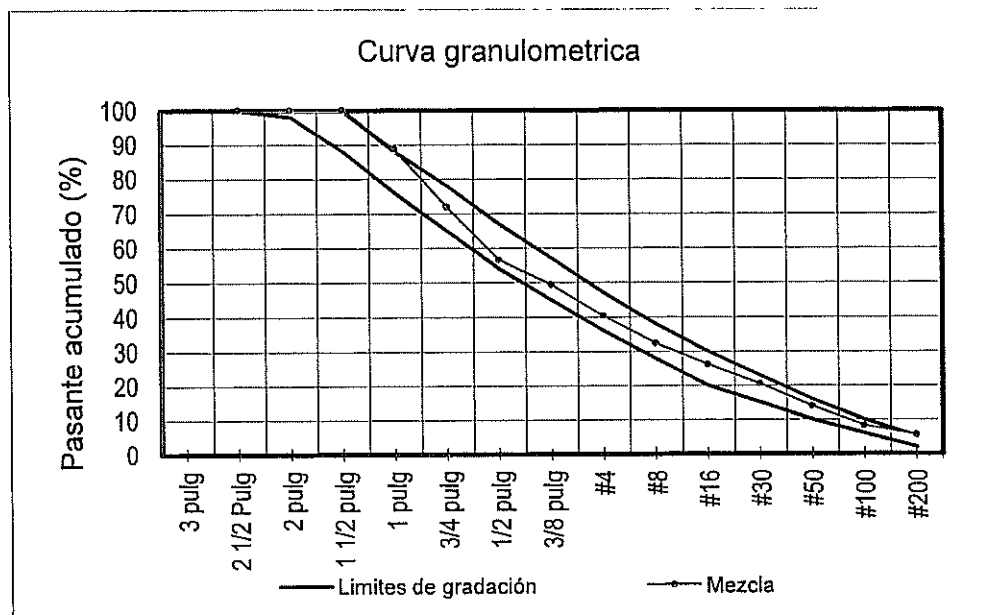


Figura 5.1 Granulométrica propuesta para el HCR.

Utilizando la granulometría arriba mostrada se propuso las siguientes dosificaciones preliminares:

Tipo de cemento	HE			
Dosificación	kg (D1)	kg (D2)	kg (D3)	Contenido de agregados
Cemento	75	95	105	-
Agua	118	118	118	-
Piedra TM 38mm	850	850	850	38%
Piedra TM 19mm	358	358	358	16%
Arena triturada	626	626	626	28%
Arena natural	370	370	370	16,5%
Filler	33	33	33	1,5%

Tabla 5.1 Dosificaciones con cemento HE.

Tipo de cemento	GU			
Dosificación	kg (D4)	kg (D5)	kg (D6)	Contenido de agregados
Cemento	75	95	105	-
Agua	118	118	118	-
Piedra TM 38mm	850	850	850	38%
Piedra TM 19mm	358	358	358	16%
Arena triturada	626	626	626	28%
Arena natural	370	370	370	16,5%
Filler	33	33	33	1,5%

Tabla 5.2 Dosificaciones con cemento GU.

Tipo de cemento	MH		
	Dosificación	kg (D7)	kg (D8)
Cemento	75	95	-
Agua	118	118	-
Piedra TM 38mm	850	850	38%
Piedra TM 19mm	358	358	16%
Arena triturada	626	626	28%
Arena natural	370	370	16,5%
Filler	33	33	1,5%

Tabla 5.3 Dosificaciones con cemento MH.

En las dosificaciones presentadas es necesario encontrar el contenido óptimo de agua que produzca la máxima densificación del material. Para esto se implemento la elaboración de curvas densidad vs humedad, las cuales se desarrollaron para los cemento HE y GU con contenidos de $95-105 \text{ kg/m}^3$ y $75-95 \text{ kg/m}^3$ respectivamente, utilizando contenido de agua de 110, 118 y 132 Kg/m^3 . Para los otros contenidos y tipos de cementos solamente se procedió a determinar la densidad con un contenido de agua de 118 kg/m^3 .

5.2. Descripción de equipos de trabajo.

Balanzas.

Para pesar los materiales se utilizó una balanza con una capacidad de 60 kg y una precisión de ± 5 gramos.

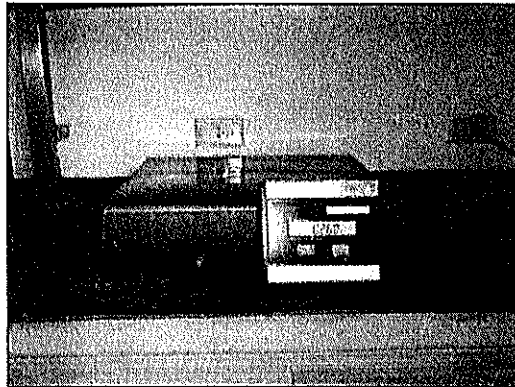


Figura 5.2 Balanza.

Mezcladora horizontal.

Para el proceso de mezclado se utilizó una mezcladora tipo artesa con una capacidad de 40 dm^3 .

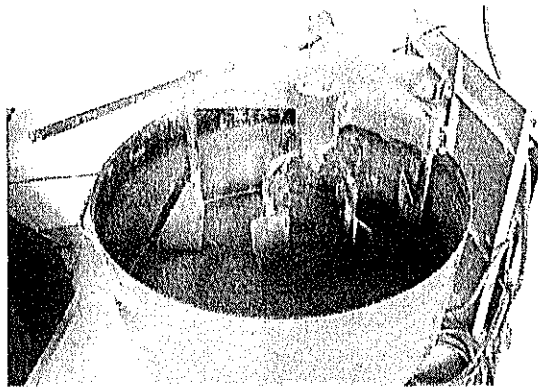


Figura 5.3 Mezcladora tipo artesa.

Martillo Hilti.

Se utilizo un martillo Hilti modelo TE 805 y un apisonador circular de diámetro 75 mm para compactar el material dentro de la olla de Washington.

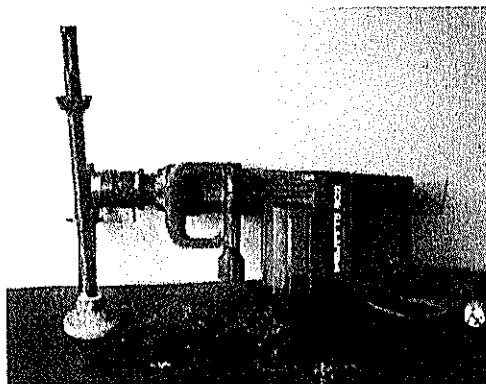


Figura 5.6 Martillo Hilti y apisonador circular.

Olla de Washington.

Para poder medir la densidad y el contenido de aire de las mezclas se utilizo la olla de Washington que tiene una capacidad de 7 litros.

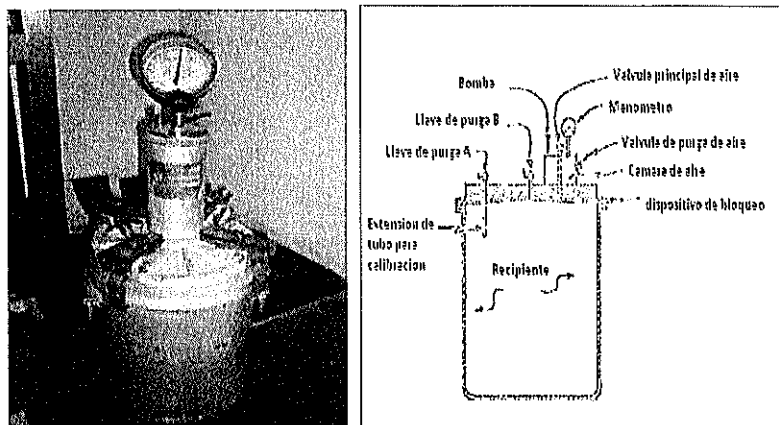


Figura 5.5 a) Olla de Washington. b) Detalles del aparato.

Discos de madera, collarines y tamiz No 4.

Los discos de madera, collarines y tamiz No 4 se utilizaron para dar acabado a la superficie de los cilindros.



Figura 5.4 Discos de madera, collarines y tamiz.

5.3. Preparación de las muestras.

Para elaborar las curvas densidad vs humedad se propuso preparar mezclas de 15 dm^3 con las dosificaciones ya indicadas. Las mezclas se prepararon a una temperatura ambiente de $23 \text{ }^\circ\text{C}$ y una humedad relativa de 86%. A continuación se detalla el procedimiento de preparación de mezclas:

Luego de pasar el diseño del estado SSS al estado real de la humedad de los agregados se procedió a pesar los materiales con una precisión de ± 5 gramos e inmediatamente se los colocó en la mezcladora para proceder con un mezclado en seco durante dos minutos con el objeto de facilitar el posterior mezclado del mismo,

colocando primero el agregado grueso, luego el agregado fino, filler y el cemento. Posterior al mezclado en seco se procedió a colocar el agua de diseño y se mezcló por tres minutos hasta lograr homogenizar completamente el material, finalmente se dejó reposar la mezcla por 5 minutos, cubriéndola con un plástico para evitar la pérdida de humedad.

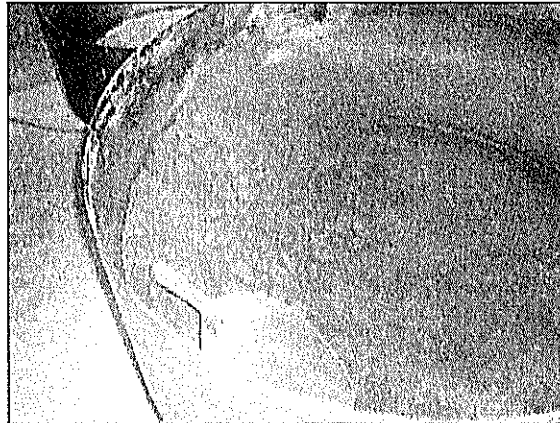


Figura 5.7 Preparación de la mezcla.

5.4. Parámetros a medir.

Luego de los 5 minutos de reposo de la mezcla se procedió a determinar su densidad y contenido de aire utilizando la olla de Washington. Para esto el material se compactó dentro de la olla en tres capas de igual espesor hasta lograr su máxima densificación, utilizando el martillo Hilti y el apisonador circular de 75 mm de

diámetro. Para facilitar la compactación de la última capa se utilizó un collarín y para lograr un acabado liso de la misma se colocó material pasante el tamiz No 4, el cual se compactó utilizando discos de madera (ver figura 5.8 b). Luego de lograr el acabado liso se procedió a pesar el material junto con la olla de volumen conocido, con lo cual se determinó la densidad húmeda alcanzada.



Figura 5.8 Determinación de densidad del HCR. a) Compactación por capas b) Uso de disco de madera para lograr un acabado liso.

Obtenida la densidad húmeda del material se procedió a determinar el contenido de aire de la mezcla¹. Para esto primeramente se cierra la olla y se procede a llenar su interior con agua utilizando las válvulas de purga A y B (ver figura 5.5 b) hasta eliminar completamente cualquier burbuja de aire que pueda quedar en el interior de la misma. Luego se procede a llenar la cámara de aire hasta la marca de calibración indicada en el manómetro utilizando la válvula principal de aire y seguidamente se cierra las llave de purga A y B. Finalmente se procede a abrir la válvula de purga de aire, con lo cual el manómetro indica el contenido de aire en el interior del recipiente que es el contenido de aire de la mezcla.

Obtenido la densidad y contenido de aire de la mezcla se procedió a tomar una muestra representativa de material para determinar el contenido de humedad de la mezcla. Finalmente con estos datos se elaboro las curvas densidad vs humedad.

¹ La norma ASTM C 231 describe los procedimientos para determinar el contenido de aire y densidad del hormigón utilizando la olla de Washington.

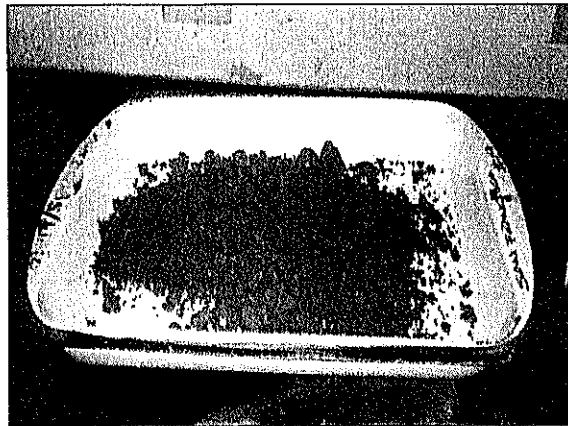
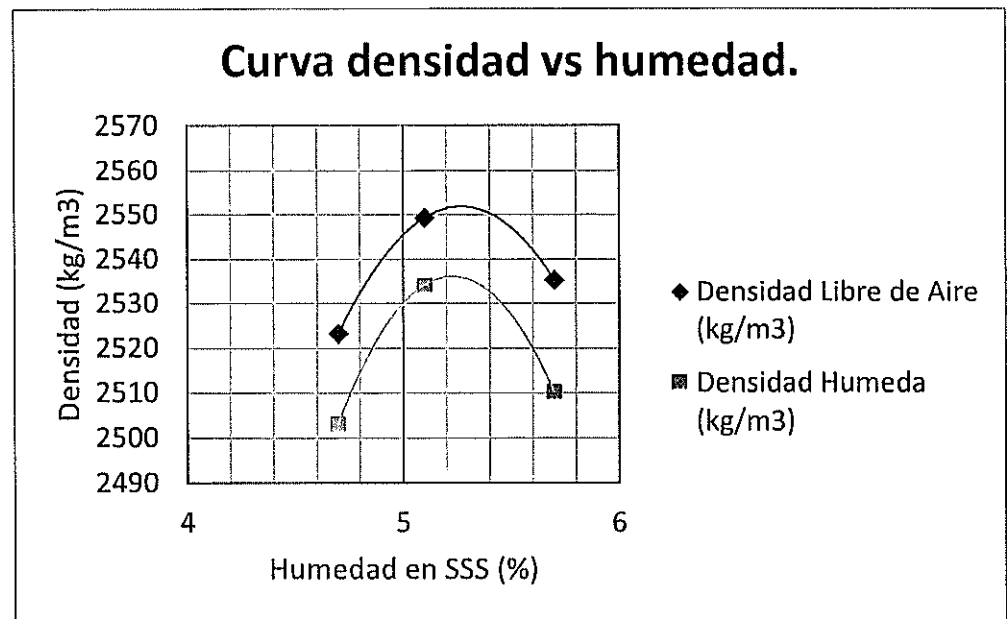
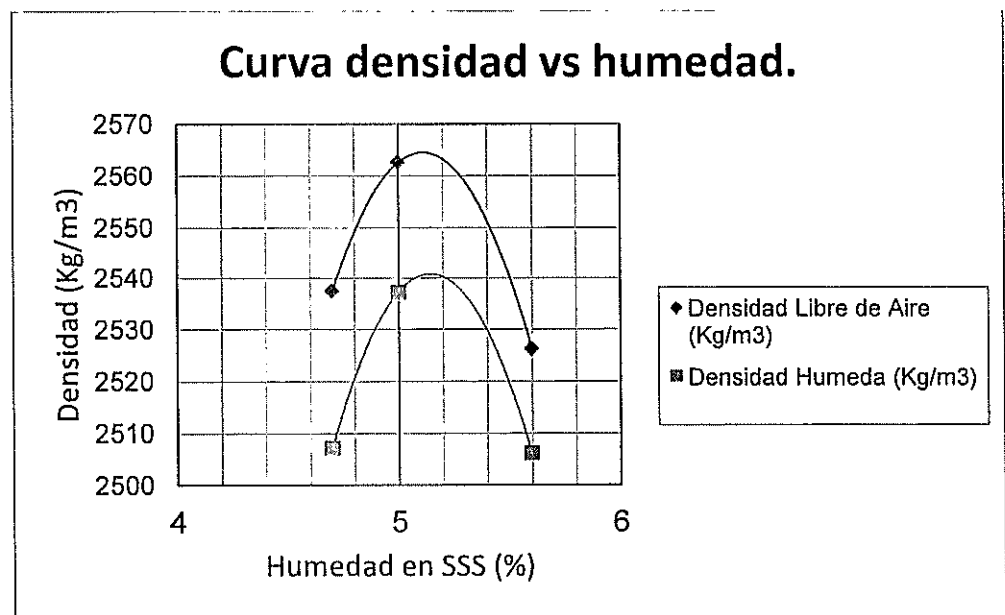


Figura 5.9 Muestra para la determinación de la humedad del HCR.

5.5. Resultados de las pruebas preliminares de la dosificación.

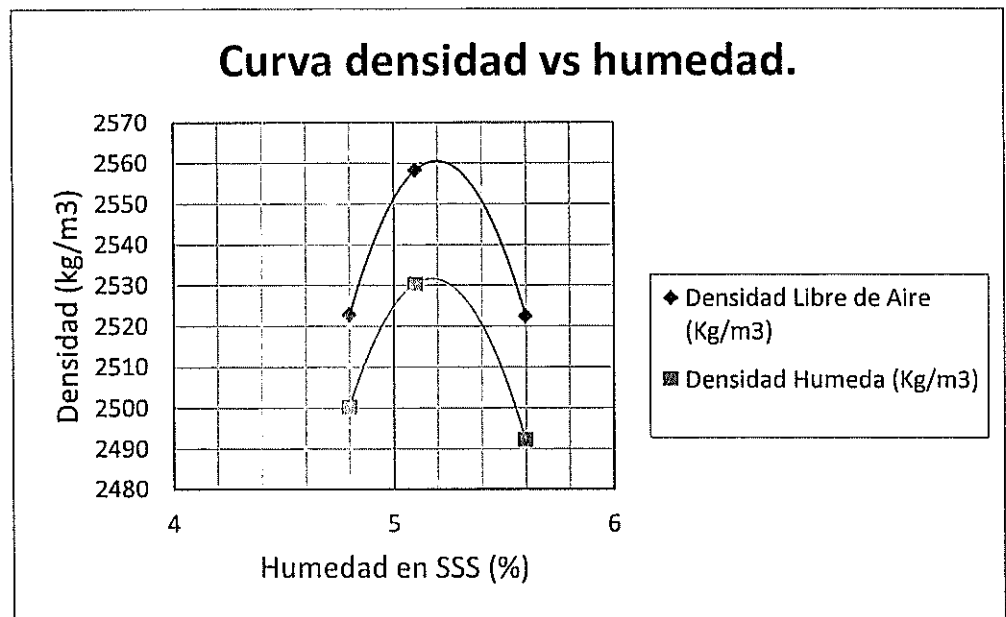
5.5.1. Curvas densidad vs humedad.

A continuación se muestran las curvas densidad vs humedad construidas con los datos obtenidos.

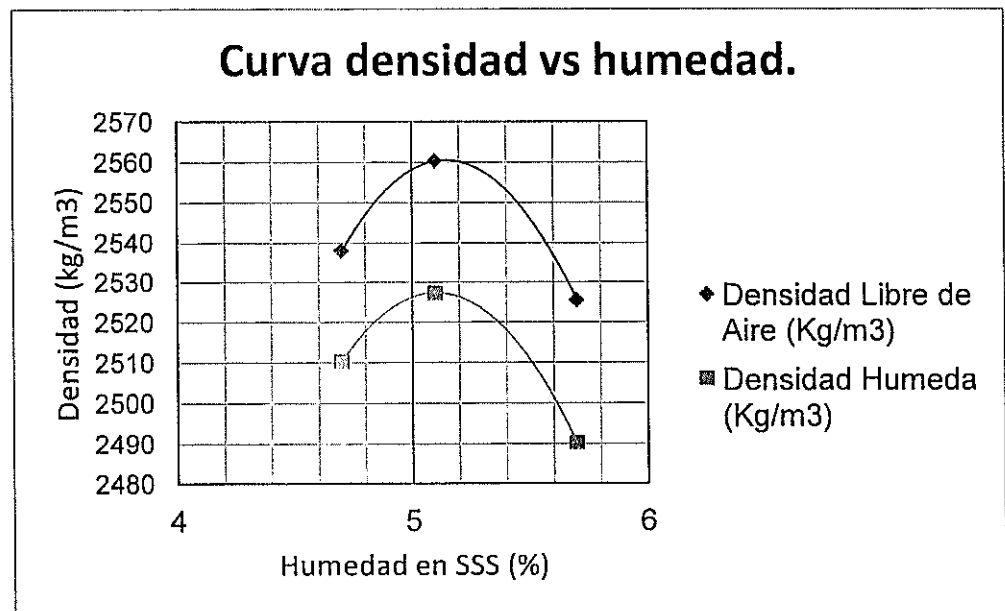
a) Cemento HE-95 Kg/m³.

b) Cemento HE-105Kg.

Figura 5.10 Curvas densidad vs humedad para cemento HE.



a) Cemento GU-75 Kg.



b) Cemento GU-95 Kg.

Figura 5.11 Curvas densidad vs humedad para cemento GU.

5.5.2. Tablas de resultados obtenidos.

Cemento HE	Contenido de cemento (kg/m ³)								
	75			95			105		
Contenido de agua (kg/m ³)	110	118	132	110	118	132	110	118	132
Humedad (%)	-	5,10%	-	4,72%	5,06%	5,66%	4,70%	5,04%	5,64%
Densidad húmeda (kg/m ³)	-	2530	-	2503	2534	2510	2507	2537	2522
Contenido de aire (%)	-	1,0%	-	0,8%	0,6%	1,0%	1,2%	1,0%	1,4%
Densidad libre de aire (kg/m ³)	-	2556	-	2523	2549	2535	2537	2563	2558

Tabla 5.4 Densidades alcanzadas con cemento HE.

Cemento GU	Contenido de cemento (kg/m ³)								
	75			95			105		
Contenido de agua (kg/m ³)	110	118	132	110	118	132	110	118	132
Humedad (%)	4,76%	5,10%	5,71%	4,72%	5,06%	5,70%	-	5,04%	-
Densidad húmeda (kg/m ³)	2500	2530	2492	2510	2527	2490	-	2526	-
Contenido de aire (%)	0,9%	1,1%	1,2%	1,1%	1,3%	1,4%	-	1,1%	-
Densidad libre de aire (kg/m ³)	2523	2558	2522	2538	2560	2525	-	2554	-

Tabla 5.5 Densidades alcanzadas con cemento GU.

Cemento MH	Contenido de cemento (kg/m ³)					
	75			95		
Contenido de agua (kg/m ³)	110	118	132	110	118	132
Humedad (%)	-	5,10%	-	-	5,06%	-
Densidad húmeda (kg/m ³)	-	2527	-	-	2528	-
Contenido de aire (%)	-	1,1%	-	-	1,2%	-
Densidad libre de aire (kg/m ³)	-	2555	-	-	2538	-

Tabla 5.6 Densidades alcanzadas con cemento MH.

5.5.3. Análisis de resultados.

De los datos obtenidos se concluye que con contenidos de agua de 118 kg/m³ se obtienen valores de densidad húmeda alrededor de 2530 kg/m³ independientemente del tipo y contenido de cemento. Por otro lado se tiene que el promedio de los contenidos de aire en la mezcla es de un 1%, lo cual indica que se han alcanzado excelentes porcentajes de compactación. Las mezclas con contenidos de agua de 118 kg/m³ se caracterizaron por ser mezclas trabajables, contrariamente a las mezclas con contenido de agua de 110 y 132 kg/m³ que se clasificaron como mezclas muy secas y muy húmedas respectivamente pues presentaron problemas al momento de la compactación.

Los resultados muestran que un contenido de agua de 118 kg/m^3 es el que se debe utilizar en el diseño de las mezclas para el estudio de sus propiedades mecánicas pues este produce la máxima densificación del material lográndose además mezclas fácilmente compactables.

CAPITULO 6

6. ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DEL HCR

En este capítulo se presentan los procedimientos y resultados del estudio de las propiedades mecánicas del HCR cuyo objetivo es:

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

Obtenidos los contenidos óptimos de humedad se procedió a estudiar las propiedades mecánicas del HCR con los diferentes tipos y contenidos de cemento para cumplir con los objetivos ya establecidos. Para el estudio de las propiedades mecánicas se propuso elaborar con cada dosificación cilindros para ser ensayados a 3, 7, 14, 28, 56, 90, 180, 365 días y para ser sujetos a un procedimiento de curado acelerado de 16 días¹, evaluando sus propiedades mecánicas mediante ensayos de compresión simple y modulo de elasticidad y ensayos de tracción indirecta.

A continuación se muestran las dosificaciones de trabajo, las cuales se seleccionaron en base a los resultados de las pruebas preliminares (ver capítulo 5), sin embargo en este caso se aumentó el contenido de agua previendo las pérdidas de humedad que existen debido a las condiciones ambientales de trabajo.

¹ El curado acelerado simula con buena aproximación en 16 días un curado convencional de un año.

6.1. Dosificaciones propuestas.

Tipo de cemento	HE			
	Dosificación	kg (D1)	kg (D2)	kg (D3)
Cemento	75	95	105	-
Agua	125	125	122	-
Piedra TM 38mm	850	850	850	38%
Piedra TM 19 mm	358	358	358	16%
Arena triturada	626	626	626	28%
Arena natural	370	370	370	16,5%
Filler	33	33	33	1,5%

Tabla 6.1 Dosificaciones con cemento HE.

Tipo de cemento	GU			
	Dosificación	kg (D4)	kg (D5)	kg (D6)
Cemento	75	95	105	-
Agua	122	122	122	-
Piedra TM 38mm	850	850	850	38%
Piedra TM 19 mm	358	358	358	16%
Arena triturada	626	626	626	28%
Arena natural	370	370	370	16,5%
Filler	33	33	33	1,5%

Tabla 6.2 Dosificaciones con cemento GU.

Tipo de cemento	MH		
	Dosificación	kg (D7)	kg (D8)
Cemento	75	95	-
Agua	120	122	-
Piedra TM 38mm	850	850	38%
Piedra TM 19mm	358	358	16%
Arena triturada	626	626	28%
Arena natural	370	370	16,5%
Filler	33	33	1,5%

Tabla 6.3 Dosificaciones con cemento MH.

6.2. Descripción de equipos de trabajo.

Plancha metálica no absorbente.

Se utilizó una plancha metálica no absorbente de 2.5 x 2.5 m como superficie para el mezclado del HCR.



Figura 6.1 Plancha metálica no absorbente.

Martillo Hilti.

Se utilizo dos martillos Hilti modelo TE 805 y un apisonador circular de diámetro 75 mm para elaborar los cilindros.

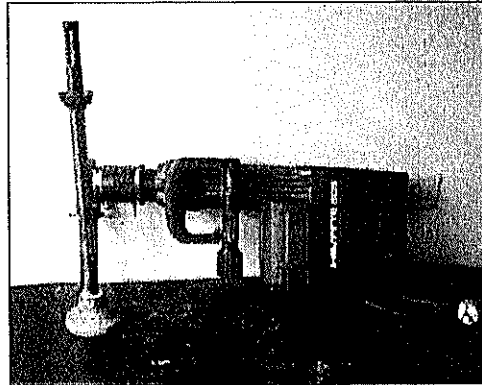


Figura 6.2 Martillo Hilti y apisonador circular.

Mezcladora.

Para el proceso de mezclado del HCR se utilizo una mezcladora con una capacidad de 100 dm³.

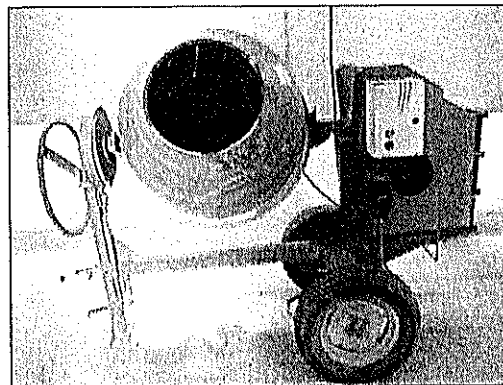
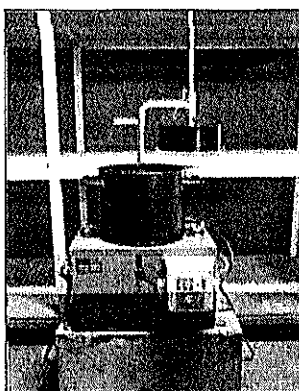


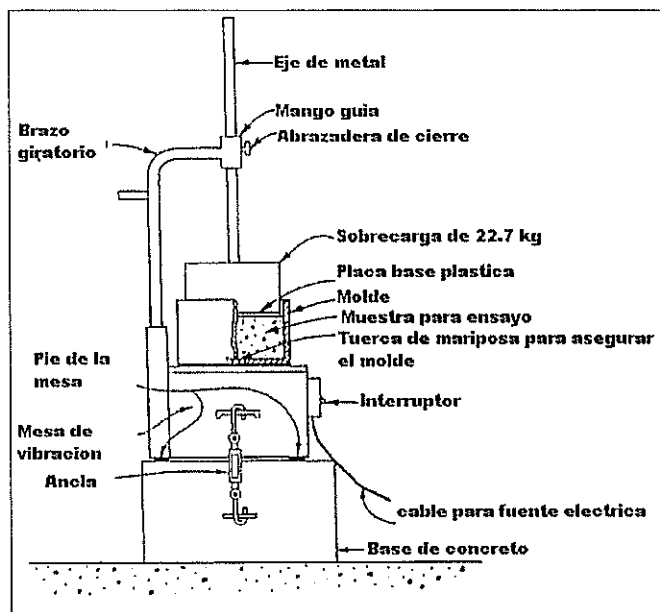
Figura 6.3 Mezcladora para hormigón.

Aparato Vebe.

Para medir la trabajabilidad y la densidad de las mezclas de HCR se utilizo el aparato Vebe.



a)



b)

Figura 6.4 a) Aparato Vebe. b) Detalles del aparato.

Moldes de acero.

Para la elaboración de los cilindros se utilizo moldes de acero con altura y diámetro interno de 300 mm y 150 mm respectivamente.

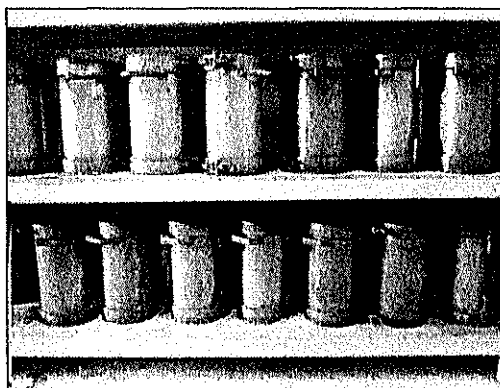


Figura 6.5 Cilindros de 300x150 mm.

Balanza.

Para pesar los materiales se utilizo una balanza con una capacidad de 150 kg y una precisión de ± 50 gramos.

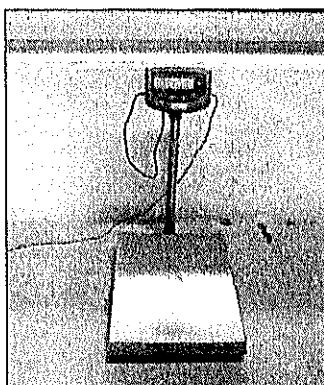


Figura 6.6 Balanza.

Discos de madera, collarines y tamiz No 4.

Los discos de madera, collarines y tamiz No 4 se utilizaron para dar acabado a la superficie de los cilindros.

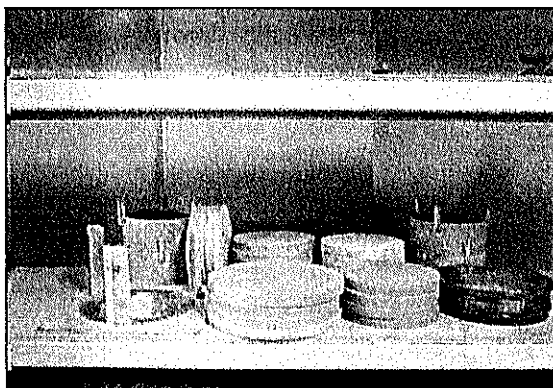


Figura 6.7 Discos de madera, collarines y tamiz.

6.3. Preparación de muestras.

La preparación de las muestras es un punto crítico en el estudio de las propiedades mecánicas del HCR pues el objetivo es preparar muestras que reflejen las verdaderas propiedades del HCR, las cuales pueden ser opacadas mediante el uso de inadecuados procedimientos de mezclado, colocación y compactación o mediante el uso de materiales contaminados, segregados o deteriorados.

Para ensayar los cilindros a las edades requeridas es necesario preparar por cada dosificación 27 cilindros de 150 mm de diámetro y

300 mm de altura para lo cual 160 dm^3 de HCR son suficientes. Sin embargo estos se prepararon en dos porciones de 80 dm^3 debido a que se cuenta con una mezcladora de 100 dm^3 de capacidad; por lo tanto se prepararon 13 cilindros en la primera porción y 14 en la segunda. La temperatura ambiente a la cual se prepararon los cilindros fue 27°C en promedio y la medición de la densidad y trabajabilidad de las mezclas se hizo únicamente en la primera porción de cada dosificación.

A continuación se detalla el procedimiento para la elaboración de mezclas:

Luego de pasar cada dosificación desde el estado SSS al estado real de humedad de los agregados se procedió a pesar los materiales con una precisión de ± 50 gramos.

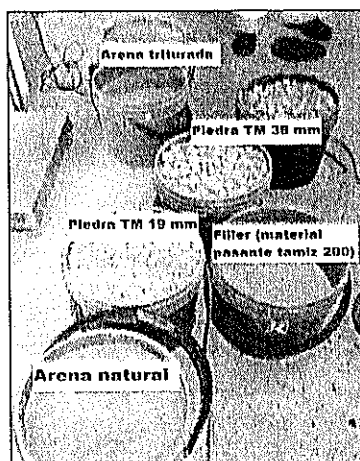


Figura 6.8 Materiales pesados previo a la elaboración del HCR.

En seguida se procedió a mezclar en seco los materiales mediante palas y por un minuto con el fin de facilitar el posterior mezclado de los mismos. Los materiales se colocaron sobre la plancha metálica no absorbente para evitar la contaminación y pérdida de material. Primeramente se colocó el agregado grueso luego el agregado fino y finalmente el filler y el cemento para facilitar el proceso de mezclado.

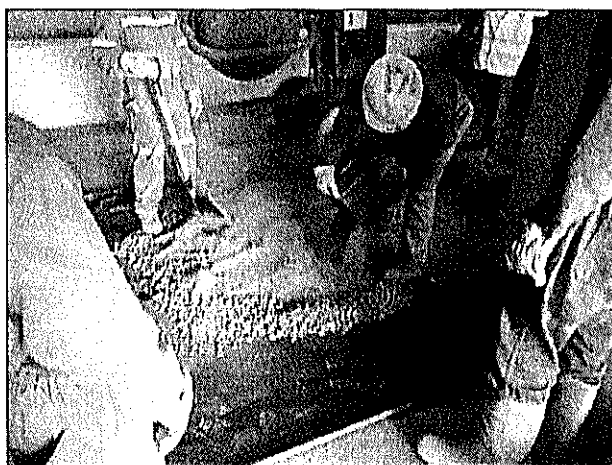


Figura 6.9 Proceso de mezclado en seco.

Posteriormente se colocó el material en la mezcladora y se procedió con el mezclado. El material se colocó en tres partes, a intervalos de tiempo de un minuto y finalmente se mezcló por tres minutos. Luego de mezclar cada parte se verificó que no exista material adherido a las paredes de la mezcladora, la misma que se humedeció previo a la

colocación de los materiales para evitar la absorción del agua por parte de esta.

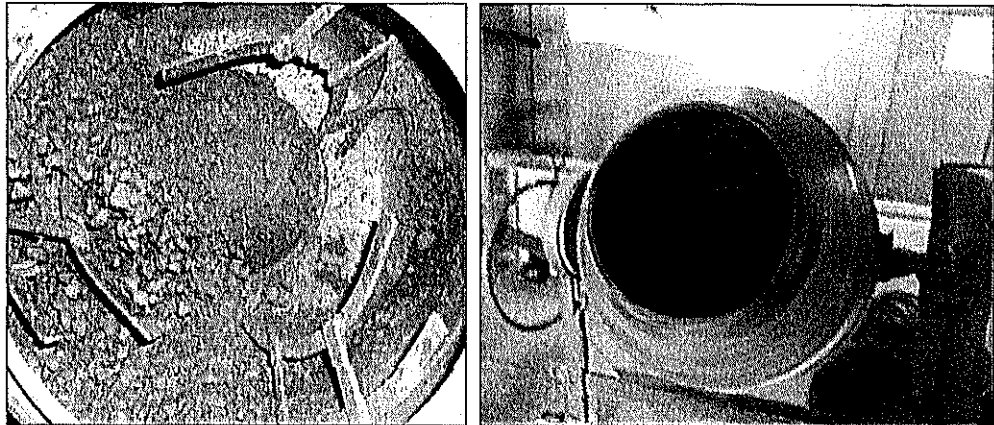


Figura 6.10 Mezclado del HCR.

Luego de este procedimiento el material se colocó nuevamente en la plancha metálica y para evitar su segregación y lograr uniformizarlo se procedió a mezclarlo por 30 segundos utilizando palas; Se humedeció la plancha metálica previa a la colocación de la mezcla para evitar la pérdida de humedad de la misma. Finalmente el material se cubrió con un plástico para impedir que pierda humedad quedando listo el HCR para preparar los cilindros.

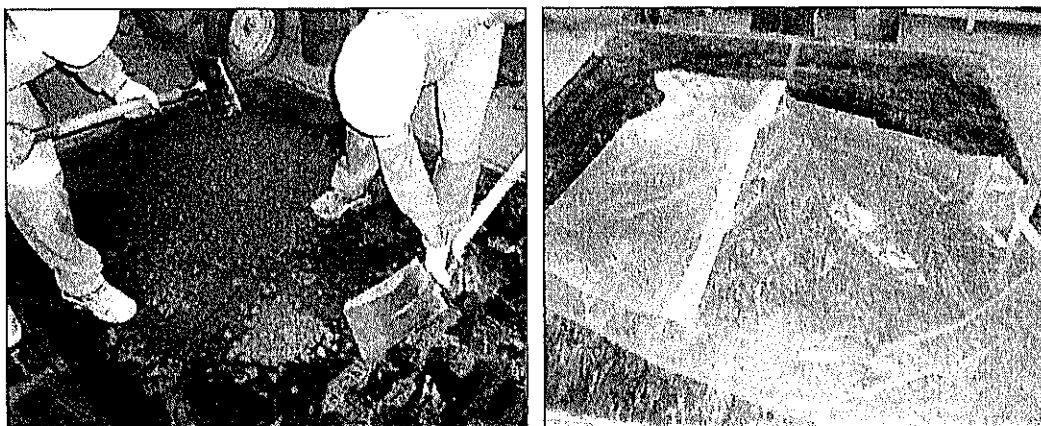


Figura 6.11 a) Mezclado manual de HCR b) HCR protegido de la pérdida de humedad.

Los cilindros de HCR se deben elaborar de manera que se logre la adecuada compactación del material y que los mismos no presenten oquedades. Para esto se procedió a elaborar los cilindros en tres capas de igual espesor, utilizando el apisonador circular de diámetro 75 mm; obteniéndose un tiempo promedio de compactación por capa de un minuto. Para evitar vibraciones incómodas que dificulten el proceso de compactación, los cilindros se fijaron a un tablero base (figura 6.12 b). Para elaborar la tercera capa del cilindro se utilizó collarines los cuales facilitan la elaboración de esta capa como muestra la figura 6.13.



Figura 6.12 a) Proceso de compactación del HCR. b) Cilindros fijados mediante tablero base.



Figura 6.13 Uso de collarines para la elaboración de la tercera capa de los cilindros.

Para lograr un acabado liso en la superficie de los cilindros se utilizo material pasante el tamiz No 4 el cual se coloco en la superficie de los cilindros y con la ayuda de discos de madera se lo compacto hasta lograr un acabado liso.



Figura 6.14 Procedimiento para lograr un acabado liso en los cilindros.

Luego de lograr el acabado de los cilindros, estos se cubrieron con un plástico por 24 horas hasta que sean desmoldados y sujetos al proceso de curado.



Figura 6.15 Uso de plástico para la prevención de la pérdida de humedad en los cilindros.

6.3.1. Parámetros a medir.

Los parámetros que deben medirse en el HCR en estado fresco son su trabajabilidad y densidad. Como en todo hormigón en HCR se requiere una mezcla con una adecuada trabajabilidad que facilite los procesos constructivos; normalmente las mezclas con bajo contenido de cemento como la que se está estudiando tienen un tiempo Vebe (t_3) entre 45 a 80 segundos (Hansen & Reinhardt, 1991)(6). La densidad de la mezcla es una medida del grado de compactación que ha alcanzado el material y se utiliza como referencia de la densidad que debe alcanzar los cilindros.

Para medir la trabajabilidad del HCR se utilizo el aparato Vebe². Para esto se toma una muestras representativa de aproximadamente 13 kg la cual se coloca dentro del molde, seguidamente se coloca la sobrecarga normalizada de 22.7 kg sobre la superficie de la muestra, y luego se enciende la mesa vibratoria y se mide tres tiempos, se toma el tiempo que tarda la pasta en formar un anillo alrededor de la sobrecarga (t_1), luego se toma el tiempo que tarda la pasta en formar un anillo alrededor de

² La norma ASTM C 1170 describe el procedimiento para determinar la densidad y trabajabilidad del HCR utilizando el aparato Vebe”.

la placa base plástica (t_2) y finalmente se toma el tiempo hasta que la pasta forma un anillo en el espacio existente entre el molde y la placa base plástica (t_3). Para medir la densidad se rellena el molde con material adicional y se procede a compactarlo, luego se mide el peso del mismo y el volumen del molde con lo cual se calcula la densidad.

Las muestras para medir la trabajabilidad y densidad se tomaron inmediatamente después de terminar el mezclado del HCR y previo a la elaboración de los cilindros debido a que la trabajabilidad de las mezclas disminuye con el tiempo.



Figura 6.16 Medición de la densidad de las mezclas.

6.4. Curado de las muestras.

Las mezclas de HCR se diseñan para que alcancen una cierta resistencia a la edad de un año, sin embargo para el estudio de las mezclas es impráctico esperar todo ese tiempo, por lo que se adopta un procedimiento de curado acelerado para estimar estas propiedades. Para este estudio se destino tres cilindros por cada dosificación a un procedimiento de curado acelerado y los demás a un curado convencional³ para edades de 3, 7, 14, 28, 56, 90, 180, 365 días.

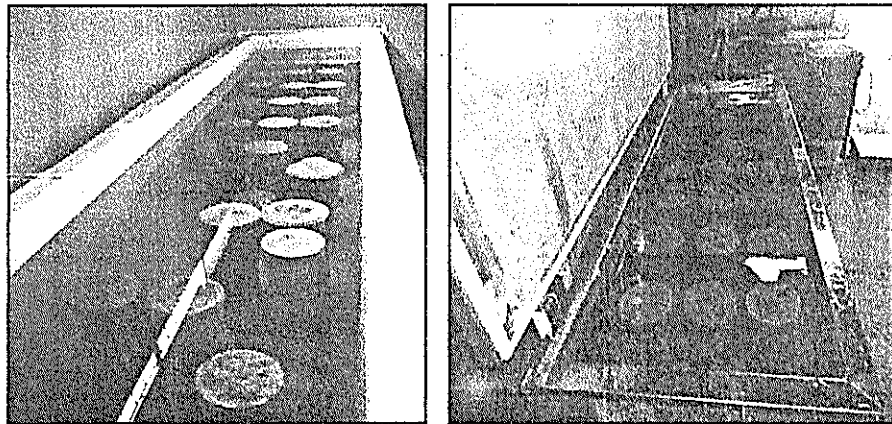


Figura 6.17 a) Curado convencional. b) Curado acelerado.

³ Un curado convencional consiste en mantener el hormigón sumergido en agua a una temperatura de 23 ± 2 grados centígrados.

A continuación se detalla el procedimiento de curado acelerado.

6.4.1. Curado acelerado de muestras.

El curado acelerado es un procedimiento que consiste en sujetar al hormigón a condiciones de temperatura y humedad tales que aceleren las reacciones químicas entre el cemento y el agua. En HCR este procedimiento se ha utilizado exitosamente para simular un curado convencional de un año. Los resultados obtenidos mediante este procedimiento han resultado en aproximaciones muy razonables de las verdaderas propiedades mecánicas del material a la edad de un año; generalmente se obtienen resistencias a la compresión simple equivalentes al 80 o 90% de las obtenidas con un curado convencional (Lopez, 2011)(12) por lo cual se decidió adoptarlo en este estudio.

6.4.2. Descripción de equipos de trabajo.

Cámara de curado acelerado.

Para el procedimiento de curado acelerado es necesario utilizar una cámara de curado que cumpla con ciertos requerimientos que se detallan a continuación (Lopez, 2011)(12):

- La cámara de curado deberá ser capaz de elevar su temperatura interna a una tasa uniforme de cerca de 2,9 °C/hora, la misma que deberá contar con termocuplas y sensores para el control de la temperatura que permitan mantener la temperatura interna en 90 °C.
- La cámara de curado también deberá proveer recirculación del agua durante el ensayo con el fin de evitar que se presenten gradientes de temperatura dentro de la misma y además debe constar de un cierre hermético que no permita la pérdida de vapor durante el ensayo.

Para cumplir con estos requerimientos se propuso utilizar un tanque metálico con una capacidad para 27 cilindros, provisto de resistencias eléctricas para elevar la temperatura interna a una tasa de 2,6 °C/hora y una bomba para recirculación de ½ HP. Al tanque se le incorporo dos termocuplas y un sensor automático para controlar la temperatura. Además se colocaron franjas de neopreno (similares a las utilizadas en los frigoríficos) en los bordes de la tapa del tanque para evitar la pérdida de vapor durante el ensayo.

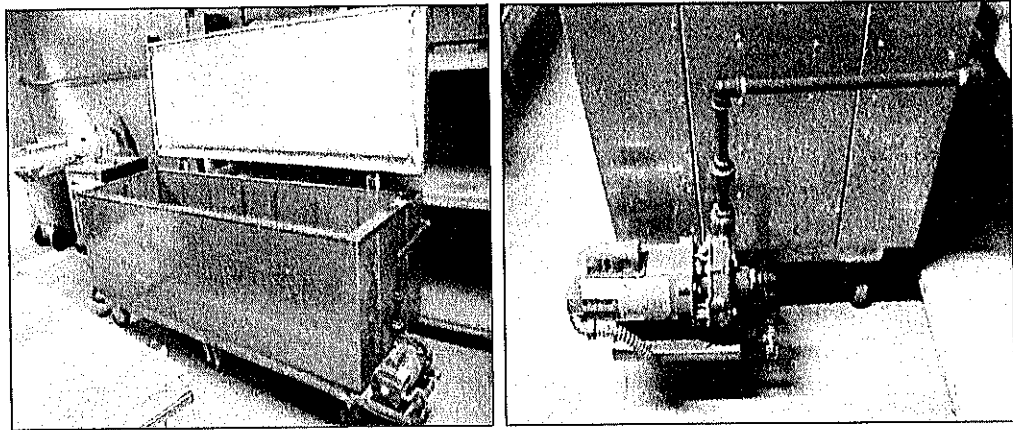


Figura 6.18 a) Cámara de Curado acelerado. b) Bomba de recirculación.

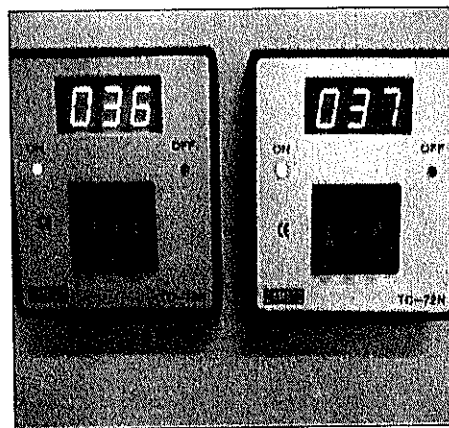


Figura 6.19 Termocuplas y sensores para el control de la temperatura.

6.4.3. Procedimiento de Curado acelerado.

Una vez elaborados los cilindros, estos se sujetaron por 3 días a un curado convencional, luego se los coloco dentro de la cámara

de curado acelerado y se procedió a llenar con agua la misma hasta cubrirlos completamente. Finalmente se cerró la cámara y se procedió con el ensayo.

En el siguiente grafico se describe el procedimiento:

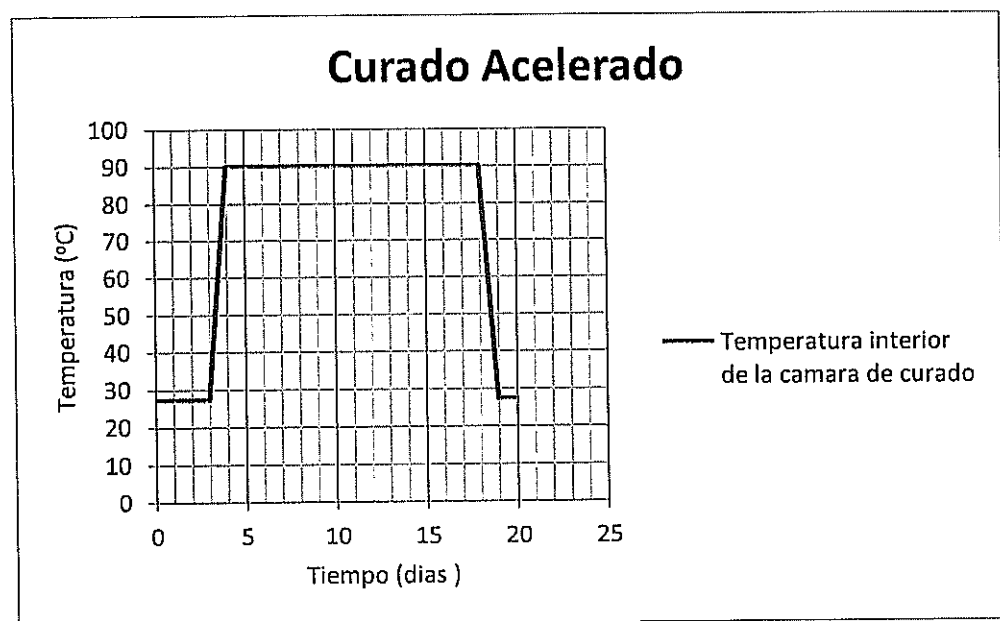


Figura 6.20 Procedimiento de curado acelerado.

Utilizando la cámara de curado acelerado descrita el procedimiento es automático. Durante el ensayo los cilindros pasan de temperatura ambiente a 90 °C en 24 horas (día 4) y se mantienen a esa temperatura durante 14 días (día 5 al 18), luego se apaga la cámara y los cilindros regresan a temperatura ambiente en 24 horas

mediante un enfriamiento natural (día 19) y finalmente se sujetan a un curado convencional por 24 horas (día 20) con lo cual quedan listos los cilindros para ser sujetos a los ensayos mecánicos previstos.

6.5. Ensayos mecánicos en las muestras.

Siendo la resistencia a la compresión simple (f'_c), la resistencia a la tracción indirecta (f_t) y el modulo de elasticidad (E_c) los parámetros que gobiernan la selección de las mezclas y dada su importancia para un buen desempeño de la estructura, es preciso evaluar correctamente estas propiedades, para esto es necesario utilizar la metodología correcta de ensayo.

En este trabajo se procedió a evaluar por cada dosificación dos cilindros mediante un ensayo de compresión simple y modulo de elasticidad y un tercer cilindro mediante un ensayo de tracción indirecta para las edades previamente establecidas en 6.4.

A continuación se detalla la metodología utilizada para la evaluación de las propiedades mecánicas del HCR.

6.5.1. Ensayo de resistencia a la compresión simple y modulo de elasticidad.

El objetivo de este ensayo es:

- ✓ Determinar simultáneamente la resistencia a la compresión simple y el modulo de elasticidad de las muestras de HCR.
- ✓ Determinar los módulos secante al 25%, 50%, 75%, 100% de la resistencia a la compresión simple.

6.5.1.1. Descripción de equipos.

Prensa.

Para este ensayo se utilizo una prensa hidráulica con una capacidad de 2000 kN.



Figura 6.21 Prensa hidráulica.

Extensómetro.

Se utilizó un extensómetro para cilindros de 300x150mm el cual tiene incorporado un dial de deformación que tiene una precisión de 0.002mm. El extensómetro se ancla al cilindro mediante tornillos puntiagudos y a medida que el cilindro se deforma este marca la deformación.

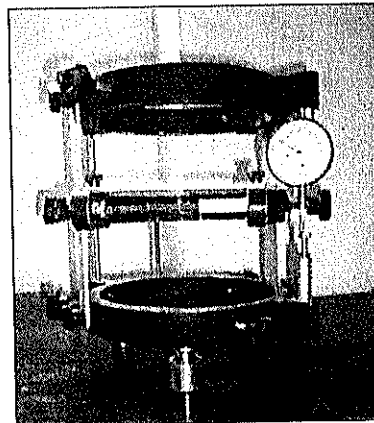


Figura 6.22 Extensómetro para cilindros de 300x150 mm.

6.5.1.2. Preparación de muestras.

Previo al ensayo se debe colocar un mortero de nivelación en la parte superior de los cilindros (refrentado) con el fin de lograr una transmisión uniforme de la carga y consecuentemente resultados reales de la resistencia a la compresión simple del material. Este mortero de alta resistencia inicial está constituido por arena natural, cemento tipo I, agua, humo de sílice, un aditivo superplastificante y un aditivo acelerante y cumple con los requisitos establecidos en la norma ASTM C 617⁴.

Luego del refrentado de los cilindros, estos deben sumergirse nuevamente en agua para lograr saturarlos completamente previo al ensayo, pues este constituye el estado más crítico de carga.

⁴ la norma ASTM C 617 describe los procedimientos para el refrentado de muestras de hormigón.

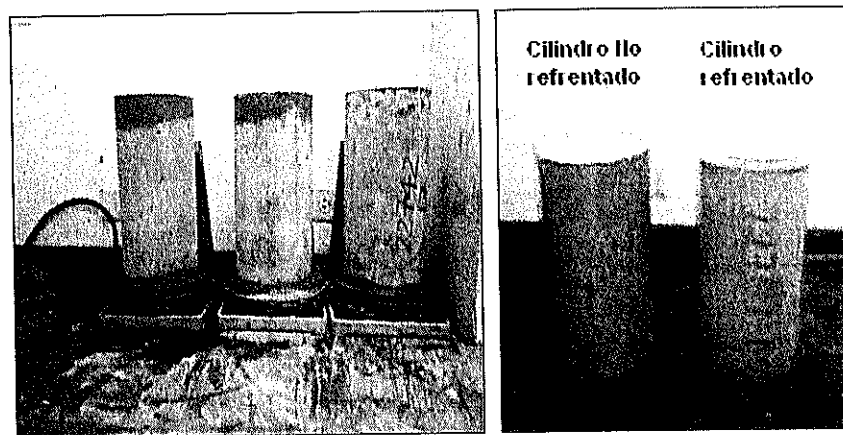


Figura 6.23 a) Cilindros en proceso de nivelación. b) Cilindros para ensayo.

6.5.1.3. Procedimiento de ensayo.

Se acopla el extensómetro al cilindro y se encera el dial de deformación, seguidamente se procede a cargar el cilindro anotando los valores de carga y deformación cada cierto intervalo de carga, con los valores de carga y deformación se construye las curvas esfuerzo vs deformación unitaria de las cuales se obtiene el modulo de elasticidad; Adicional al modulo de elasticidad se requiere conocer los módulos secantes al 25-50-75% de f'_c , para lo cual se procedió a ensayar los cilindros hasta lograr su falla; durante el ensayo las lecturas de carga y deformación se tomaron cada 5 kN al principio del ensayo y cada 2.5 kN cuando se sobrepasa el rango elástico, con lo cual

se logro construir correctamente la curva esfuerzo vs deformación unitaria. Para poder registrar adecuadamente los datos se adopto una velocidad de carga de 0.5 kN/s⁵.

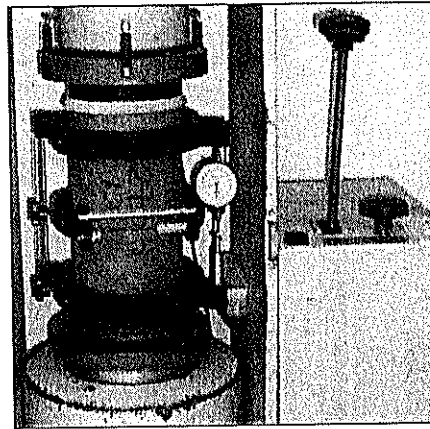


Figura 6.24 Cilindro preparado para ensayo de compresión simple y modulo de elasticidad.

La resistencia a la compresión simple se calcula mediante la siguiente ecuación⁶.

$$f'_c = 4P / \pi d^2 \quad (8.1)$$

Donde:

⁵ La norma INEN 1850 describe el procedimiento para la determinar el modulo de elasticidad estático en muestras a compresión.

⁶ La norma INEN 1573 describe el procedimiento para determinar la resistencia a la compresión simple en muestras a compresión.

P: Carga de falla (N).

d: Diámetro del cilindro (mm).

f'c: Resistencia a la compresión simple (MPa)

Para construir la curva esfuerzo vs deformación unitaria es necesario calcular para cada lectura de carga y lectura del dial los correspondientes valores de esfuerzo y deformación unitaria. El esfuerzo se calcula utilizando la ecuación 8.1 y la deformación unitaria se calcula mediante la siguiente ecuación⁷:

$$\delta = l/400 \quad (8.2)$$

Donde:

l: lectura registrada en el dial (mm).

δ : deformación unitaria.

⁷ La lectura del dial se divide para dos pues la deformación se mide en la parte central del cilindro y la distancia entre el tornillo superior e inferior es 200 mm, con lo cual se obtiene la constante 400 que se observa en la ecuación 8.2.

6.5.2. Ensayo de tracción indirecta

El objetivo de este ensayo es obtener la resistencia a la tracción indirecta de las muestras de HCR.

6.5.2.1. Descripción de equipos.

Prensa.

Para este ensayo se usa una prensa automática con una capacidad de 2000 kN. (ver figura 6.21).

Molde para ensayo de tracción indirecta.

Para transmitir la carga hacia el cilindro se usa un molde metálico, junto con dos tiras de plywood que sirven para transmitir la carga desde el molde metálico hacia el cilindro.

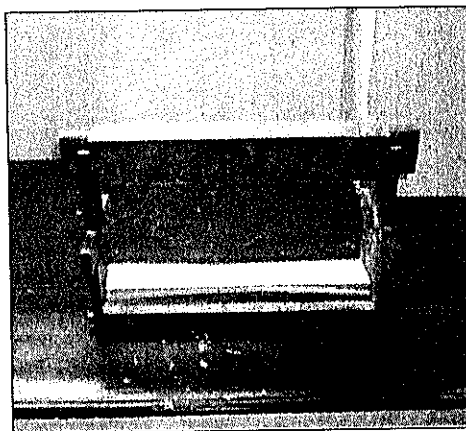


Figura 6.25 Molde para ensayo de tracción indirecta.

6.5.2.2. Preparación de muestras y procedimiento de ensayo⁸.

Luego de cumplir con el tiempo de curado los cilindros se retiraron de la piscina de curado y se procedió a colocarlos en el molde; para lograr una adecuada transmisión de carga desde el molde hacia el cilindro se utilizó tiras de madera como medio de transmisión de carga, seguidamente se coloca el cilindro en la prensa y se procedió a cargarlo a una velocidad de carga de 2.1 kN/s hasta lograr la rotura del cilindro. Finalmente utilizando los valores de carga obtenidos se calcula la resistencia a la tracción indirecta del cilindro.

⁸ La norma INEN 1845 describe el procedimiento para determinar la resistencia a la tracción indirecta en cilindros de hormigón.

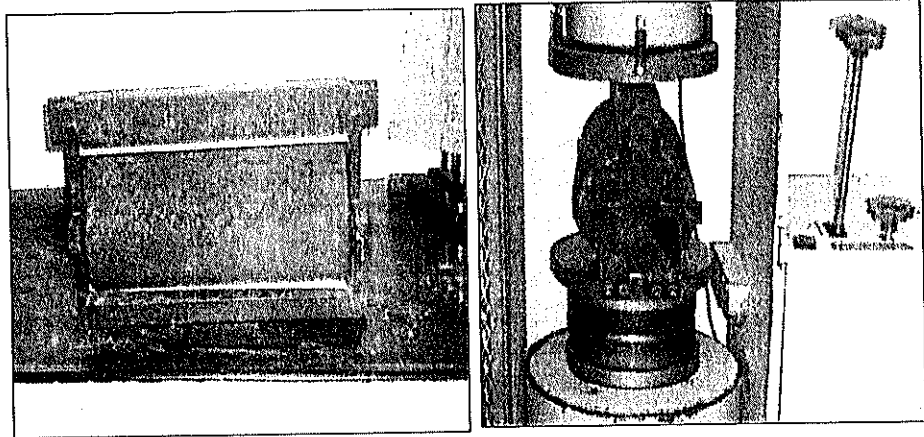


Figura 6.26 a) Cilindro preparado para ensayo de tracción indirecta. b) Cilindro en proceso de ensayo.

La resistencia a la tracción indirecta se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$f_t = 2P / \pi d h \quad (8.3)$$

Donde:

P: Carga de falla (N).

d: Diámetro del cilindro (mm).

h: Altura del cilindro (mm).

f_t : Resistencia a la tracción indirecta (MPa).

6.6. Resultados del estudio de las propiedades mecánicas del HCR.

En las siguientes tablas se muestra un resumen de los resultados obtenidos en el estudio de las propiedades mecánicas del HCR⁹.

⁹ Los resultados completos se encuentran en el apéndice B.

Tipo de cemento Contenido de cemento (Kg/m ³)	HE			
	Edad (días)	f _c (MPa)	f _t (MPa)	Ec (GPa)
		Promedio	Cilindro 3	40% f _c
75	3	6.3	0.75	3.7
	7	6.9	0,80	5.5
	14	8.5	0.97	6.8
	28	9.6	1.40	9.4
	56	11.4	1.75	12.8
	90	12.0	2.00	18.2
	180	14.5	2.34	20.2
	C. acel.	15.0	2.91	16.8
95	3	7.8	0.99	6.7
	7	9.5	1.18	9.5
	14	11.4	1.37	11.0
	28	11.7	1.55	14.9
	56	12.3	1.97	19.0
	90	14.8	2.50	22.2
	180	17.8	2.94	26.4
	C. acel.	18.2	3.31	19.8
105	3	9.0	1.00	8.5
	7	10.8	1.45	11.7
	14	12.1	1.82	13.8
	28	12.4	1.79	17.7
	56	16.4	2.30	21.0
	90	18.4	2.79	23.8
	180	21.7	3.25	26.8
	C. acel.	21.4	3.60	23.2

Tabla 6.4 Resultados obtenidos con cemento HE.

Tipo de cemento	GU				
	Contenido de cemento (Kg/m ³)	Edad (días)	f _c (MPa)	f _t (MPa)	Ec (GPa)
			Promedio	Cilindro 3	40% f _c
75	3	5.2	0.69	3.1	
	7	6.3	0.69	5.8	
	14	7.3	0.76	7.0	
	28	7.5	0.96	11.2	
	56	10.0	1.35	14.6	
	90	11.5	1.78	18.7	
	180	13.6	2.09	20.4	
	C. acel.	14.3	1.86	17.3	
95	3	5.7	1.10	5.2	
	7	8.2	1.10	8.2	
	14	10.0	1.20	11.5	
	28	10.6	1.30	14.6	
	56	12.1	1.81	18.6	
	90	13.8	2.20	22.2	
	180	17.5	2.80	23.4	
	C. acel.	17.2	2.85	19.5	
105	4	7.4	0.91	6.8	
	7	8.5	1.09	8.6	
	14	8.1	1.11	11.2	
	28	11.1	1.35	14.1	
	56	13.2	1.90	18.9	
	90	14.6	2.74	21.6	
	180	17.1	3.24	24.9	
	C. acel.	17.6	3.15	18.7	

Tabla 6.5 Resultados obtenidos con cemento GU.

Tipo de cemento	MH			
	Contenido de cemento (Kg/m ³)	Edad (días)	f _c (MPa)	Ec (GPa)
Promedio			Cilindro 3	40% f _c
75	3	2.8	0.42	1.3
	8	3.8	0.57	1.9
	14	5.2	0.67	3.9
	28	6.4	1.03	8.0
	56	7.2	1.15	12.1
	90	8.8	0.97	12.4
	180	9.0	1.52	12.2
	C. acel.	12.9	1.90	13.0
95	3	4.5	0.47	1.5
	7	4.6	0.56	2.7
	14	5.6	0.65	5.4
	28	6.8	0.84	8.7
	56	9.2	1.22	13.6
	90	10.7	1.74	15.0
	180	11.8	1.73	20.7
	C. acel.	13.6	2.20	15.0

Tabla 6.6 Resultados obtenidos con cemento MH.

CAPITULO 7

7. PROPIEDADES TÉRMICAS DEL HCR.

Este capítulo describe los procedimientos y resultados de los ensayos realizados para determinar el coeficiente de dilatación térmica y la conductividad térmica del HCR.

Conocer estas propiedades del HCR permitirá a los diseñadores modelar el comportamiento térmico de la presa.

7.1. Dosificación propuesta.

A continuación se muestra la granulometría propuesta para el estudio de las propiedades térmicas del HCR, la cual se enmarco dentro de los límites granulométricos del HCR para pavimentos debido a que en los ensayos se trabaja con probetas de 100x100x285mm y es necesario que el TMA no exceda la tercera parte de la mínima dimensión del molde. Sin embargo en el diseño se mantuvo las mismas proporciones de Pasta-Agregado (Al volumen) que el diseño original.

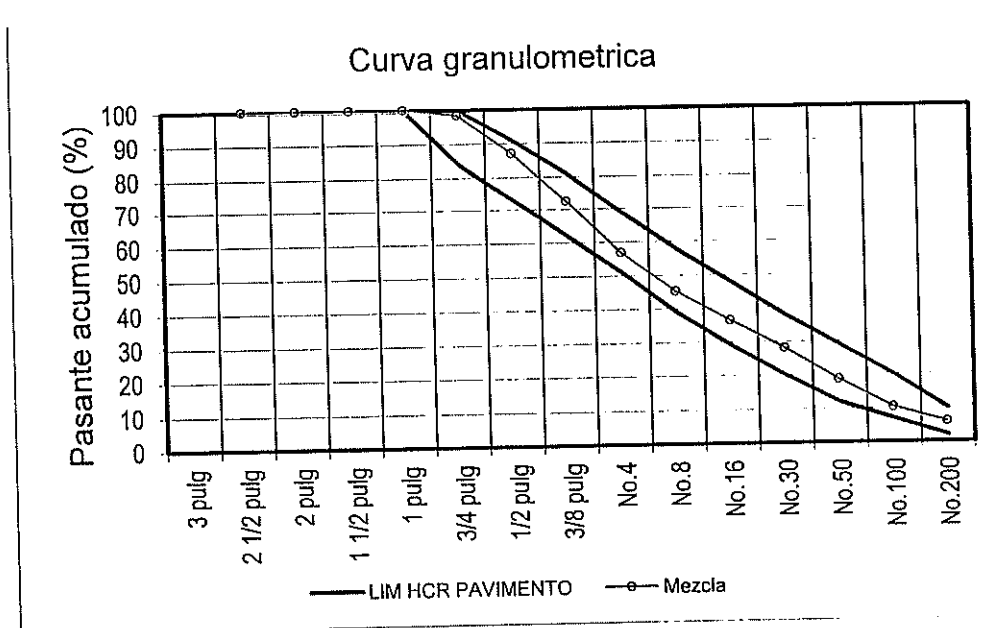


Figura 7.1 Curva granulométrica propuesta para estudio de las propiedades térmica del HCR.

Utilizando la granulometría mostrada en la figura 7.1 se propone la siguiente dosificación.

Tipo de cemento	HE	
Dosificación	kg/m ³	Contenido de agregados
Cemento	95	-
Agua	122	-
Piedra TM 38mm	-	-
Piedra TM 19 mm	782	35%
Arena triturada	893	40%
Arena natural	536	24%
Filler	22	1%

Tabla 7.1 Dosificación propuesta para estudio de las propiedades térmicas del HCR.

7.2. Descripción de equipos de trabajo.

Balanza.

Para pesar los materiales se utilizó una balanza de capacidad de 50 kg y una precisión de ± 20 gramos.

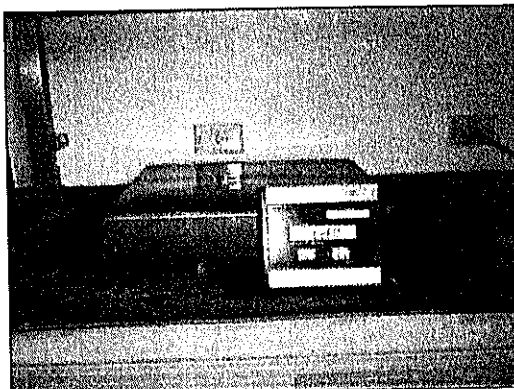


Figura 7.2 Balanza.

Mezcladora de aspas.

Para el proceso de mezclado se utilizó una mezcladora de aspas con una capacidad de 40 dm³.

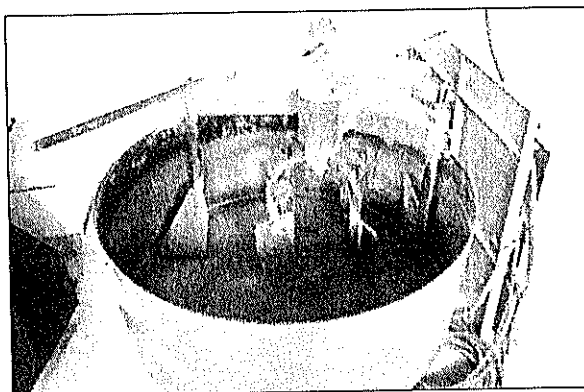


Figura 7.3 Mezcladora de aspas.

Olla de Washington.

Para medir la densidad y el contenido de aire en la mezcla se utilizó la Olla de Washington.

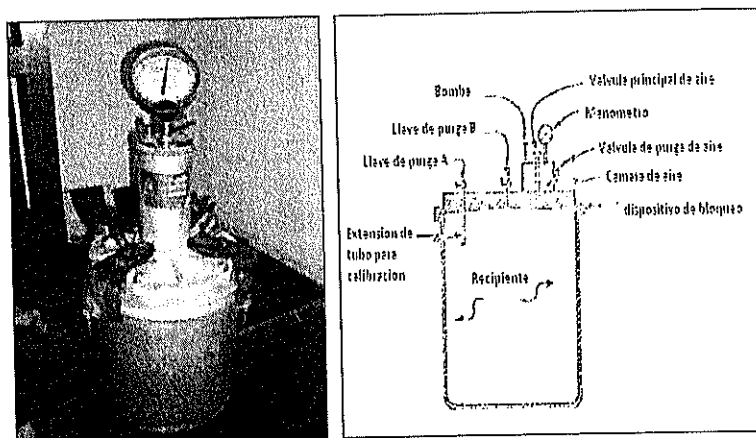


Figura 7.4 a) Olla de Washington b) Esquema de la olla de Washington.

Moldes para probetas y molde para vigas.

Se utilizaron moldes de acero para la elaboración de las probetas para el ensayo de coeficiente de dilatación térmica. Para la elaboración de la viga para el ensayo de conductividad térmica se utilizó un molde de acero de 500x150x150 mm.

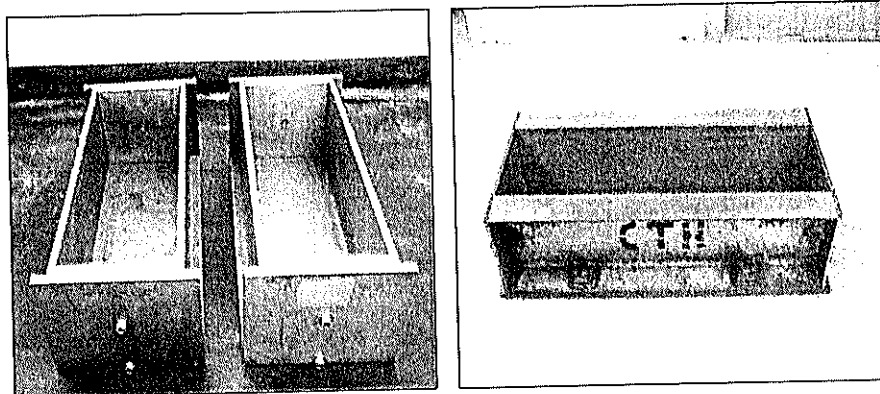


Figura 7.5 a) Moldes de acero para probetas. b) Molde de acero para vigas.

Martillo Kango y martillo Hilti.

El martillo Kango 638 y dos apisonadores rectangulares de 100x50 mm y 150x100 mm se utilizaron para la elaboración de las probetas. Para la elaboración de la viga se utilizó el martillo Hilti modelo TE 805 y un apisonador rectangular de 150x100 mm.

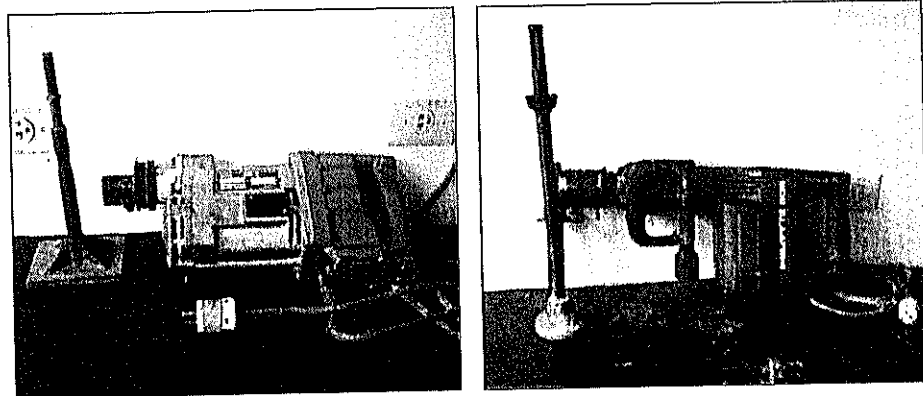


Figura 7.6 a) Martillo Kango y apisonador rectangular. b) Martillo Hilti y apisonador circular.

Caladora de núcleos y cortadora para hormigón.

Se utilizó la caladora y la cortadora para hormigón para obtener de la viga los discos necesarios para el ensayo de conductividad térmica.

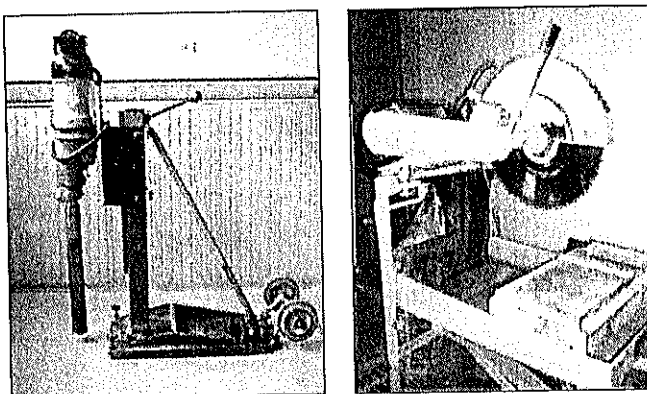


Figura 7.7 a) Caladora de núcleos. b) Cortadora para hormigón.

Horno.

Para elevar la temperatura de las probetas se utilizó un horno de convección.

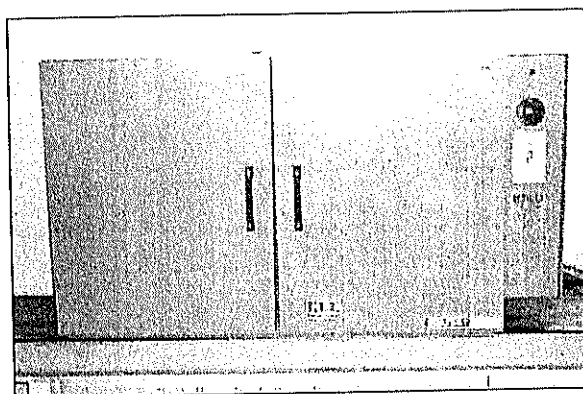


Figura 7.8 Horno de convección.

Recipiente térmico.

Se utilizó un recipiente térmico para colocar las probetas previo a elevar la temperatura de las mismas. Este recipiente se caracteriza por resistir altas temperaturas y está diseñado para conservar el calor en su interior.

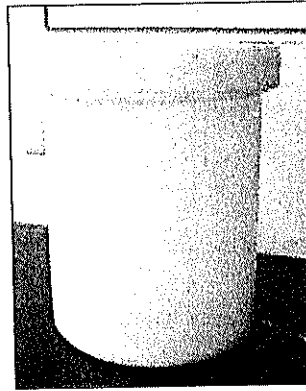


Figura 7.9 Recipiente térmico.

Termocupla.

Para medir los cambios de temperatura en las probetas se utilizó una termocupla de ± 0.1 °C de precisión.

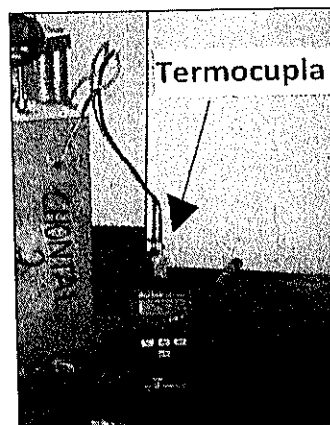


Figura 7.10 Termocupla de 0.1° C de precisión.

Lector de longitud.

Mediante el lector de longitud se midió la longitud de las probetas con una precisión de una milésima de milímetro.



Figura 7.11 Lector de longitud.

Equipo para ensayo de conductividad térmica.

Para el ensayo de conductividad térmica se utilizó un equipo para ensayo de conductividad marca CENCO y un galvanómetro estándar.

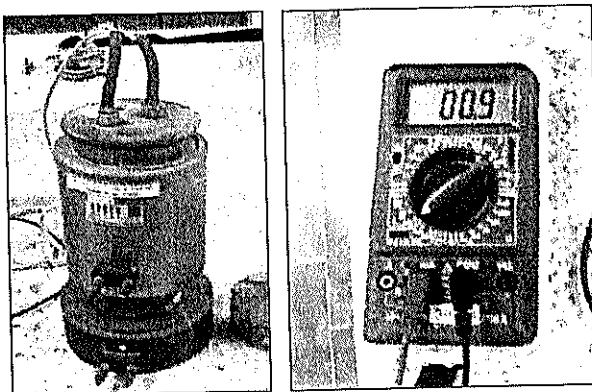


Figura 7.12 Equipos para ensayo. a) Buques del equipo de conductividad. b) Galvanómetro.

7.3. Ensayo de coeficiente de dilatación térmica.

Todos los cuerpos sufren variaciones en su volumen cuando son sometidos a cambios de temperatura constituyendo esto una ley natural, así se define el coeficiente de dilatación térmica como el coeficiente que relaciona las variaciones del volumen de un cuerpo con las variaciones de temperatura que producen estos cambios. Para una barra esta ley se puede escribir de la siguiente manera (17)¹:

$$\Delta L = \alpha L \Delta T \quad (7.1)$$

Donde:

ΔL : variación de la longitud del elemento producido por la variación de temperatura ΔT (m).

α : coeficiente de dilatación térmica ($1/^\circ\text{C}$).

L : longitud del elemento a la temperatura inicial (m).

ΔT : variación en la temperatura que ha sufrido el elemento ($^\circ\text{C}$).

Utilizando la ecuación 7.1 se puede determinar el coeficiente de dilatación térmica del HCR a través de una grafica de $\Delta L/L$ vs ΔT , la

¹ Sears, Zemansky, Young. *Física Universitaria*. Editorial Fondo Educativo Interamericano (1986).

cual se puede obtener midiendo los cambios de longitud producidos por las variaciones de temperatura en probetas construidas para este fin. Partiendo de esta base teórica se propuso un procedimiento de ensayo el cual es descrito a continuación:

Se propuso elaborar dos probetas de 100x100x285mm y curarlas bajo agua por 7 días para luego proceder a elevar su temperatura hasta 70°C por 24 horas y finalmente dejar que estas se enfríen, midiendo al mismo tiempo para varias temperaturas la longitud de las mismas mediante un lector de longitud de alta precisión. En las siguientes secciones se detalla paso a paso el procedimiento ensayo.

7.3.1. Preparación de muestras.

En la preparación de la mezclas se utilizan los mismos procedimientos descritos en el capítulo 5, sin embargo en este caso solo se requiere preparar dos probetas para el ensayo. Para este tipo de probetas es suficiente compactar el material en dos capas para lo cual se utilizo el martillo Kango con el apisonador de 100x50 mm. y para dar acabado superficial a las probetas se utilizo el apisonador de 150x100 mm. Para poder medir la

temperatura de las probetas se conecto una termocupla como se muestra en la figura.

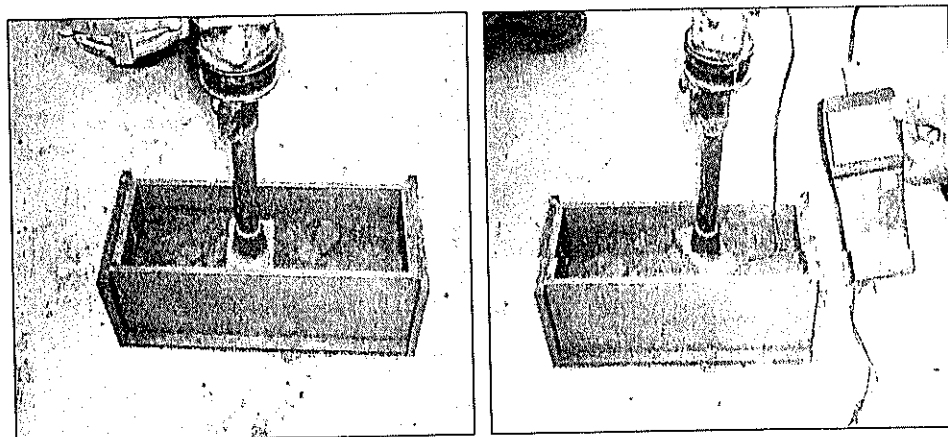


Figura 7.13 a) Elaboración de probeta. b) Colocación de termocupla.

Luego de elaboradas las probetas y para que conserven su humedad se cubrieron con un plástico por 24 horas, después de esto se procedió a desmoldarlas y colocarlas dentro de la piscina de curado por 7 días.

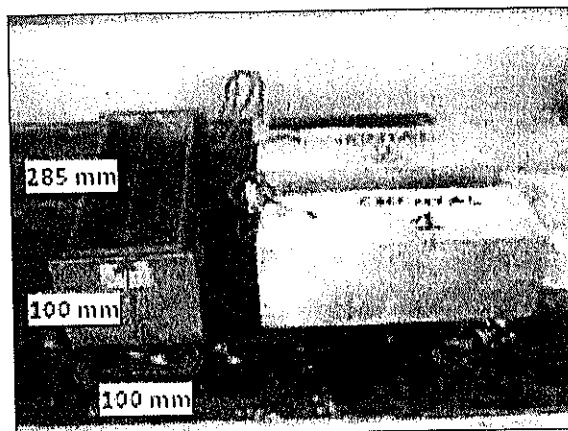


Figura 7.14 Probetas para ensayo.

7.3.2. Parámetros a medir.

Previo a la elaboración de las probetas se midió la densidad y contenido de aire de la mezcla con el propósito de determinar el grado de compactación que deben alcanzar las probetas.

7.3.3. Procedimiento de ensayo.

Después de los 7 días de curado, las probetas se retiraron de la piscina de curado, se registro su temperatura y longitud utilizando la termocupla y el lector de longitud² respectivamente, luego estas se colocaron dentro de un recipiente térmico lleno de agua para

²El uso del lector de longitud se encuentra regulado por la norma ASTM C 490.

finalmente colocarlas en el horno por 24 horas a una temperatura de 70° C.

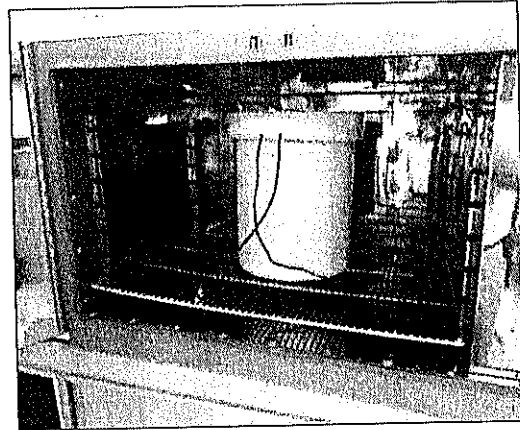


Figura 7.15 Colocación de las probetas en el horno.

Después de las 24 horas en el horno las probetas fueron removidas y se registró nuevamente su longitud y temperatura, inmediatamente estas se volvieron a sumergir en el recipiente térmico hasta que su temperatura disminuyó cerca de 5° C. luego de lo cual se volvió a medir la temperatura y longitud. El procedimiento se repitió hasta que las probetas alcanzaron la temperatura ambiente. Finalmente con los datos obtenidos se construyó la gráfica $\Delta L/L$ vs ΔT en la cual la pendiente de la recta es el coeficiente de dilatación térmica.

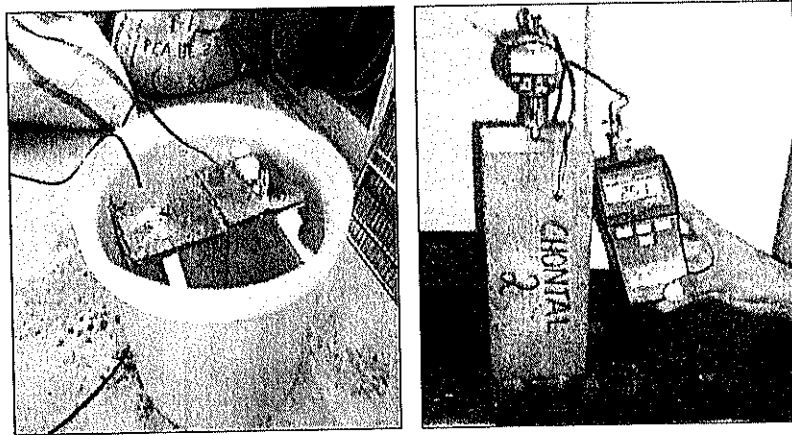


Figura 7.16 Procedimiento de ensayo. a) Enfriamiento de probetas. b) Medición de la temperatura y longitud de las probetas.

7.4. Ensayo de conductividad térmica.

Al existir un gradiente de temperatura entre dos puntos de un mismo cuerpo, se produce un flujo de calor desde el punto de mayor temperatura hacia el punto de más baja temperatura, lo cual es una ley natural. La conductividad térmica se define como el coeficiente que relaciona el flujo de calor con la diferencia de temperatura que produce este flujo. Para una barra esta ley se puede escribir de la siguiente manera³:

$$\Delta Q/\Delta t = kA\Delta T/L \quad (7.2)$$

Donde:

$\Delta Q/\Delta t$: Flujo de calor desde la cara a mayor temperatura hacia la cara a menor temperatura (J/s).

k: Conductividad térmica del material (W/mT).

A: Área de la sección transversal de la barra a través de la cual ocurre el flujo de calor (m²).

$\Delta T/L$: Gradiente de temperatura existente entre la cara de mayor temperatura y la cara de menor temperatura (T/m).

³ Sears, Zemansky, Young. *Física Universitaria*. Editorial Fondo Educativo Interamericano (1986).

Para medir la conductividad térmica del HCR se propone el siguiente procedimiento, el cual está basado en el principio de que la resistencia de un conductor al paso de la corriente aumenta conforme aumenta la temperatura de este. En el siguiente esquema se detalla el procedimiento propuesto para determinar la conductividad térmica del HCR.

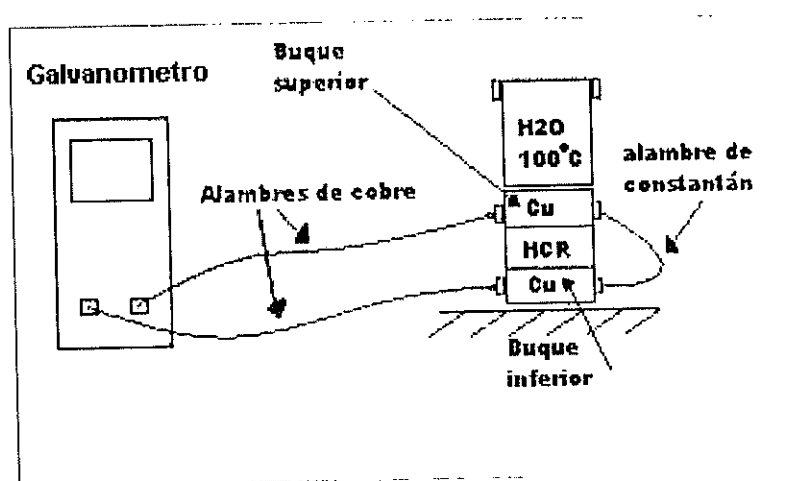


Figura 7.17 Representación grafica del ensayo de conductividad térmica.

En el esquema se muestra un galvanómetro que hace pasar una corriente a través del buque superior, pasando por el alambre de constantán y luego por el buque inferior para finalmente regresar al galvanómetro. Al mismo tiempo se observa que el buque superior está a 100°C debido al recipiente con agua que se encuentra sobre él, lo que trae como consecuencia un gradiente de temperatura entre los

buques, por lo tanto el calor se transferirá desde el buque superior hacia el buque inferior pasando por la muestra de HCR. Conforme el calor fluye hacia el buque inferior aumentará la temperatura de este, produciendo que la resistencia al paso de la corriente del buque inferior aumente, esto producirá variaciones en la corriente que circula a través del circuito, las cuales son detectadas por el galvanómetro. La velocidad con que cambia la corriente dependerá de la velocidad con la que cambia la temperatura del buque inferior, la cual depende al mismo tiempo de la velocidad con la cual fluye el calor a través de la muestra de HCR, es decir depende de la conductividad térmica de la muestra de HCR.

La función que describe el comportamiento de la corriente que pasa a través del circuito en función del tiempo es la siguiente (Sargent-Welch, 2011)(14):

$$i(t) = i_0 10^{-(kA/2.303Mc)t} \quad (7.3)$$

Donde:

i_0 : Corriente inicial que pasa por el circuito (Amp).

l : Espesor de la muestra de HCR (m).

M : Masa de la muestra de HCR (kg).

c: Calor específico del cobre (J/kg K).

k: Conductividad térmica del HCR (W/mT).

A: Área de la sección transversal de la muestra de HCR (m²).

t: Tiempo al cual se desea conocer la corriente en el circuito (s).

La ecuación 7.3 se puede escribir de la siguiente manera:

$$\log(i) = m t + \log(i_0) \quad (7.4)$$

Donde:

$$m = -kA/2.303IMc.$$

log: logaritmo en base 10.

Basándose en esta ecuación se puede determinar la conductividad térmica, construyendo una gráfica $\log(i)$ vs t , la cual se obtiene midiendo los tiempos necesarios para que cambie los valores de la corriente que circula a través del circuito.

Para seguir el procedimiento arriba descrito es necesario preparar las muestras adecuadas para este ensayo. Para esto se propuso preparar muestras en forma de discos de 100 mm de diámetro y 40 mm de

altura, obtenidas de núcleos calando en una viga construida para este propósito. El procedimiento describe detalladamente en las siguientes secciones.

7.4.1. Preparación de muestras.

Para la preparación de las mezclas se siguen los mismos procedimientos descritos en el capítulo 5, sin embargo en este caso se elaboro un viga de 150x150x500 mm. la cual fue elaborada en dos capas las que se compactaron con el martillo Hilti y el apisonador de 150x100 mm hasta lograr la máxima compactación del material.

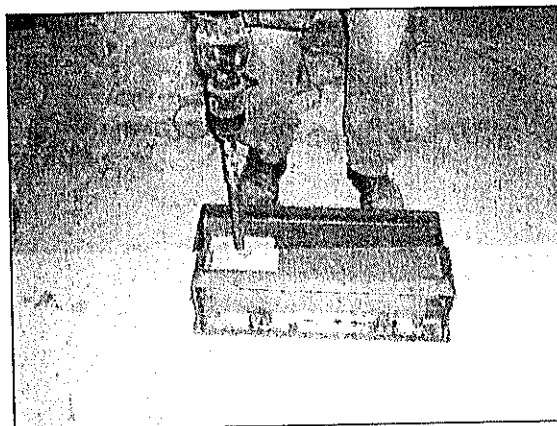


Figura 7.18 Elaboración de viga.

Luego de elaborada la viga, esta fue cubierta con un plástico por 24 horas y luego fue desmoldada y sumergida en la piscina de curado por 7 días, después de este tiempo se retiro la viga de la piscina de curado para proceder a calar tres núcleos, los cuales fueron cortados a 40 mm de altura, obteniéndose así los discos necesarios para el ensayo. Finalmente los discos fueron secados en el horno por 24 horas.



Figura 7.19 a) Calado de núcleos en la viga. b) Corte de núcleos.

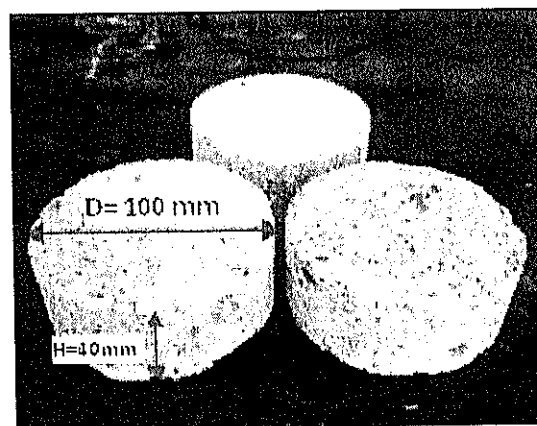


Figura 7.20 Discos para ensayo de conductividad térmica.

7.4.2. Procedimiento de ensayo.

Los discos secados en el horno y a temperatura ambiente fueron colocados entre los buques e inmediatamente se conecto el buque superior con el buque inferior utilizando el alambre de constantán y los cables del galvanómetro al buque superior e inferior completando de esta manera el circuito, luego se procedió a calentar el buque superior mediante un calentador de inmersión. Después de esto se tomo la lectura inicial del galvanómetro al tiempo cero y se espero hasta que las lecturas cambien anotando estas lecturas y el tiempo al cual se dio el cambio de lectura. Finalmente con los datos se construyo la grafica $\log(i)$ vs t , cuya pendiente se iguala a la pendiente de la ecuación 7.4 para obtener la conductividad térmica del HCR.

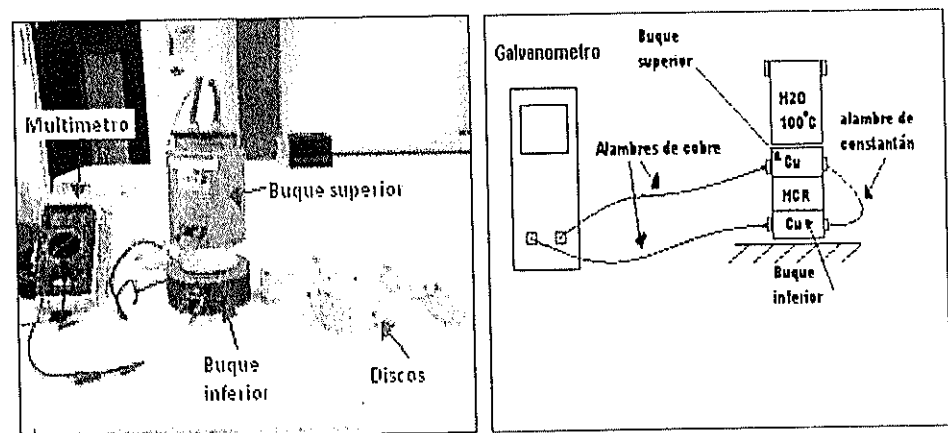


Figura 7.21 Procedimiento de ensayo. a) disco en proceso de ensayo. b) esquema de ensayo.

7.5. Resultados del estudio de las propiedades térmicas del HCR.

A continuación se muestra la densidad y contenido de aire obtenidos en la mezcla.

Densidad de la mezcla	2455 kg/m ³
Contenido de aire	1,8%

Tabla 7.2 Parámetros medidos en la mezcla.

7.5.1. Resultados del ensayo de coeficiente de dilatación térmica.

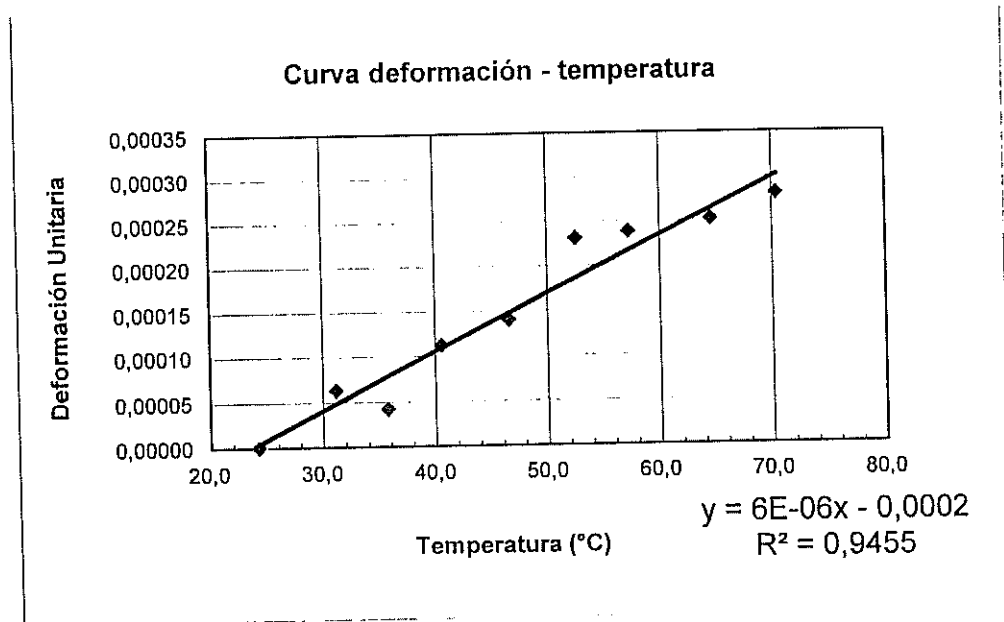


Figura 7.22 Resultados de ensayo de coeficiente de dilatación térmica-

Probeta uno.

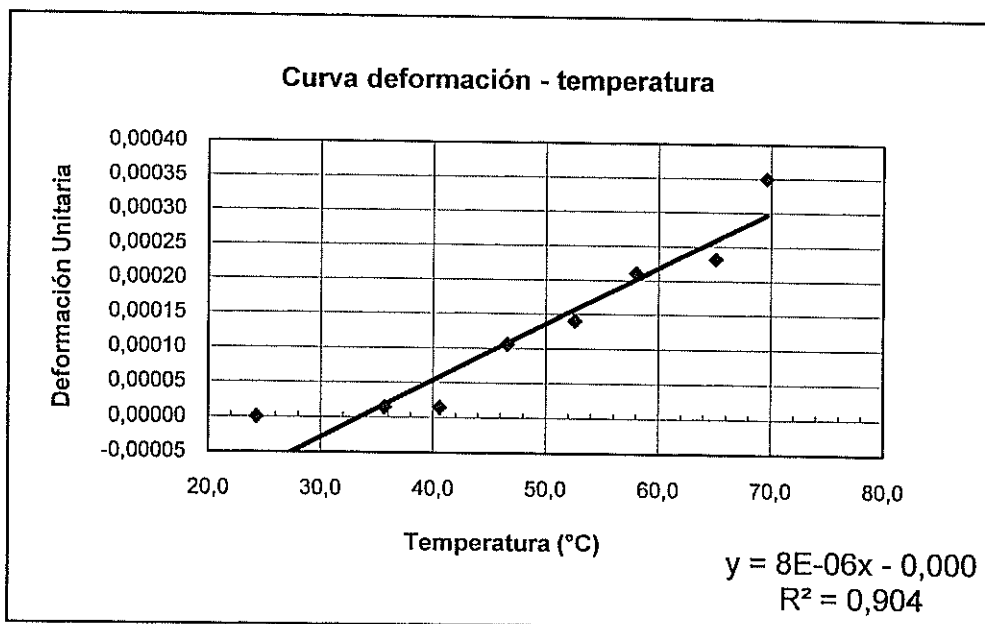


Figura 7.23 Resultados de ensayo de coeficiente de dilatación térmica-Prueba dos.

De las gráficas mostradas se determina que el coeficiente de dilatación térmica del HCR es:

	Coeficiente de dilatación térmica (1/°C)
Prueba 1	6×10^{-6}
Prueba 2	8×10^{-6}

Tabla 7.3 Coeficiente de dilatación térmica del HCR⁴.

⁴Los coeficientes de dilatación térmica de la tabla 11.3 posteriormente fueron corroborados con ensayos a 90 días.

7.5.2. Resultados del ensayo de conductividad térmica del HCR.

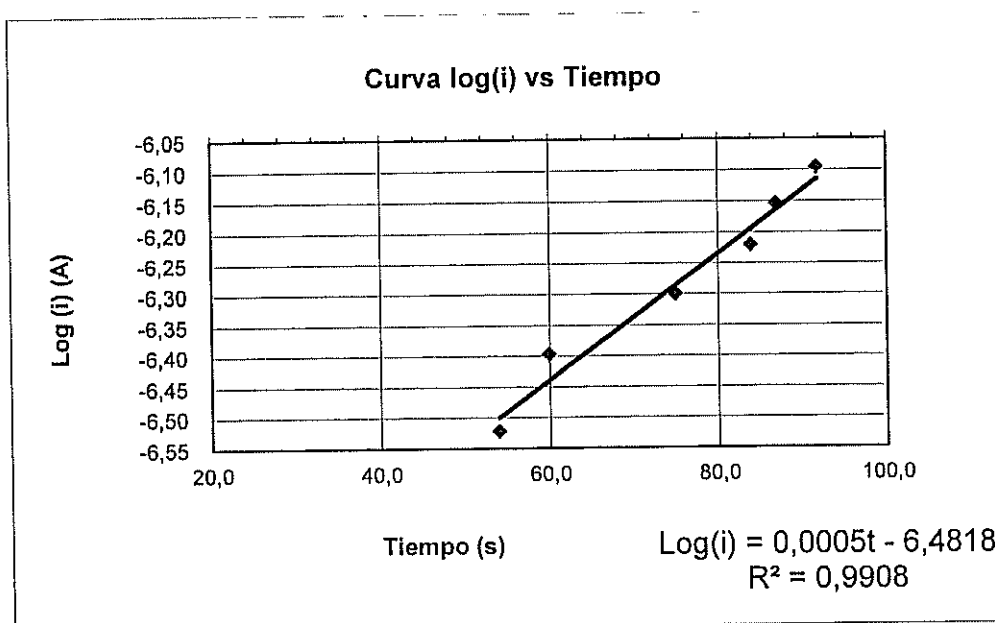


Figura 7.24 Resultados de ensayo de conductividad térmica- Disco uno.

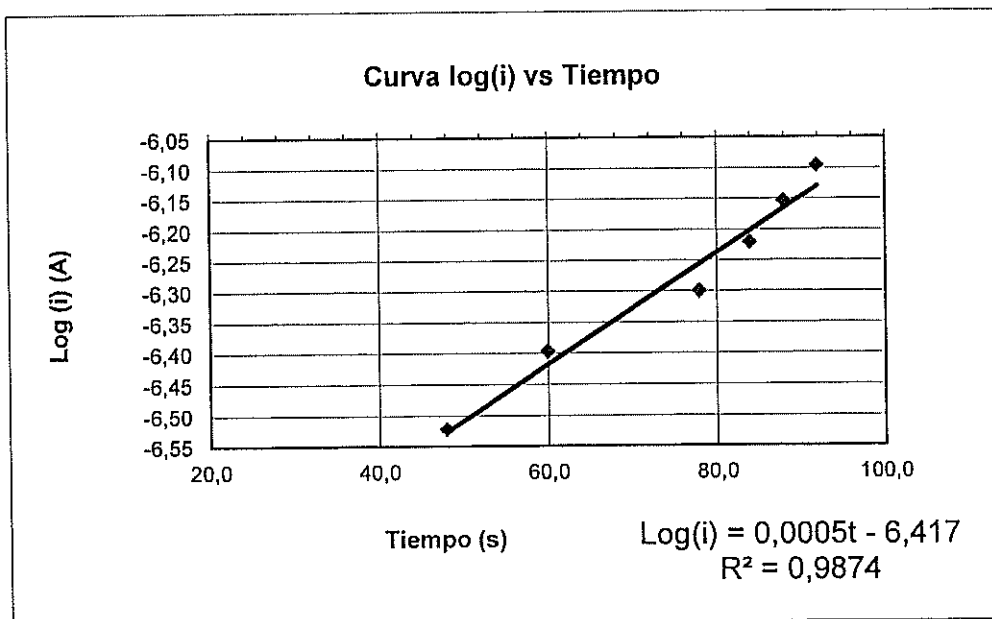


Figura 7.25 Resultados de ensayo de conductividad termica- Discos.

De las graficas mostradas se determina que la conductividad térmica del HCR es:

	Conductividad térmica (J/s m °C)
Cilindro 1	1.79
Cilindro 2	1.71

Tabla 7.4 Conductividad térmica del HCR.

CAPITULO 8

8. TIEMPO DE TRABAJABILIDAD DEL HCR.

En el proceso constructivo de la presa, la compactación del material no se da inmediatamente después de su mezclado, pues es necesario un tiempo para su transportación desde la planta y su posterior colocación en el lugar de trabajo, el cual afectara el comportamiento del material en estado fresco y endurecido, debido principalmente a la perdida de humedad que sufre la mezcla y a las reacción químicas asociadas con el cemento (fraguado).

Para prever cualquier inconveniente que se pueda presentar debido a este retraso de tiempo se propuso estudiar el comportamiento del material en función de la diferencia de tiempo existente entre el mezclado y la

compactación del material. El procedimiento propuesto se detalla a continuación:

Se propuso preparar dos mezcla utilizando los cemento HE y GU respectivamente con un contenido de cemento de 95 kg/m^3 para luego elaborar cilindros cada 35 minutos aproximadamente hasta completar un tiempo total de 6:50 horas con el objetivo de simular el retraso de tiempo entre el mezclado y la compactación del material. Para poder evaluar los resultados obtenidos se propuso someter los cilindros a un curado convencional durante 7 días y luego determinar su resistencia a la compresión simple.

8.1. Dosificaciones propuestas.

A continuación se muestran las dosificaciones propuestas para el estudio del tiempo de trabajabilidad del HCR.

Tipo de cemento	HE	
Dosificación	kg/m³	Contenido de agregados
Cemento	95	-
Agua	122	-
Piedra TM 38mm	850	38%
Piedra TM 19 mm	358	16%
Arena triturada	626	28%
Arena natural	370	16,5%
Filler	34	1,5%
Densidad	2540	-
Contenido de aire (%)	1	-

a) Cemento HE.

Tipo de cemento	GU	
Dosificación	kg/m³	Contenido de agregados
Cemento	95	-
Agua	122	-
Piedra TM 38mm	850	38%
Piedra TM 19 mm	358	16%
Arena triturada	626	28%
Arena natural	370	16,5%
Filler	34	1,5%
Densidad	2550	-
Contenido de aire (%)	0,9	-

b) Cemento GU.

Tabla 8.1 Dosificaciones propuestas para estudio de tiempo de trabajabilidad.

8.2. Descripción de equipos de trabajo.

Martillo Hilti.

Se utilizó un martillo Hilti modelo TE 805 con una frecuencia de 33.33 Hz bajo carga y un apisonador circular de diámetro 75 mm.

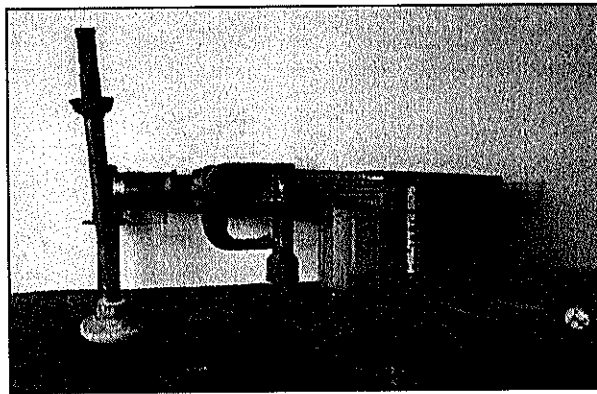


Figura 8.1 Martillo Hilti y apisonador circular.

Mezcladora.

Para el proceso de mezclado del HCR se utilizó una mezcladora de artesa con una capacidad de 45 dm³.

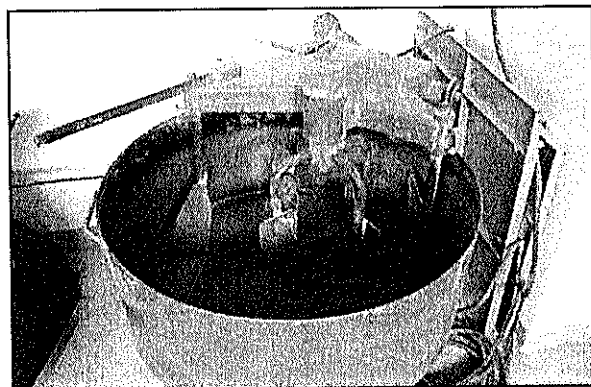


Figura 8.2 Mezcladora tipo artesa.

Moldes de acero.

Para la elaboración de los cilindros se utiliza moldes de acero con altura y diámetro interno de 300mm y 150mm respectivamente.

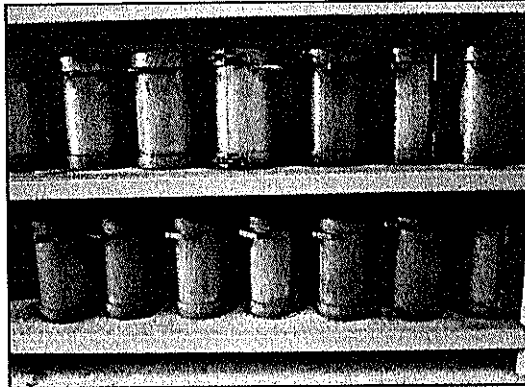


Figura 8.3 Cilindros de 300x150mm.

Balanzas.

Para pesar los materiales se utilizo una balanza con una capacidad de 150 kg y una precisión de ± 50 gramos.

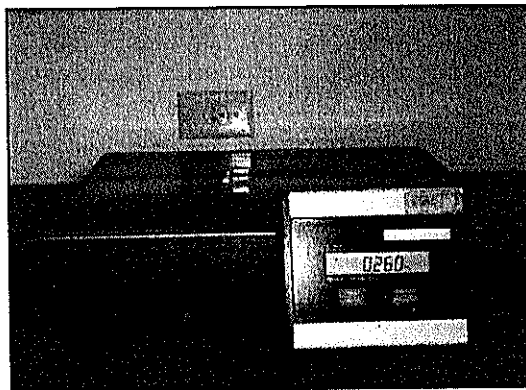


Figura 8.4 Balanza.

Discos de madera, collarines y tamiz No 4.

Los discos de madera, collarines y tamiz No 4 se utilizaron para dar acabado a la superficie de los cilindros.



Figura 8.5 Discos de madera, collarines y tamiz.

8.3. Preparación de muestras.

Una vez establecidas las dosificaciones de trabajo se procedió a la preparación de las mezclas. Para elaborar los cilindros necesarios para este estudio se requieren 70 dm^3 de HCR los cuales se obtuvieron de dos porciones de 35 dm^3 debido a que no se cuenta con la mezcladora de la capacidad adecuada. Para el mezclado del material se siguieron los mismos procedimientos descritos en el capítulo 5.

Finalizado el proceso de mezclado se procedió a elaborar los cilindros requeridos utilizando los mismos procedimientos que se describen en el capítulo 6 es decir elaborar los cilindros en tres capas de 100mm de espesor cada una utilizando el martillo Hilti para la compactación del material. La elaboración de los cilindros tuvo un tiempo aproximado de 5 minutos; debido a que las mezclas se prepararon en dos partes, se elaboraron 6 cilindros con la primera parte y 6 cilindros en la segunda.



Figura 8.6 a) Elaboración de muestras. b) Cilindros terminados.

Luego de elaborados los cilindros estos se cubrieron con un plástico por 24 horas para evitar la pérdida de humedad, transcurrido este tiempo se procedió a desmoldar los seis primeros cilindros e inmediatamente se los introdujo en la piscina de curado; los cilindros restantes no se desmoldaron hasta que cumplieron 36 horas, luego de

lo cual se procedió a desmoldarlos y colocarlos en la piscina de curado para someterlos a un curado convencional durante 7 días.



Figura 8.7 Cilindros dentro de la piscina de curado.

8.4. Parámetros a medir.

Durante la preparación de la mezcla y la elaboración de los cilindros se midieron la temperatura y humedad del ambiente pues estos factores afectan directamente el tiempo de trabajabilidad de la mezcla. Sin embargo existen otros factores que afectan la trabajabilidad del material como son la cantidad de agua (sobre el estado SSS) que interviene en la preparación de las mezclas del HCR, la cual se convierte en un parámetro crítico que influye en el tiempo máximo hasta el cual el HCR no pierda cohesión ni disminuye su resistencia mecánica; otros factores que afectan la trabajabilidad como son el

tamaño del agregado, la forma y textura de los agregados, la cantidad de finos presentes en la mezcla y energía de compactación.

8.5. Ensayos mecánicos en las muestras.

Considerando que la resistencia a la compresión simple es la principal propiedad mecánica que se pueden ver afectadas por la reducción de la trabajabilidad del material se propuso utilizarlas como una medida de la reducción de la trabajabilidad del material.

8.6. Resultados del estudio de tiempo del trabajabilidad.

En la siguiente tabla se muestra las condiciones de temperatura y humedad bajo las cuales se llevo a cabo el estudio.

Cemento	Temperatura (°C)	Humedad (%)
GU	25	89
HE	23	94

Tabla 8.2 Temperatura y humedad de trabajo.

En la siguiente tabla se muestra los valores de resistencia a la compresión simple obtenidos en el estudio.

Tiempo(horas)	f'c (MPa)	
	Cemento GU	Cemento HE
0,0	5,1	6,2
0,7	5,5	7,0
1,3	5,0	6,7
2,0	5,0	7,0
2,7	5,2	7,5
3,3	4,9	7,4
4,0	4,8	5,9
4,7	5,0	6,0
5,3	5,2	6,5
5,8	4,6	6,9
6,3	4,2	5,7
6,8	3,7	5,9

Tabla 8.3 Resistencia a la compresión simple.

CAPITULO 9

9. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN EL HCR.

En este capítulo se presentan los procedimientos y resultados obtenidos de dos ensayos no destructivos realizados al HCR; el ensayo de pulso ultrasónico se realizó a todas las muestras previas a someterlas a los correspondientes ensayos mecánicos, mientras que para evaluar la permeabilidad y durabilidad del HCR se utilizó el equipo de permeabilidad Torrent.

A continuación se describen cada uno de estos ensayos.

9.1. Ensayo de pulso ultrasónico.

El ensayo de pulso ultrasónico es un ensayo no destructivo que permite detectar las fisuras y vacíos existentes dentro de la estructura del hormigón además de permitir evaluar su homogeneidad; los resultados obtenidos de este ensayo se pueden correlacionar con las propiedades mecánicas del material, lo que permite estimar estas propiedades sin necesidad de realizar ensayos destructivos. Estas cualidades hacen del ensayo de velocidad de pulso ultrasónico una herramienta sumamente importante para el estudio de hormigón por lo cual se adoptó para el estudio del HCR.

En la siguiente tabla se muestra la clasificación de la calidad del hormigón convencional por medio de la velocidad de onda propuesta por Leslie y Cheesman.

Velocidad de onda longitudinal (m/s)	Condiciones del hormigón
Más de 4570	Excelente
De 3050 a 4570	Buena
De 3050 a 3650	Regular a dudosa
De 2130 a 3050	Pobre
Menos de 2130	Muy pobre

Tabla 9.1. Clasificación de la calidad del hormigón propuesta por

Leslie y Cheesman (18)¹.

¹ Tecnología del Hormigón – Grupo de Hormigón - Ingeniería en Construcción UCV.

En la figura 9.1 se muestra como afectan las fisuras a la velocidad de la onda cuando se realiza el ensayo de pulso ultrasónico.²

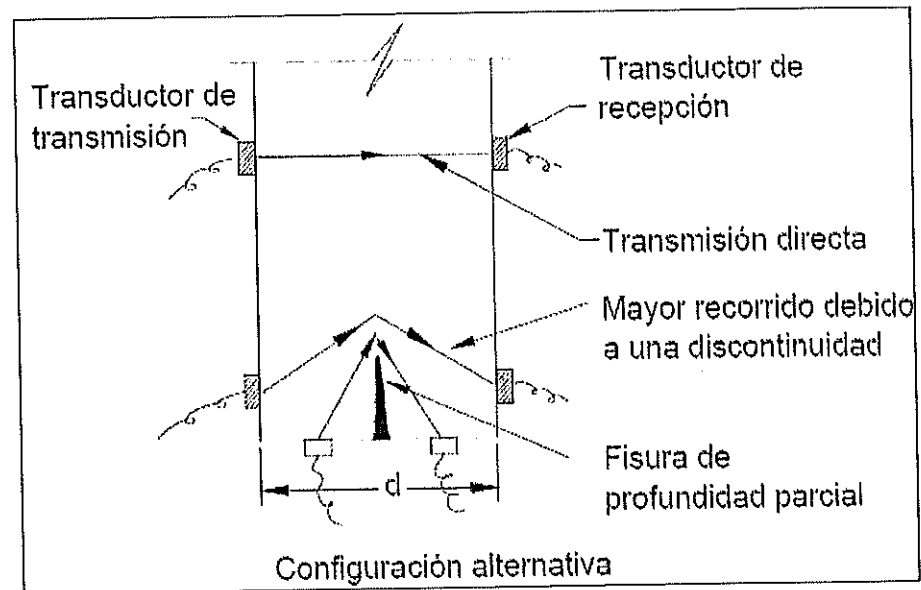


Figura 9.1 Cambio en la longitud de recorrido de la onda.

Por lo general en HCR de bajo contenido de cemento la mayor proporción de vacíos se presenta en la interfaz existente entre las capas de material compactado.

² Información obtenida en ACI 224 R 01 control de fisuras en el hormigón.

9.1.1. Objetivo del ensayo.

- ✓ Determinar la homogeneidad de las mezclas.
- ✓ Detectar problemas en los cilindros causados por un inadecuado procedimiento de compactación.
- ✓ Realizar correlaciones entre velocidad del pulso ultrasónico y las propiedades mecánicas del HCR.

9.1.2. Factores que afectan los resultados del ensayo de pulso ultrasónico.

Los principales factores que afectan los resultados de este ensayo son:

Superficie de contacto entre hormigón y transductores:

Debe existir un eficiente contacto físico entre los transductores y la superficie del hormigón, pues un ineficiente contacto ocasiona resultados erróneos; si la superficie moldeada presenta rugosidad, esta debe eliminarse puliendo la superficie o realizando el refrentado de la misma.

Humedad del hormigón: En general, la velocidad de propagación de la onda dentro del hormigón aumenta a medida que aumenta su contenido de humedad, pues el agua ocupa espacios vacíos, antes ocupados por aire, dentro del hormigón.

Edad de las muestras: Este factor influye en los resultados debido a que la velocidad del pulso ultrasónico depende del grado de hidratación que ha alcanzado el cemento.

9.1.3. Descripción de equipo de trabajo.³

El equipo para medir la velocidad de pulso ultrasónico consta de un sistema que mide el tiempo de propagación de un pulso que sale de un emisor hacia un receptor; el emisor y el receptor se los coloca en los extremos de la muestra y durante el ensayo el equipo mide el tiempo de propagación de la onda dentro de la muestra, la cual se utiliza junto a la longitud del elemento para calcular la velocidad del pulso.

³ La norma ASTM C597 describe el procedimiento para determinar la velocidad de propagación de pulso ultrasónico a través del hormigón.

En la siguiente figura se muestra el equipo de ultrasonido utilizado.

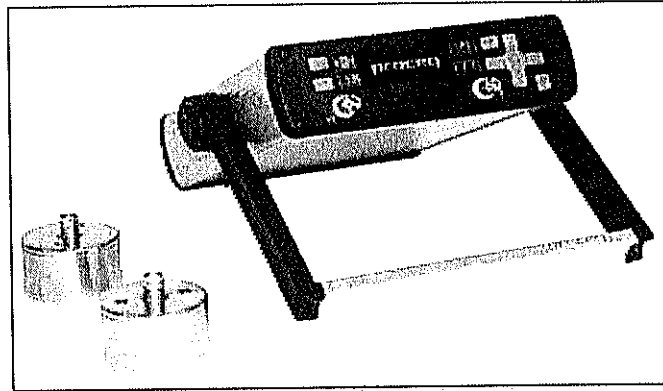


Figura 9.2 Equipo de ultrasonido.

9.1.4. Procedimiento de ensayo.

El ensayo de velocidad de pulso ultrasónico nos da una perspectiva de la calidad de las muestras del HCR, la cual dependerá de una distribución adecuada del agregado y del grado de compactación alcanzado.

En la siguiente figura se muestra el equipo y herramientas para realizar el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico.

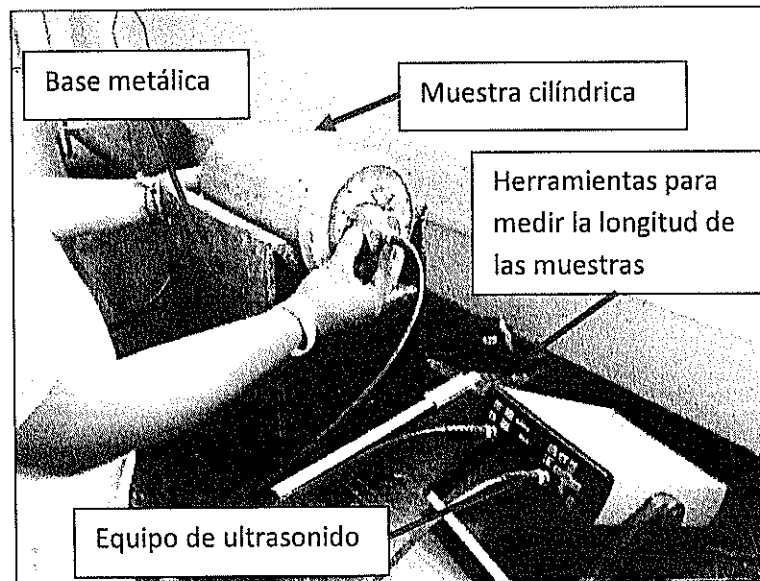


Figura 9.3 Equipo y herramientas para realizar el ensayo de pulso ultrasónico.

Antes de realizar el ensayo es necesario efectuar una inspección visual de los puntos a ensayar para establecer si la superficie necesita ser mejorada. El procedimiento de ensayo de detalla a continuación:

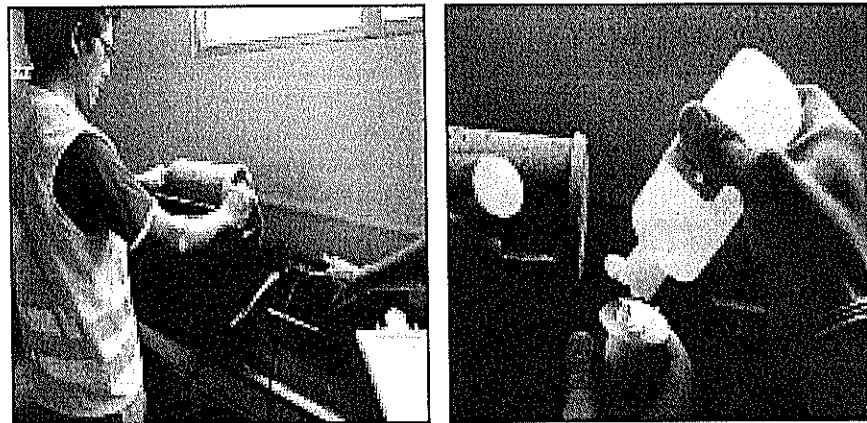
Luego de elaborados los cilindros y curados hasta las edades establecidas se retira los cilindros de la piscina de curado y se procede a:

- Medir la longitud de la muestra y colocarla sobre la base de una estructura.

- Luego se introduce la longitud del cilindro en el equipo de ultrasonido y se procede a colocar gel en el emisor y receptor para mejorar el contacto entre éstos y la muestra.
- Finalmente se realizan las lecturas correspondientes y se anotan los valores de velocidad y tiempo.

Para este trabajo se realizaron 6 lecturas por cada cilindro (dos en el centro y cuatro en los extremos), con el fin de detectar alguna oquedad o vacío que pueda existir dentro de los mismos y con el objetivo de evaluar la homogeneidad de los cilindros.

En la siguiente figura se muestra el procedimiento de ensayo.



a) Procedimiento de ensayo. b) Aplicación del gel.

Figura 9.4 Muestra en procedimiento de ensayo.

9.1.5. Resultados del ensayo de pulso ultrasónico.

En las siguientes tablas se muestran el promedio de las velocidades de pulso ultrasónico obtenidos con cada tipo y contenido de cemento para las diversas edades de ensayo.⁴

Contenido y tipo de cemento HE			
Días	75Kg/m³	95Kg/m³	105Kg/m³
3	3450	3724	3836
7	3571	3791	3950
14	4100	4239	4361
28	4320	4479	4566
56	4494	4569	4747
90	4563	4340	4797
180	4729	4830	4900
Velocidad de pulso ultrasónico (promedio)			

a) Resultados obtenidos con el cemento HE

⁴ Los resultados totales se encuentran almacenados en la base de datos del Centro Técnico del Hormigón.

Contenido y tipo de cemento GU			
Días	75Kg/m	95Kg/m	105Kg/m
3	3060	3482	3422
7	3694	3679	3838
14	4067	4009	4124
28	4235	4421	4484
56	4485	4564	4649
90	4558	4653	4710
180	4595	4733	4744
	Velocidad de pulso ultrasónico (promedio)		

b) Resultados obtenidos con el cemento GU

Contenido y tipo de cemento MH		
Días	75Kg/m³	95Kg/m³
3	2885	2991
7	3269	3422
14	3662	3988
28	3996	4050
56	4205	4414
90	4370	4484
180	4290	4487
	Velocidad de pulso ultrasónico (promedio)	

c) Resultados obtenidos con el cemento MH

Tabla 9.2 Velocidad de pulso ultrasónico promedio obtenidas con cada tipo y contenido de cemento.

9.2. Ensayo de permeabilidad al aire en el HCR.

La permeabilidad al aire del hormigón se puede determinar mediante métodos no destructivos y es un parámetro que permite evaluar su durabilidad en medios agresivos donde se requiere hormigones que no permitan el paso de sustancias dañinas. La permeabilidad se ve influenciada en gran medida del aire atrapado en la mezcla, la granulometría, la relación a/c, contenido de cemento, filler y buena práctica constructiva durante la colocación y curado del hormigón. La permeabilidad es una medida de la facilidad con la cual un fluido atraviesa un material y en hormigón ésta se ve influenciada por la hidratación del cemento, variando con la edad de igual manera como sucede con las propiedades mecánicas; sin embargo no existe una relación directa entre resistencia a la compresión simple y la permeabilidad lo que significa que no necesariamente un hormigón más resistente es mas impermeable.

A continuación se muestra la dosificación propuesta para evaluar la permeabilidad al aire del HCR.

9.2.1. Dosificación propuesta.

Tipo de cemento	HE	
Dosificación	kg/m ³	Contenido de agregados
Cemento	105	-
Agua	122	-
Piedra TM 38mm	850	38%
Piedra TM 19 mm	358	16%
Arena triturada	626	28%
Arena natural	370	16,50%
Filler	33	1,50%
Densidad	2512	-
Humedad (%)	5,2	-
Contenido de aire (%)	1,1	-

Tabla 9.3 Dosificación con cemento HE

9.2.2. Descripción de equipos de trabajo.

Equipo de permeabilidad Torrent.

El equipo utilizado para medir la permeabilidad al aire del HCR se lo conoce como Permeabilmetro al Aire Torrent y el método consiste en una célula con doble cámara de vacío y un regulador de presión que asegura que el aire fluya en el ángulo correcto desde la superficie a la cámara interna esto permite el cálculo de

permeabilidad KT , el tiempo máximo que toma el ensayo es 720 segundos y si la superficie tiene mejor acabado el tiempo suele ser mucho menor. En el siguiente figura se detalla el equipo y como funciona⁵.

1. Presión cámara interior P_i
 2. Presión cámara exterior P_e
 3. Flujo hacia la cámara exterior
 4. Flujo hacia la cámara interior
- L: Profundidad de penetración de vacío

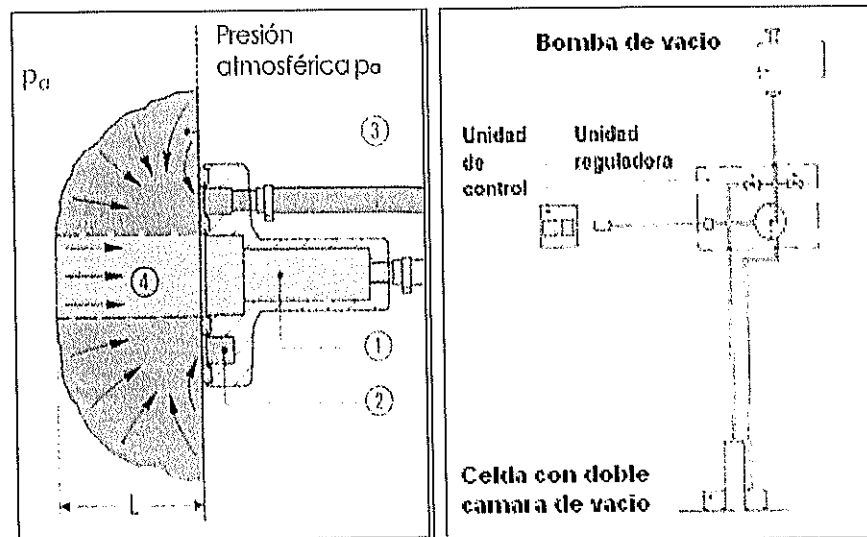


Figura 9.5 a) Detalles de la celda con doble cámara de vacío. b)

Esquema del equipo.⁶

⁵ La información se obtuvo del manual del equipo de permeabilidad.

⁶ Figura obtenida Comercial de Ingeniero DAGA.

Cortadora para hormigón.

Se utilizó una cortadora para hormigón para obtener de los cilindros las muestras necesarias para el ensayo de permeabilidad.

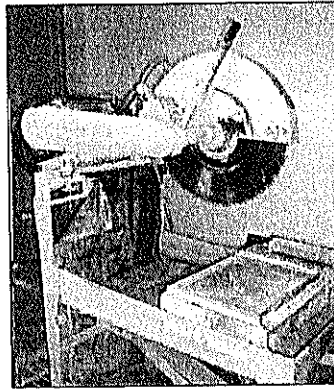


Figura 9.6 Cortadora para hormigón.

Horno.

Para secar las muestras previo al ensayo de permeabilidad se utilizó un horno de convección.

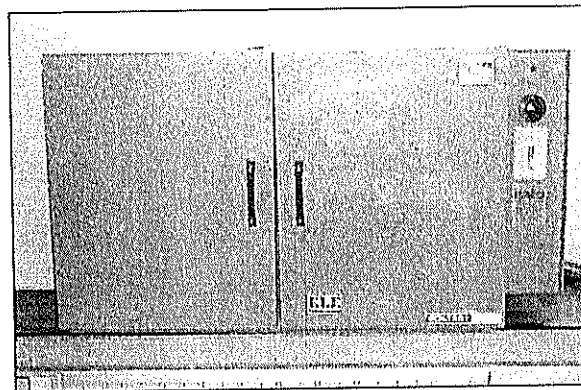


Figura 9.7 Horno de convección.

9.2.3. Preparación de muestras.

Para evaluar la permeabilidad del HCR se propuso utilizar muestras cilíndricas de 150 mm de diámetro y 125 mm de altura obtenidas de cilindros elaborados para este fin; se elaboraron tres cilindros de los cuales se obtuvieron tres muestras que se utilizaron para determinar la permeabilidad.

Para elaborar los cilindros requeridos se prepararon 15dm^3 de HCR; los cilindros se elaboraron siguiendo los procedimientos descritos en el capítulo 6 y luego de elaborados estos se cubrieron con un plástico por 24 horas, luego de lo cual se desmoldaron y se sujetaron a un curado convencional de 90 días con el fin de que se produzca la hidratación del cemento hasta niveles que sean representativos de las condiciones de campo.

Finalizado el proceso de curado se retiró los cilindros de la piscina de curado y se procedió a cortar los mismos para obtener las muestras de 150x125 mm que son requeridas. El corte de las muestras se realizó de tal manera que la superficie obtenida sea lo menos irregular posible, pues para evitar errores al momento

realizar el ensayo es necesario trabajar sobre una superficie con el mínimo de irregularidades.

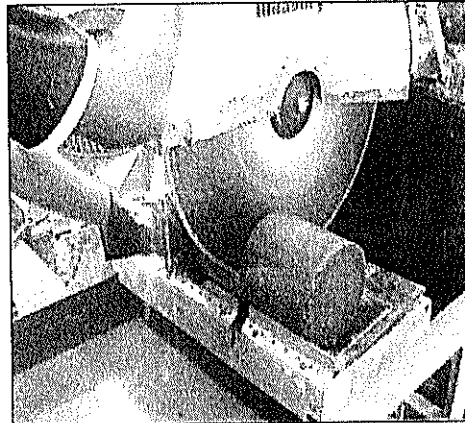


Figura 9.8 Corte de cilindro para obtención de muestras.

Para determinar la permeabilidad del HCR es necesario que el material este totalmente seco por lo cual inmediatamente después de obtenidas las muestras se procedió a colocarlas cuatro días en horno a una temperatura de 50° C para que estas se sequen totalmente, después de este tiempo las muestras se cubrieron con un plástico por 24 horas con fin de que no aumente la humedad de las mismas y para lograr que estas se enfrien hasta la temperatura ambiente. Transcurrido este tiempo se procedió a realizar el ensayo de permeabilidad.

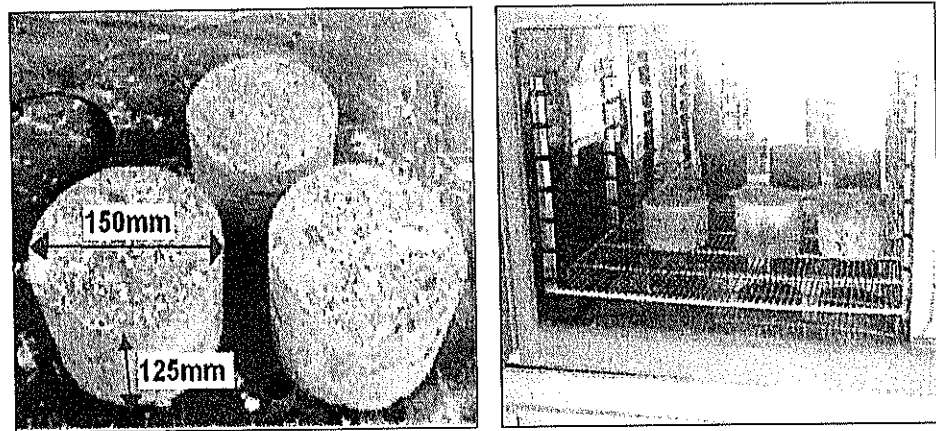


Figura 9.9 a) Muestras para ensayo. b) Secado de las muestras en el horno.

9.1.4. Procedimiento de ensayo.

Con las muestras secas y listas para el ensayo se ensambla el equipo de permeabilidad como lo muestra la figura 9.10 luego se procede a encender la bomba y seguidamente se activa la unidad de control, luego se coloca la celda con doble cámara de vacío sobre la superficie del hormigón dentro de la cual se crea un vacío producido por la bomba; debido al efecto de succión creado por la bomba los anillo de goma se adhieren a la superficie y las dos cámaras quedan selladas. La succión creada por la celda continua por un minuto luego de lo cual la unidad de control toma datos de presión cada ciertos intervalos de tiempo con el objetivo de medir la velocidad a la cual la presión se eleva en la cámara

interna, lo que permite el cálculo de la permeabilidad del hormigón (KT) y la longitud de penetración de la succión.

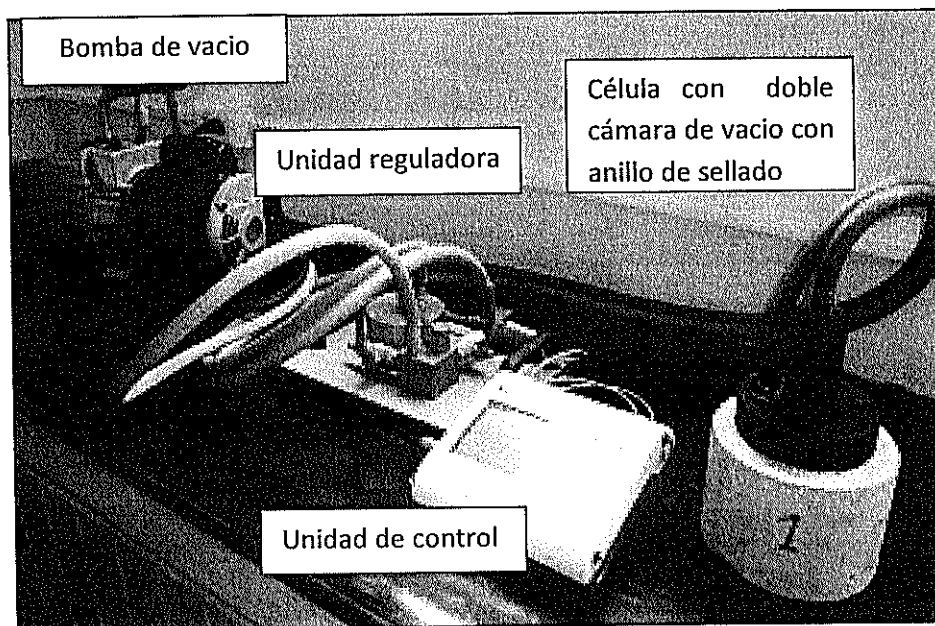
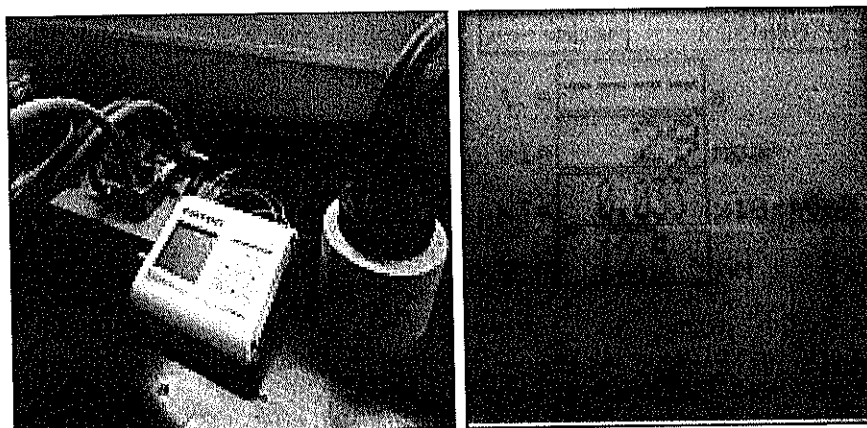


Figura 9.10 Partes del equipo de Permeabilidad.

En la figura 9.11 se muestra un espécimen bajo ensayo.



a) Obtención de datos

b) Resultados del ensayo

Figura 9.11 Etapas del ensayo de permeabilidad.

9.2.5. Resultados del ensayo

Los datos obtenidos fueron tomados de tres muestras y los resultados se detallan en tabla 9.4.

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

Tabla 9.4 Resultado del ensayo de permeabilidad al aire.

CAPITULO 10

10. ANALISIS DE RESULTADOS.

En el presente capitulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos de las pruebas que se realizaron en el HCR.

10.1. Densidad del HCR.

El siguiente histograma muestra (en azul) porcentualmente las densidades alcanzadas en los cilindros que se elaboraron para el estudio de las propiedades mecánicas. Los datos en rojo se

obtuvieron mediante una prueba de bondad de ajuste con una distribución normal.¹

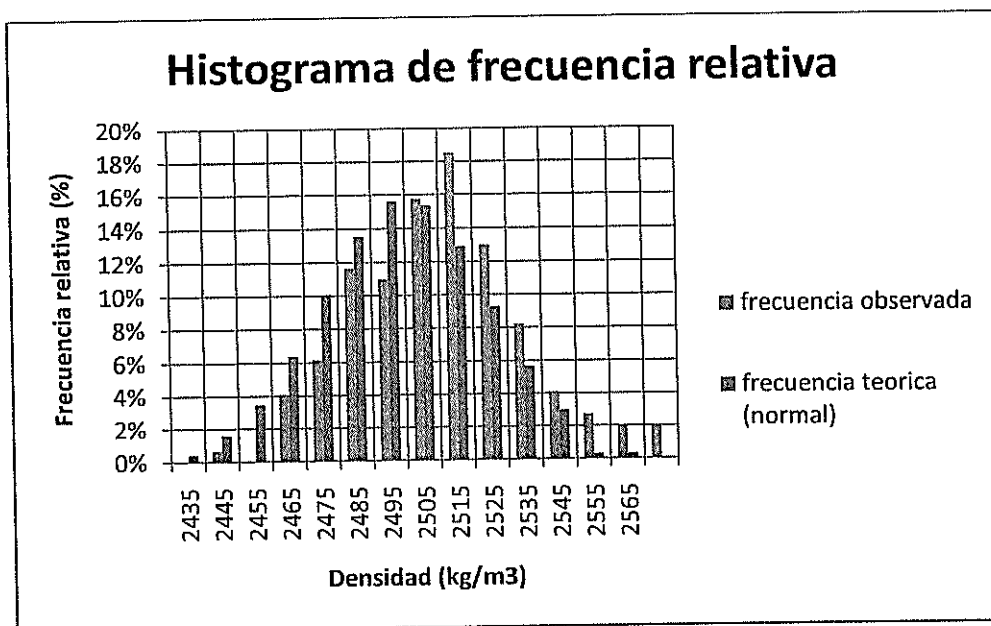


Figura 10.1 Densidades obtenidas en el estudio de las propiedades mecánicas del HCR.

En la siguiente tabla se muestra un resumen estadístico de los resultados mostrados en la figura 9.1.

¹ Para este ajuste se utilizó la media y la varianza de la tabla 10.1

Media	2500 kg/m ³
Mediana	2500 kg/m ³
Moda	2490 kg/m ³
Desviación estándar	25 kg/m ³
Varianza de la muestra	619 kg ² /m ⁶
Rango	123 kg/m ³
Mínimo	2439 kg/m ³
Máximo	2562 kg/m ³
Numero de datos	146
Coefficiente de variación	1,0%

Tabla 10.1 Resumen estadístico de las densidades obtenidas.

El control de la densidad de los cilindros es necesario para verificar que se han alcanzado los grados de compactación requeridos además de utilizarse para detectar anomalías producidas por procedimientos inadecuados de trabajo. Los resultados obtenidos son típicos de cualquier proceso de manufactura y muestran que la densidad en los cilindros se distribuye normalmente con una media de 2500 kg/m³ y una desviación estándar de 25 kg/m³ lo que demuestra la eficiencia del procedimiento utilizado para la elaboración de muestras.

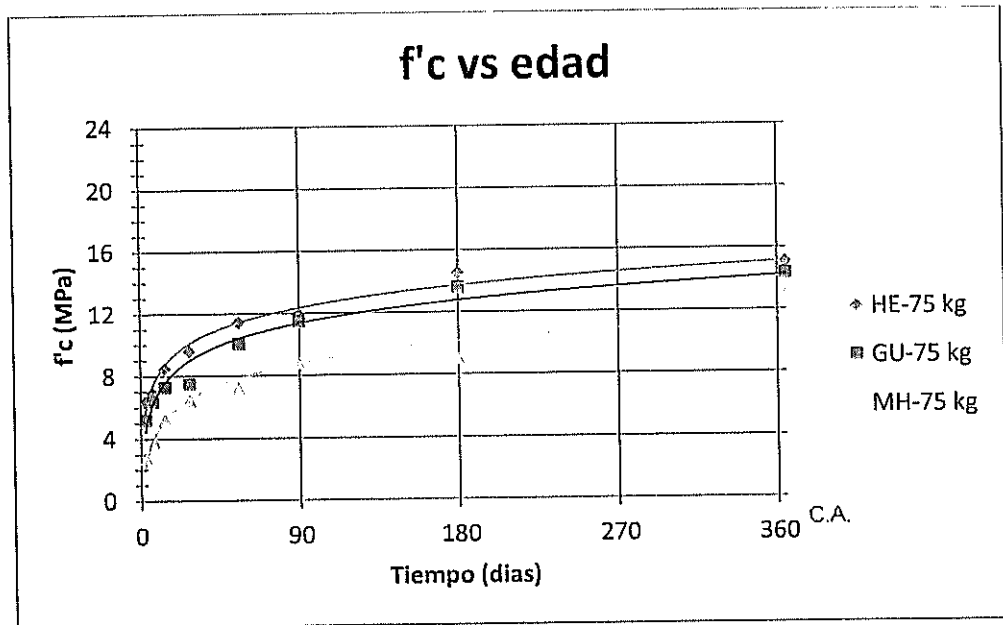
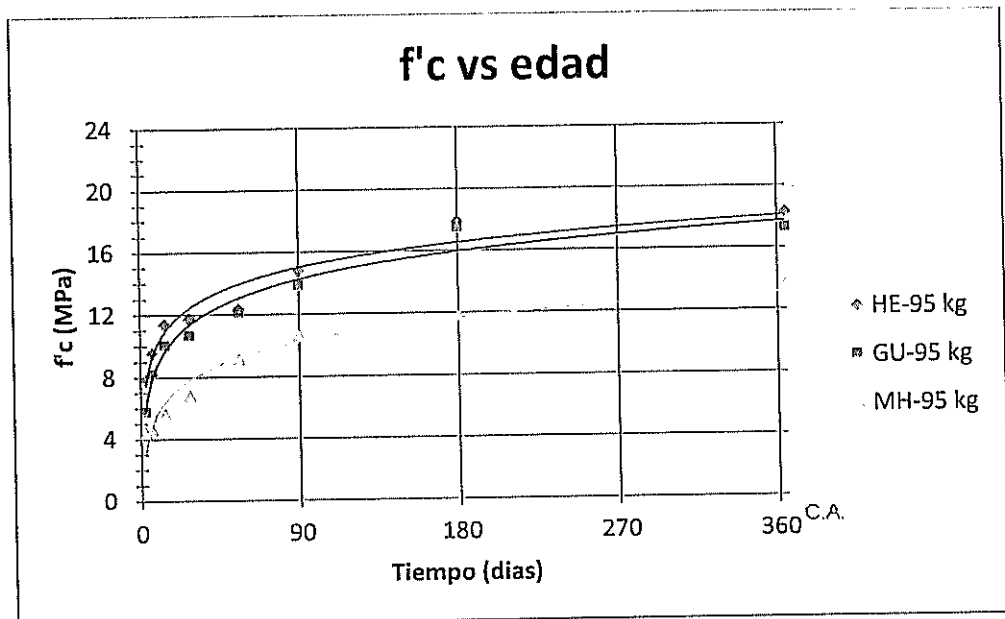
10.2. Propiedades mecánicas del HCR².

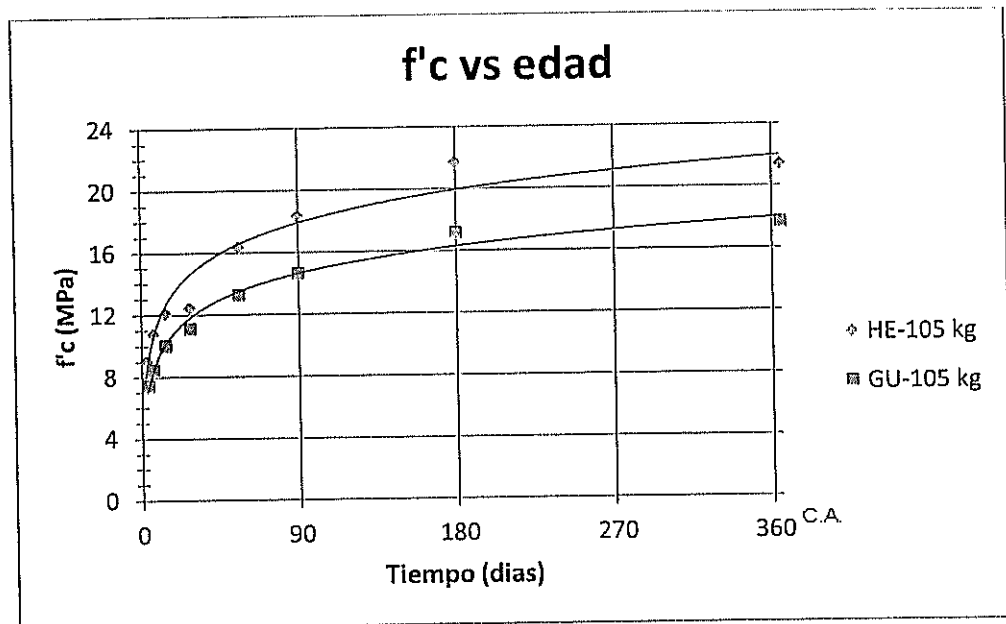
A continuación se muestran varios análisis realizados con los datos obtenidos de pruebas de laboratorio y que corresponden a los resultados obtenidos del estudio de las propiedades mecánicas del HCR.

10.2.1. Curvas resistencia a compresión simple vs tiempo.

Las siguientes curvas muestran una comparación de la resistencia a la compresión simple obtenidas con cada tipo y contenido de cemento.

² Los valores mostrados a la edad de un año corresponden a valores estimados mediante el procedimiento de curado acelerado; estos valores se correlacionarán con los valores obtenidos de un curado convencional a la edad de 365 días, sin embargo esos análisis están fuera del alcance de este trabajo.

a) Contenido de cemento 75 kg/m³.b) Contenido de cemento 95 kg/m³.

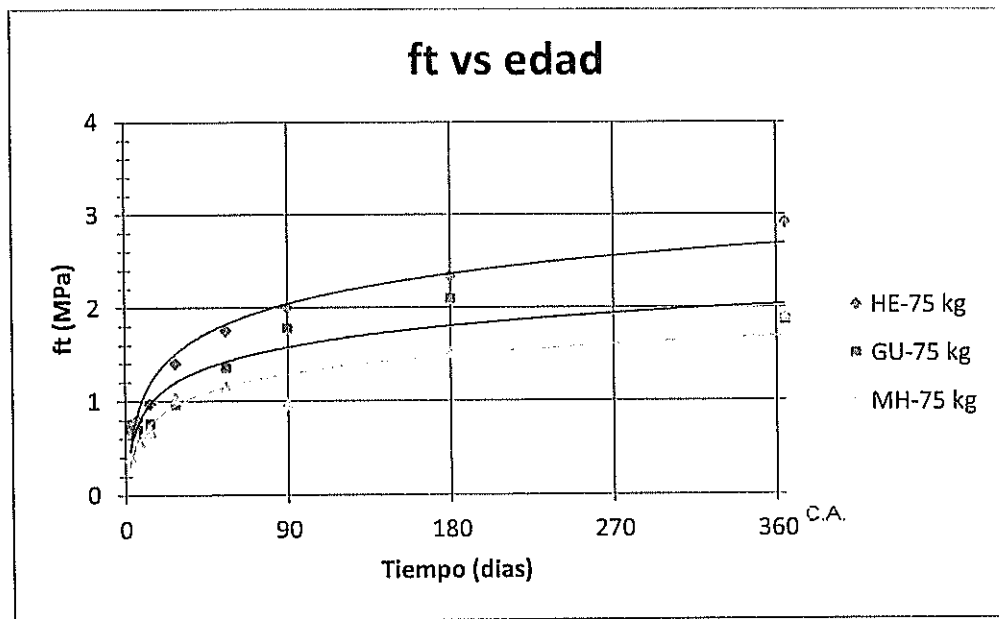


c) Contenido de cemento 105 kg/m^3 .

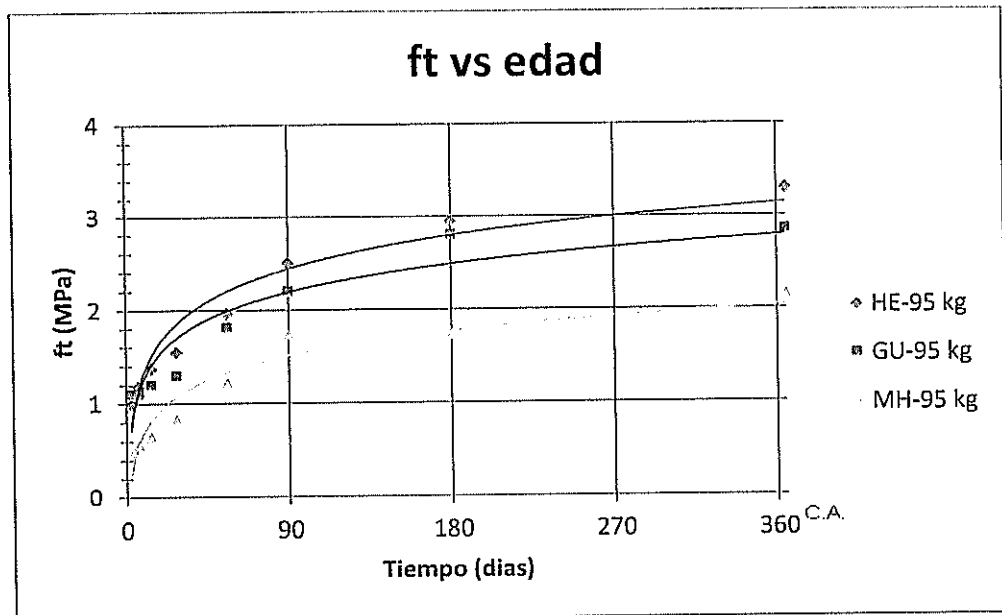
Figura 10.2 Resistencia a la compresion simple vs Tiempo.

10.2.2. Curvas resistencia a tracción indirecta vs tiempo

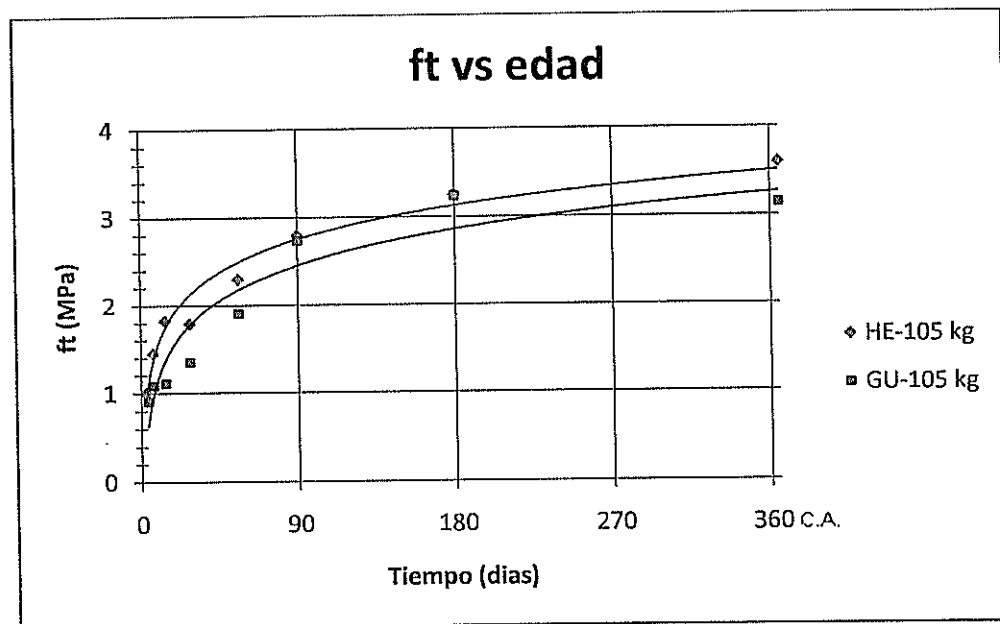
Las siguientes curvas muestran una comparacion de la resistencia a la traccion indirecta obtenidas con cada tipo y contenido de cemento.



a) Contenido de cemento 75 kg/m³.



b) Contenido de cemento 95 kg/m³.

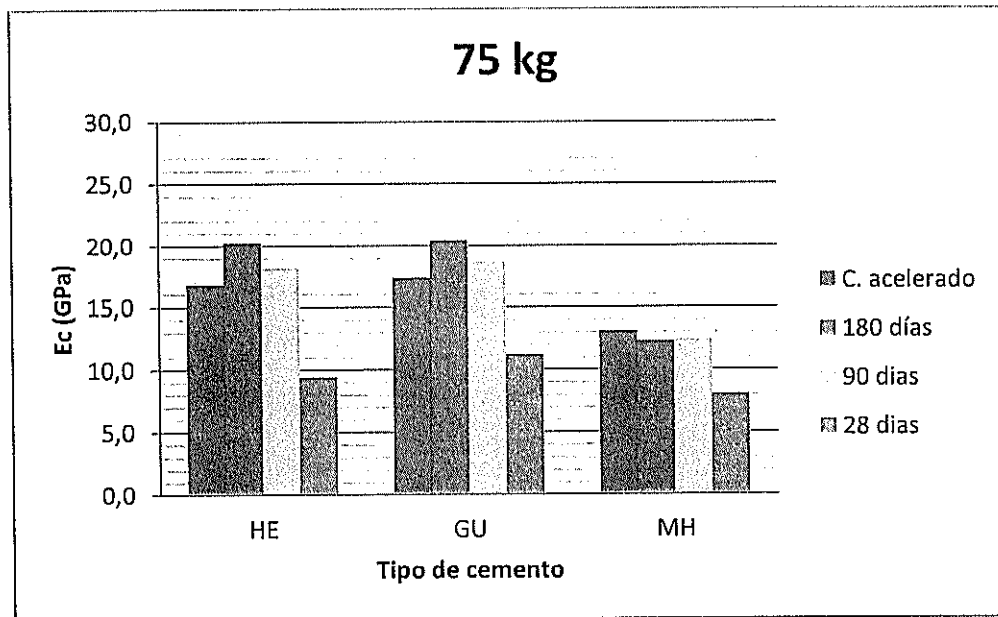
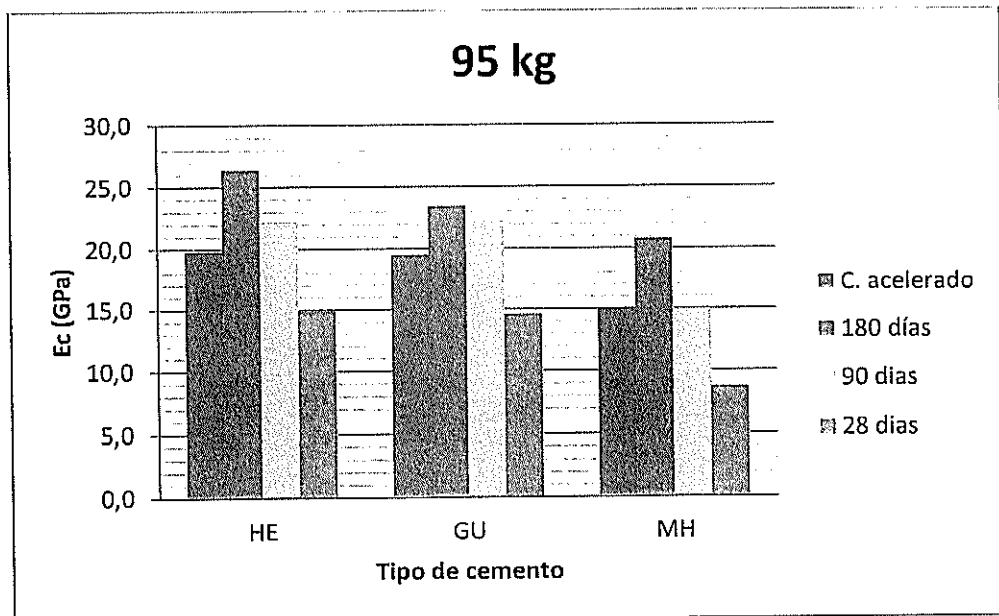


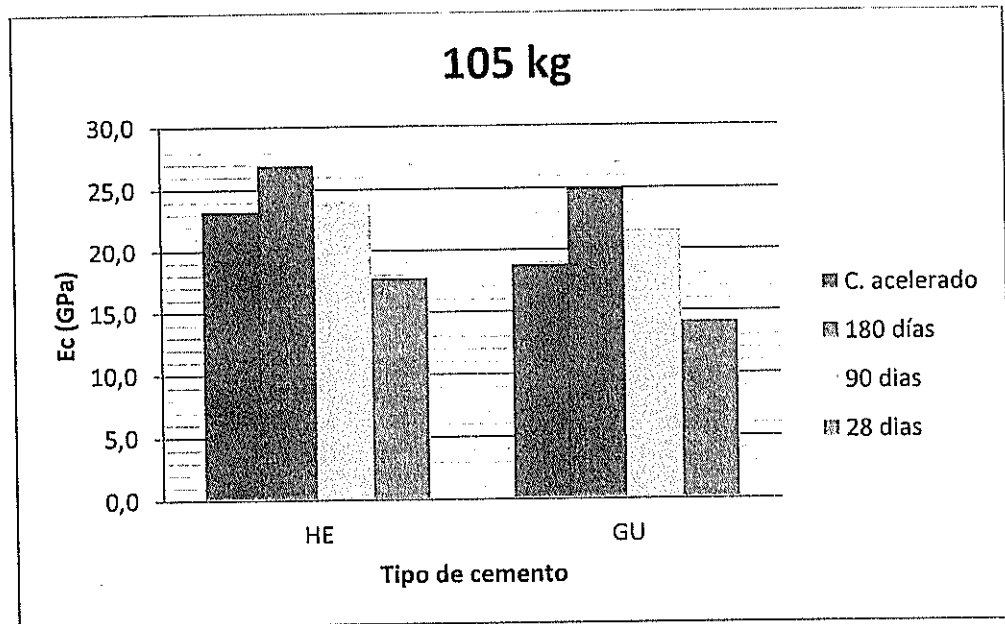
c) Contenido de cemento 105 kg/m^3 .

Figura 10.3 Resistencia a la tracción indirecta vs Tiempo.

10.2.3. Modulo de elasticidad vs contenido de cemento.

En las siguientes curvas se muestran una comparación del modulo de elasticidad obtenidos obtenidos a los 28, 90, 180 y 365 días (C. acelerado) para cada tipo y contenido de cemento.

a) Contenido de cemento 75 kg/m³b) Contenido de cemento 95 kg/m³



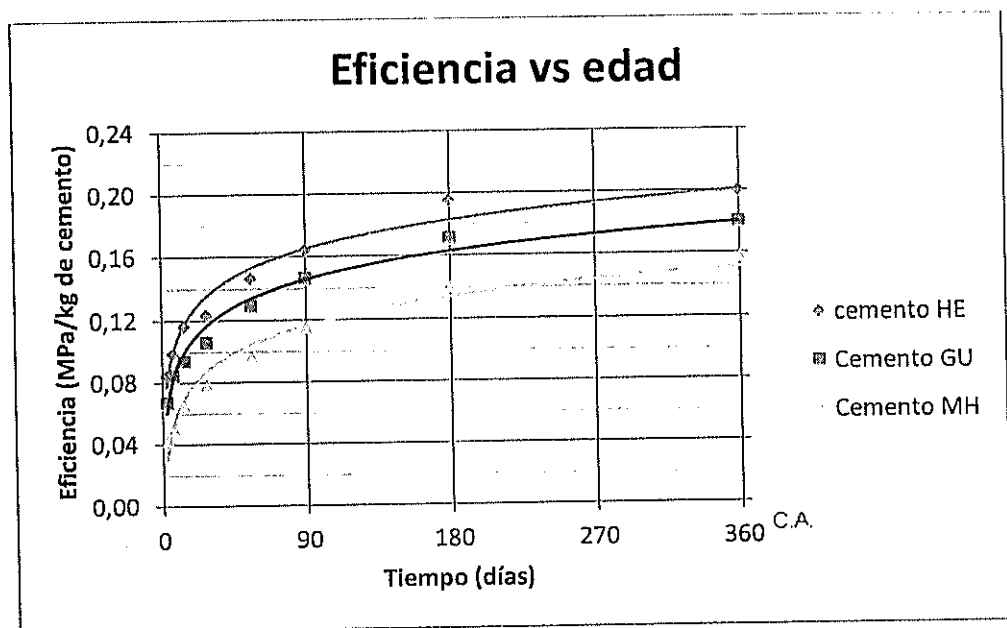
c) Contenido de cemento 105 kg/m^3

Figura 10.4 Modulo de elasticidad vs contenido de cemento.

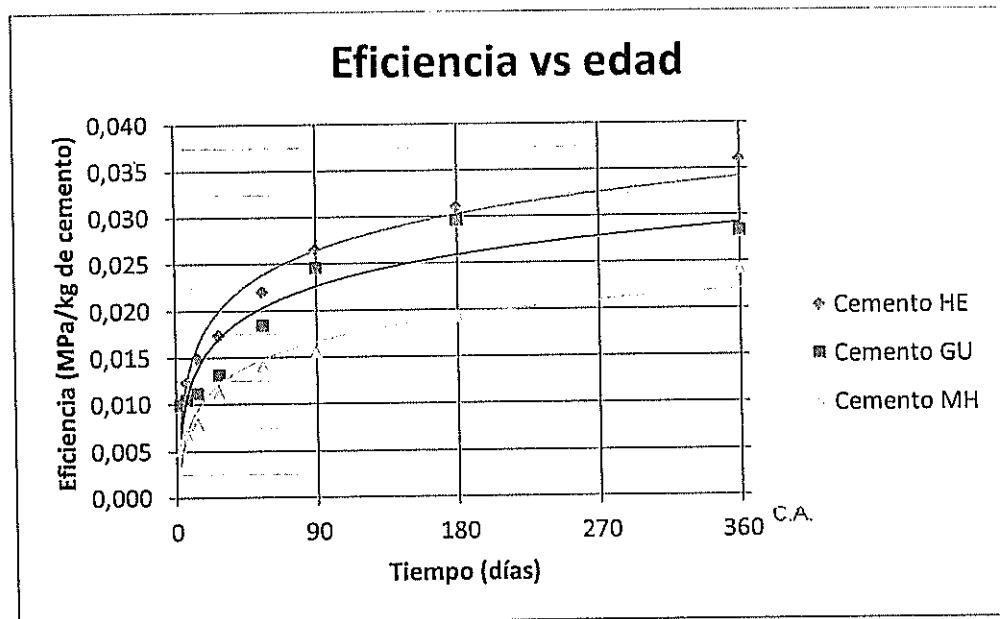
Análisis:

Los resultados muestran que los mayores valores de resistencia a la compresión simple, resistencia a la tracción indirecta y en modulo de elasticidad se obtienen con el cemento HE seguido por el cemento GU y finalmente por el cemento MH. El cemento HE se caracteriza por tener un menor contenido de puzolana respecto a los cementos GU y MH, además este es más fino que los otros cemento (Blaine= $460 \text{ m}^2/\text{kg}$), razón por la cual se obtiene propiedades mecánicas más elevadas.

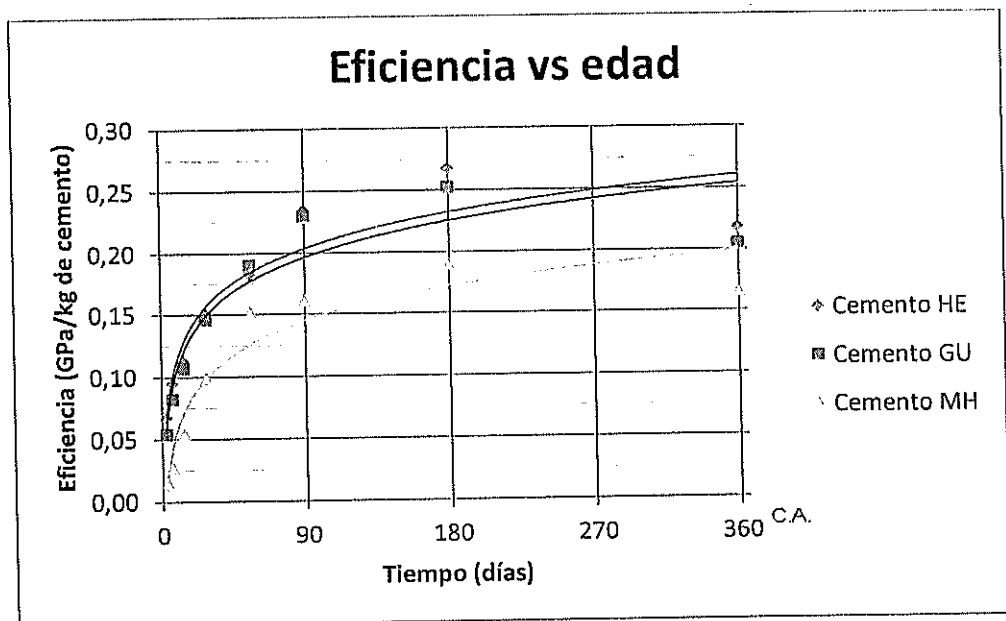
En la siguientes graficas se compara la eficiencia de los cementos HE, GU y MH para cada una de las propiedades mecánicas del material. La eficiencia de un cemento se define como el valor de resistencia mecánica o modulo de elasticidad producida por cada kilogramo del mismo en la mezcla.



a) Eficiencia en resistencia a la compresión simple.



b) Eficiencia en resistencia a la tracción indirecta.



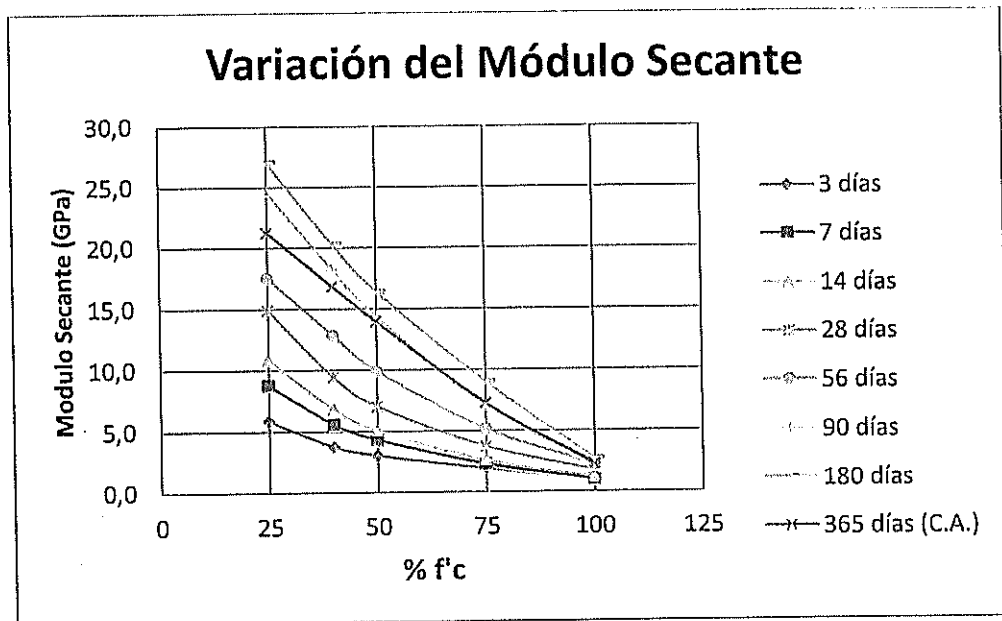
c) Eficiencia en módulo de elasticidad.

Figura 10.5 Comparación de la eficiencia de los cementos tipo HE,

GU y MH.

10.2.4. Módulo secante vs tiempo.

En los siguientes gráficos se muestra la variación del módulo secante con la edad para cada tipo y contenido de cemento.



a) Cemento HE-75kg/m³.

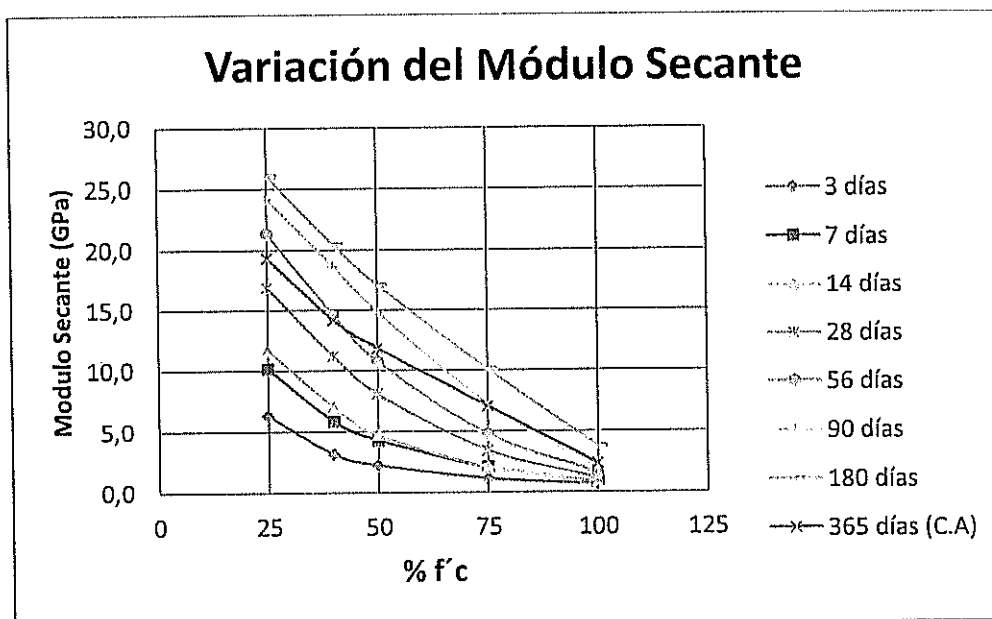
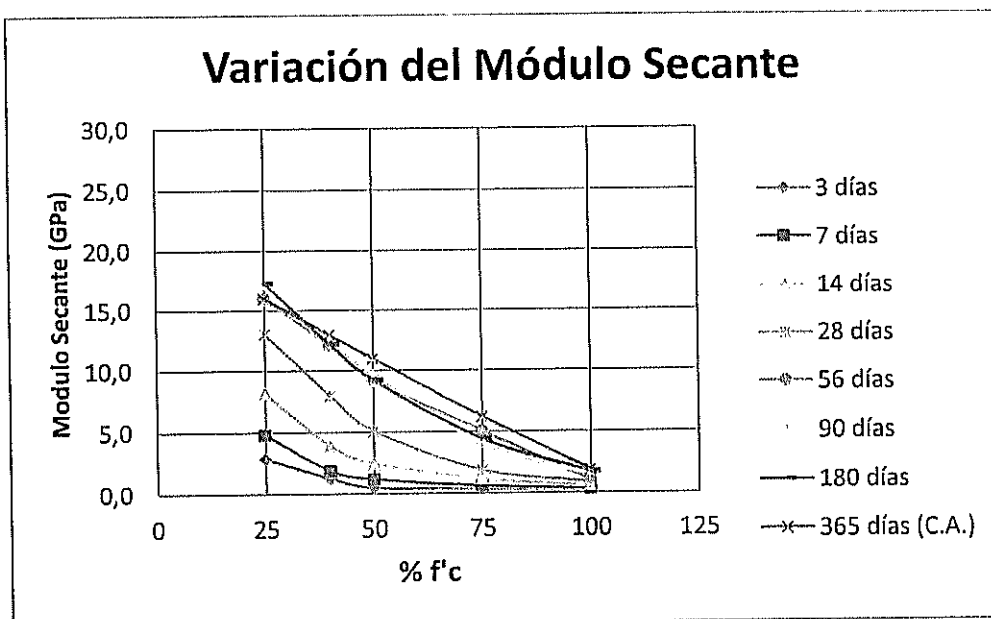
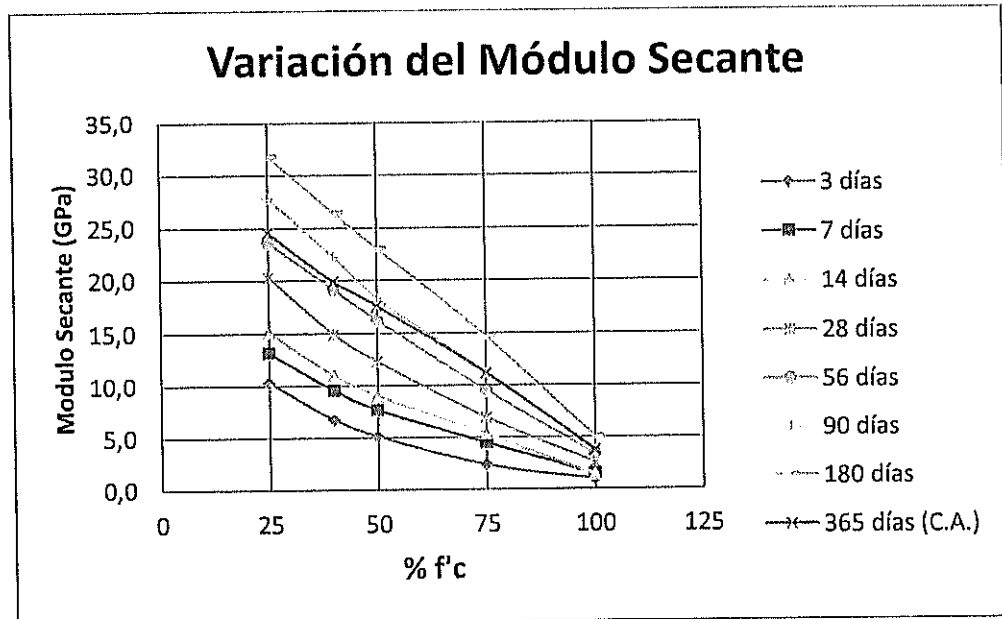
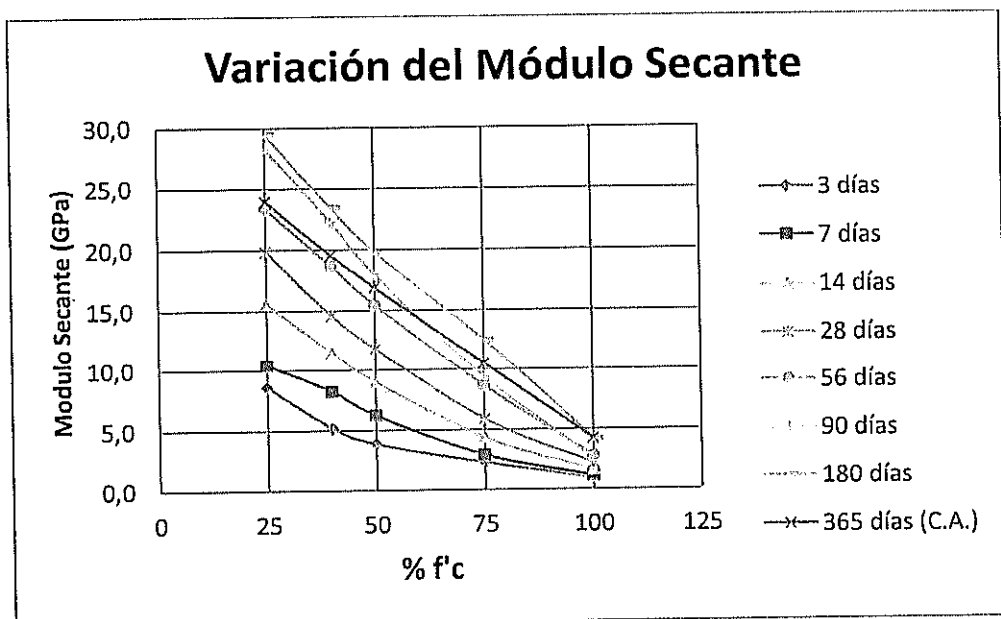
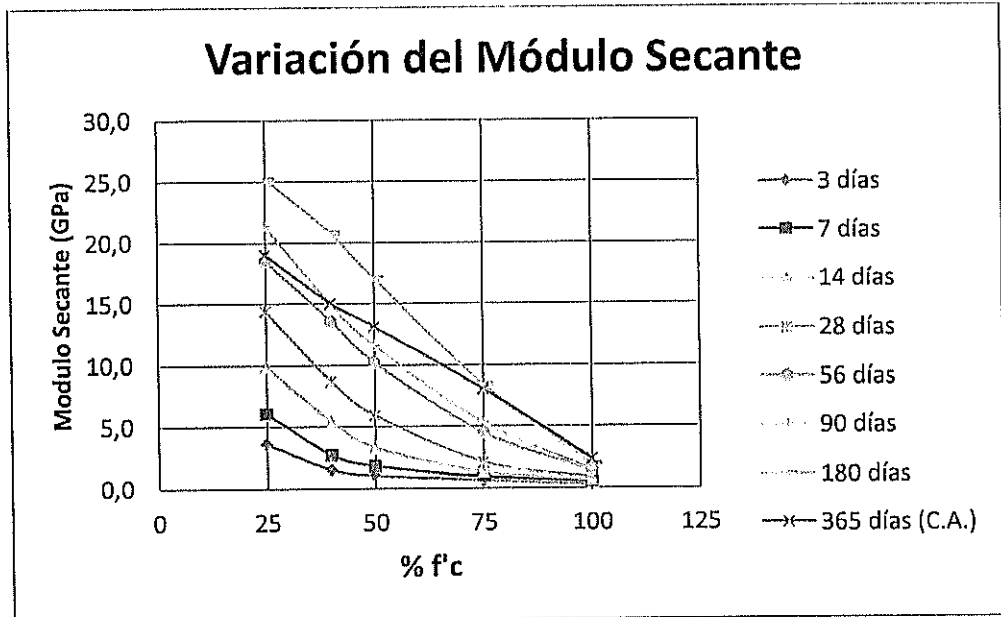
b) Cemento GU-75kg/m³.c) Cemento MH-75kg/m³.

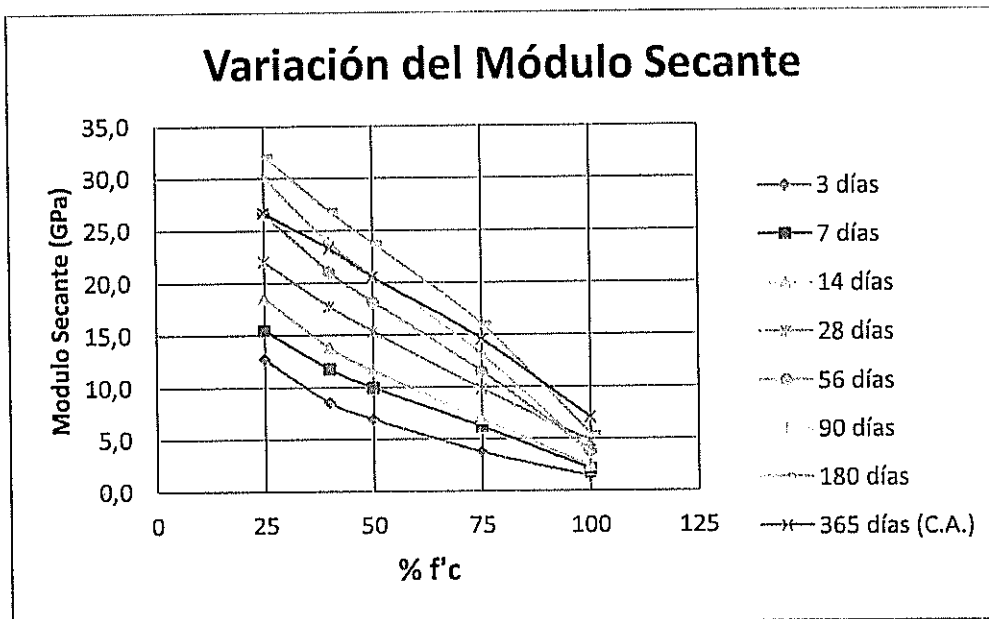
Figura 10.6 Variación del modulo secante para 75 kg/m³ de cemento.

a) Cemento HE-95kg/m³.b) Cemento GU-95kg/m³.

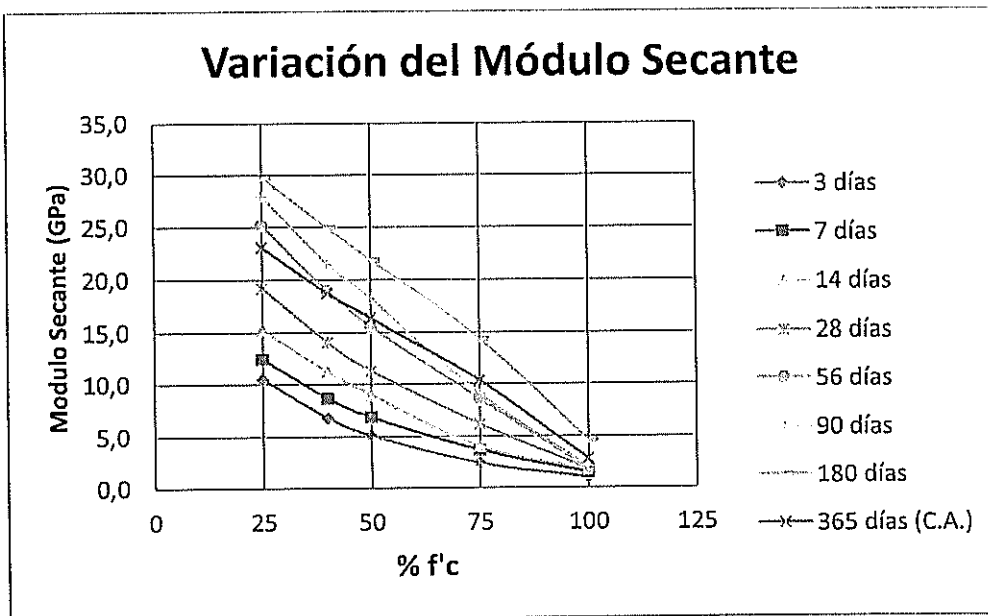


c) Cemento MH-95kg/m³.

Figura 10.7 Variación del módulo secante para 95 kg/m³ de cemento.



a) Cemento HE-105 kg/m³.



b) Cemento GU-105 kg/m³.

Figura 10.8 Variación del modulo secante para 105 kg/m³ de cemento.

Análisis de resultados

Como era de esperarse al igual que en modulo de elasticidad se tiene que con el cemento HE se obtienen los mayores valores de modulo secante seguido del cemento GU y MH. Los resultados también muestran que en cilindros de 180 días se obtienen valores de modulo secante que sobrepasan los estimados de los cilindros sujetos al procedimiento de curado acelerado excepto para el cemento MH-75kg/m³ para el cual se han obtenido valores de modulo secante muy similares a las edades de 56, 90 y 180 días. Los altos contenidos de puzolana que caracterizan el cemento MH sumado a los bajos contenidos de cemento utilizados en las mezclas son la causa del comportamiento observado con el cemento MH-75 kg/m³.

Otro detalle importante que se puede apreciar en las graficas es que los valores de módulo secante obtenidos de los cilindros sujetos al procedimiento de curado acelerado no siguen la misma tendencia de los módulos secantes obtenidos de los cilindros sujetos a curado convencional pues las curvas de modulo secante referidos al curado acelerado son menos empinadas y se puede apreciar que mediante el procedimiento de curado

acelerado se modifican las propiedades elásticas del material alterando principalmente los valores de modulo secante al 25% y 40%.

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

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

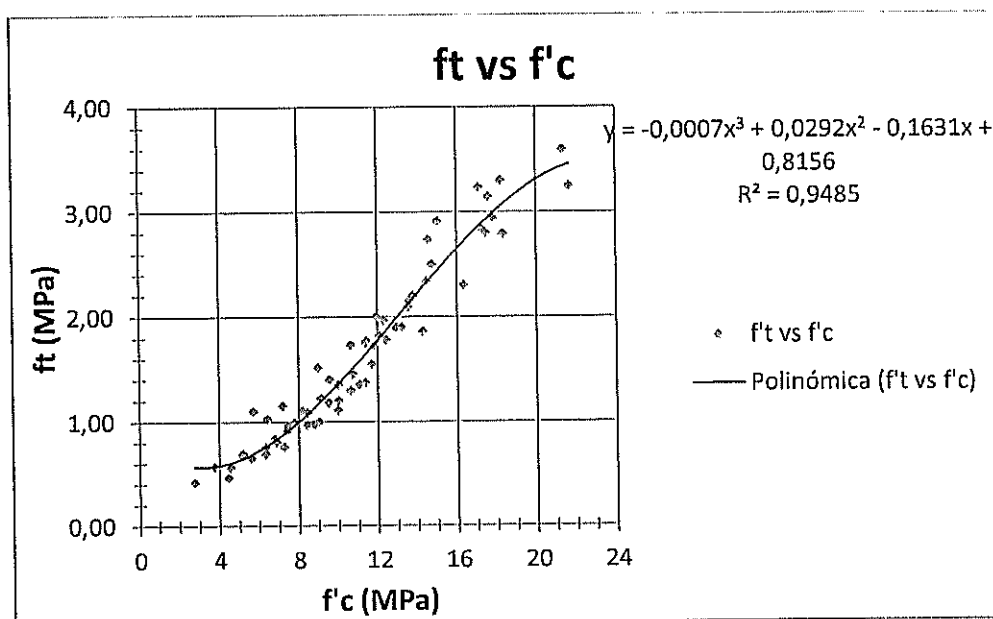


Figura 10.9 Resistencia a la tracción indirecta vs resistencia a la compresión simple.

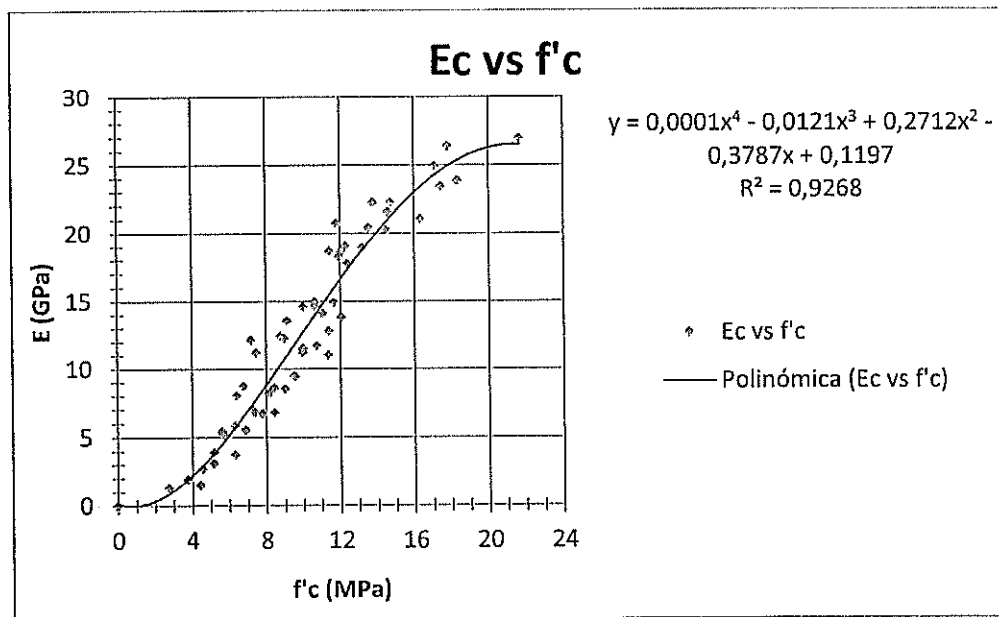


Figura 10.10 Modulo de elasticidad vs resistencia a la compresion simple.

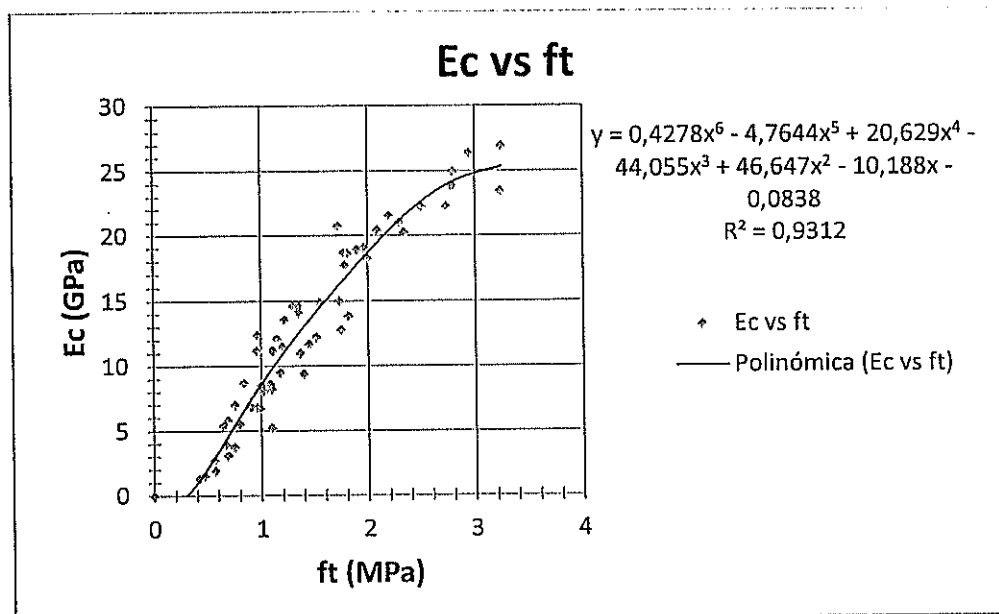


Figura 10.11 Modulo de elasticidad vs resistencia a la traccion indirecta.

Las graficas arriba mostradas revelan las fuertes correlaciones existentes entre las propiedades mecánicas del HCR las mismas que son independientes del tipo y contenido de cemento utilizado; en las graficas también se puede apreciar que para valores de propiedades mecánicas relativamente altos las correlaciones tiende a ser de tipo horizontal.

10.4. Ductilidad del HCR³.

La siguiente grafica muestra los valores de ductilidad que se obtuvieron de las muestras de HCR se que sujetaron al ensayo de resistencia a la compresion simple y modulo de elasticidad; la grafica es semilogaritmica y los valores de ductilidad se muestran para las diferentes edades de ensayo (3, 7, 14, 28, 56, 90, 180 365 días).

³ La ductilidad se define como la relación entre la deformación que causa la rotura del elemento y la deformación necesaria para alcanzar el límite de proporcionalidad.

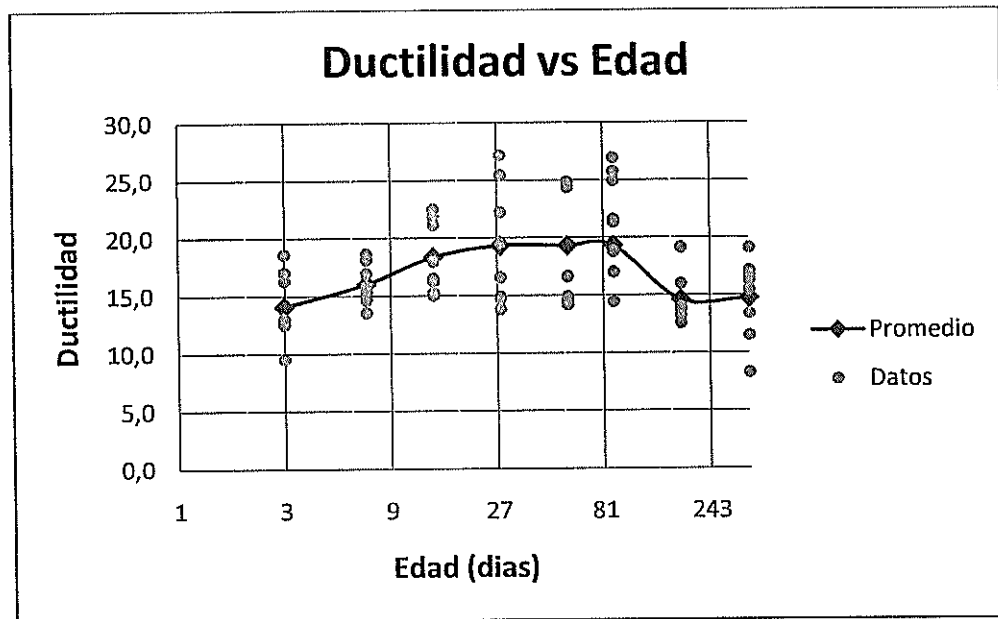


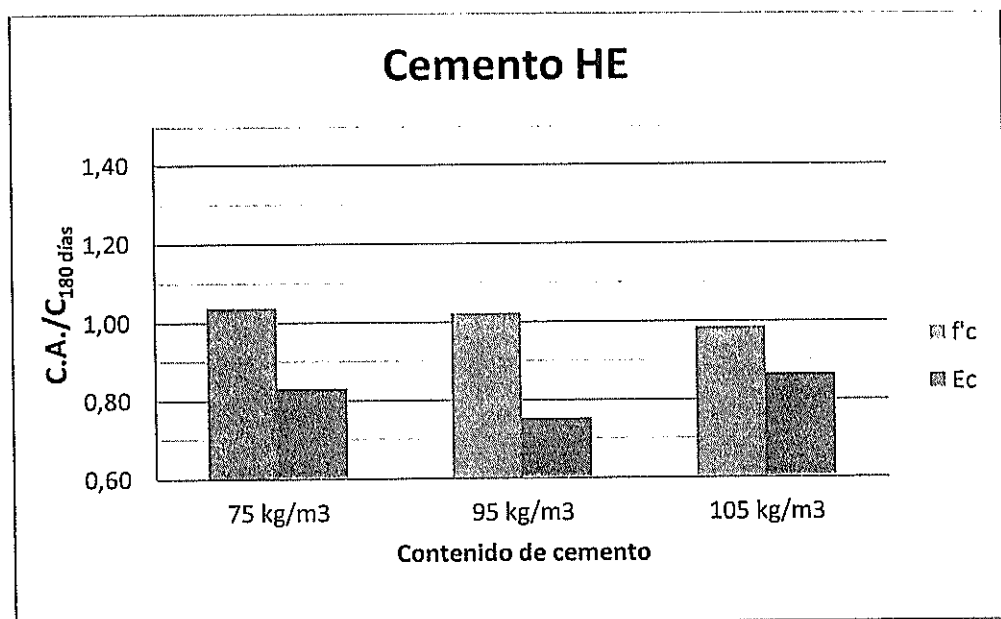
Figura 10.12 Ductilidad del HCR.

Análisis de resultados.

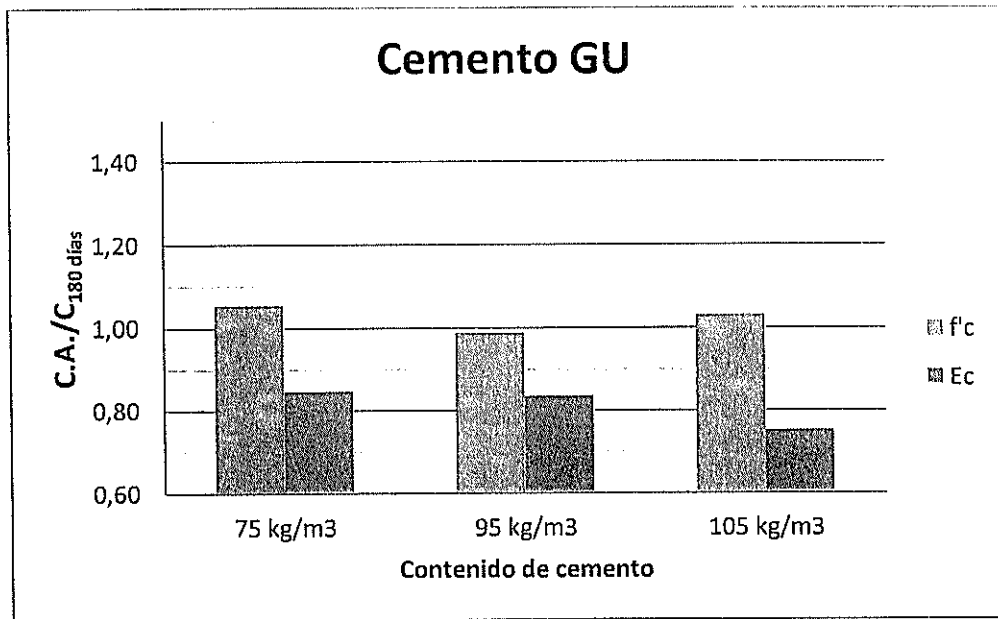
Como se puede apreciar en la grafica la ductilidad del material varia en el tiempo, así tenemos que la misma aumenta hasta los 28 días, luego se mantiene constante hasta los 90 días y finalmente decrecer a valores similares a los iniciales después de los 90 días. Aunque los valores de ductilidad no mostraron ninguna correlación con el tipo o contenido de cemento ni con alguna propiedad mecánica del material la misma se puede asumir conservadoramente como diez para propósitos de diseño.

10.5. Curado convencional vs curado acelerado.

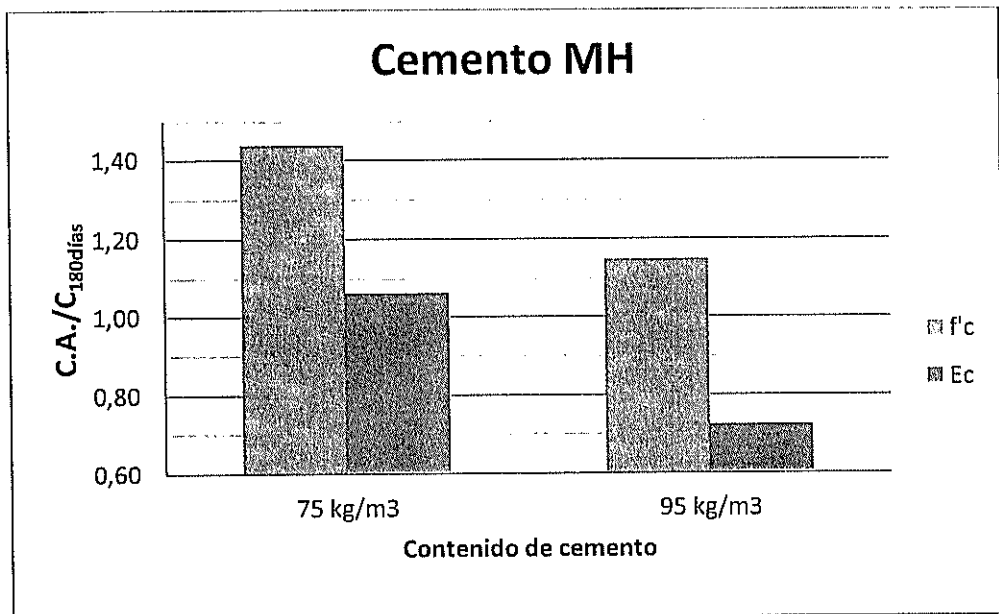
La siguiente grafica muestra para cada tipo y contenido de cemento los resultados de resistencia a la compresión simple y modulo de elasticidad obtenidos en las muestras sujetas al procedimiento de curado acelerado como un múltiplo de los valores obtenidos en las muestras sujetas a un curado convencional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



a) Cemento HE.



b) Cemento GU.



c) Cemento MH.

Figura 10.13 Comparación entre el curado acelerado y curado convencional (180 días) para resistencia a compresión simple y módulo de elasticidad.

Como se puede apreciar en los gráficos utilizando los cementos HE y GU a los 180 días de curado convencional se obtienen valores de resistencia a la compresión simple similares a los obtenidos de los cilindros sujetos al curado acelerado, sin embargo esto no se cumple con el cemento MH para el cual son necesarios más de 180 días de curado convencional para alcanzar valores de resistencia a la compresión simple equivalentes a los obtenidos de los cilindros sujetos al procedimiento de curado acelerado. El cemento MH se caracteriza por tener mayor contenido de puzolana (45% de adición puzolánica) que los cementos HE y GU por lo cual tiene un comportamiento diferente con la tendencia a un crecimiento lento de la resistencia a la compresión simple en el tiempo.

En las gráficas también podemos apreciar que a 180 días de curado convencional se obtienen valores de módulo de elasticidad mucho mayores a los obtenidos de las muestras sujetas al procedimiento de curado acelerado incluso para el cemento MH-75 kg/m³ para el cual se obtienen a 180 días valores de módulo de elasticidad cercanos a los obtenidos del curado acelerado (0.9 veces) a pesar de la gran diferencia de los valores de resistencia a la compresión simple. Esto muestra que aunque el procedimiento de curado acelerado estima

adecuadamente la resistencia a la compresión simple a la edad de un año, este tiende a subestimar el modulo de elasticidad del material, por lo cual los resultados de modulo de elasticidad obtenidos de muestras sujetas a curado acelerado deben ser considerados conservadores.

10.6. Propiedades térmicas del HCR.

En la siguiente tabla se muestran los resultados del estudio de las propiedades termicas del HCR.

	Coefficiente de dilatación térmica a los 7 días(1/°C)	Coefficiente de dilatación térmica a los 90 días (1/°C)
Probeta 1	6×10^{-6}	6×10^{-6}
Probeta 2	8×10^{-6}	8×10^{-6}
Promedio	7×10^{-6}	7×10^{-6}

Tabla 10.2 Coeficiente de dilatacion termica del HCR.

	Conductividad térmica (J/s m °C)
Cilindro 1	1.79
Cilindro 2	1.71
Promedio	1.75

Tabla 10.3 Conductividad termica del HCR.

Análisis de resultados.

Como se puede observar el coeficiente de dilatación térmica obtenido a 7 días es similar al obtenido a 90 días y resultaron menores a los estimados por el diseñador de la presa, el cual estimó un coeficiente de dilatación térmica de $9.1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ y un valor de conductividad térmica de $2.21 \text{ J/s m } ^\circ\text{C}$ (Schrader, 2011)(15).

10.7. Tiempo de trabajabilidad del HCR.

La siguiente gráfica muestra en función de la diferencia de tiempo entre el mezclado y la elaboración del cilindro los resultados obtenidos de resistencia a la compresión simple a la edad de 7 días.

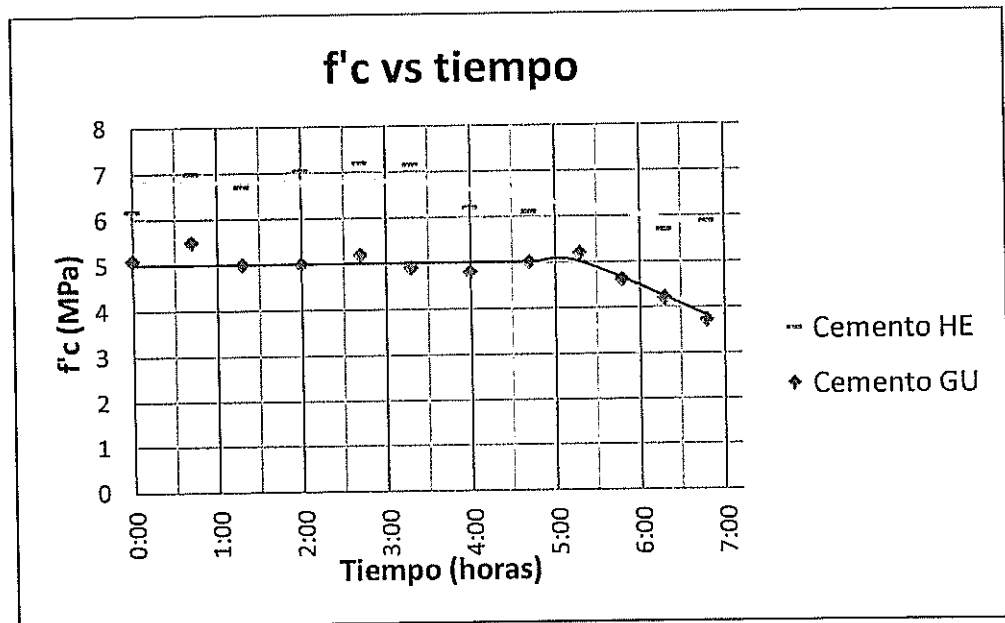
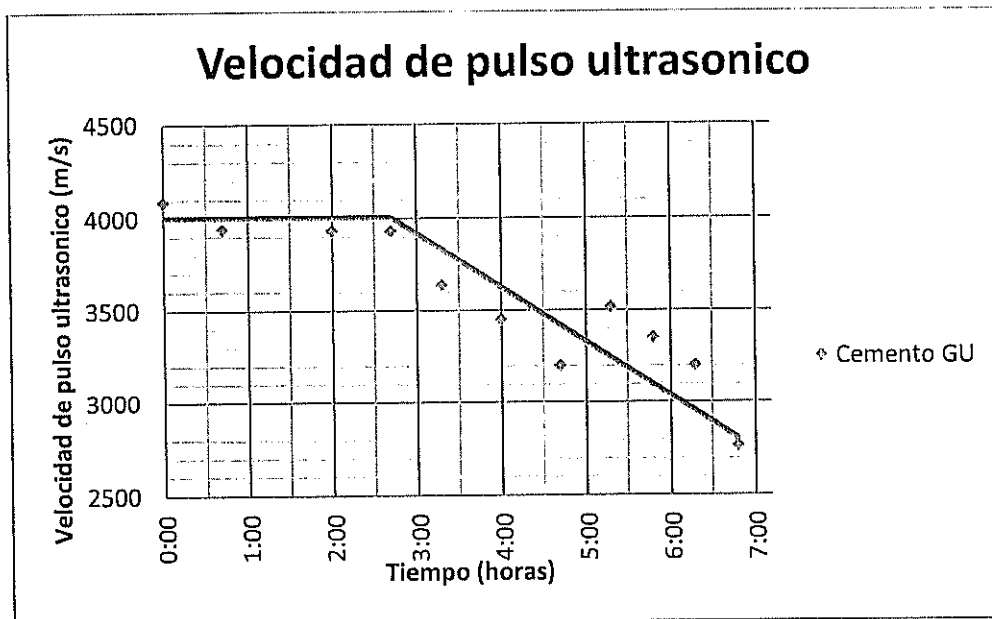
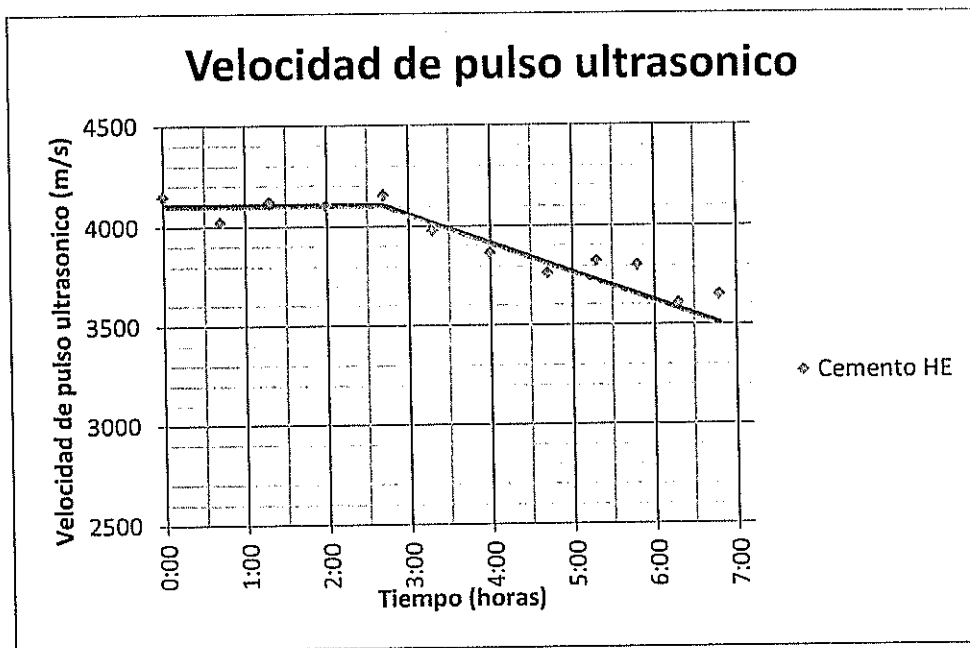


Figura 10.14 Resultados del estudio del tiempo de trabajabilidad del HCR.

A continuacion se muestran los valores de velocidad de pulso ultrasonico obtenidos de las muestras elaboradas para el estudio del tiempo de trabajabilidad del HCR en funcion de la diferencia de tiempo entre el mezclado y la compactacion del material.



a) Cemento GU-95 kg/m³.



a) Cemento HE-95 kg/m³.

Figura 10.15 Velocidad de pulso ultrasónico vs tiempo a la cual se elaboró los cilindros.

Analisis de resultados:

La figura 10.14 muestra que para el cemento HE la resistencia a la compresion simple se mantiene hasta 3 horas y media despues del mezclado y para el cemento GU hasta 5 horas despues del mezclado, no obstante la grafica 10.15 muestra que la velocidad de pulso ultrasonico comienza a disminuir a las 3 horas despues del mezclado independientemente del tipo de cemento; estos resultados nos muestran que el ensayo de ultrasonido es mas adecuado que el ensayo de resistencia a la compresion simple en lo concerniente al estudio del tiempo de trabajabilidad del material, pues mediante el ensayo de ultrasonido se ha logrado detectar variaciones en la proporcion de vacios de las muestras causado por la perdida de trabajabilidad del material, lo cual no se logró mediante el ensayo de resistencia a la compresion simple. Así tenemos que el tiempo maximo de trabajabilidad del material es de 2 horas pero bajo condiciones de laboratorio (temperatura y humedad de 24 °C y 92% respectivamente) pues en las condiciones reales de trabajo este tiempo podria verse reducido debido a condiciones ambientales mas severas.

10.8. Permeabilidad al aire del HCR.

En las siguientes graficas se muestran los resultados obtenidos del ensayo de permeabilidad al aire realizado a 90 días de edad en muestras de HCR elaboradas con el cemento HE con 105 kg/m^3 . Además se muestra una tabla que cuantifica la calidad del hormigón en función a la permeabilidad del mismo.

Muestra	KT (m^2)
1	0.033×10^{-16}
2	0.022×10^{-16}
3	0.028×10^{-16}
Promedio	0.028×10^{-16}

Tabla 10.4 Resultados del ensayo de permeabilidad en el HCR.

Calidad del hormigón	Índice	kT (10^{-16} m^2)
Muy mala	5	> 10
Mala	4	1,0 - 10
Normal	3	0,1 - 1
Buena	2	0,01 - 0,1
Muy buena	1	<0,01

Tabla 10.5 Calidad del hormigón en función de su permeabilidad⁴.

La tabla 10.5 se obtuvo del manual del equipo de permeabilidad Torrent.

Análisis de resultados.

Utilizando la tabla 10.5 el material queda clasificado como de buena calidad lo que significa que tendrá un buen desempeño en medios agresivos debido a que por su baja permeabilidad las sustancias agresivas no penetrarán fácilmente en el HCR. Los resultados revelan que a los 90 días la hidratación del cemento ha logrado sellar los poros de la pasta de manera que se obtiene un material con una baja permeabilidad, sin embargo con un curado de 365 días se obtendrían valores de permeabilidad aun menores, lo que significa que los valores obtenidos son conservadores.

10.9. Correlación entre la velocidad de pulso ultrasonico y las propiedades mecánicas del HCR.

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

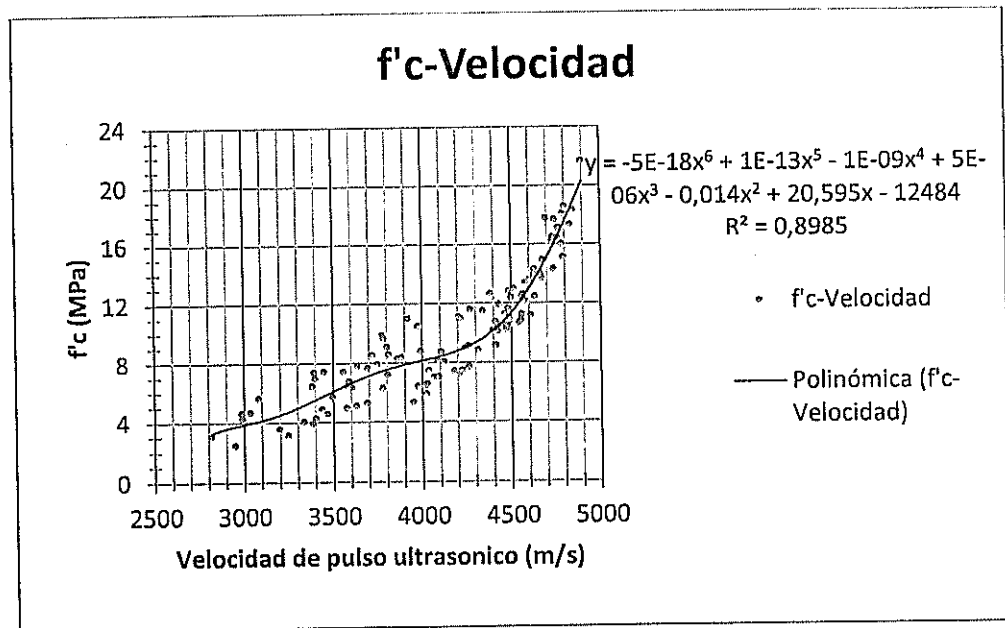


Figura 10.16 Correlacion entre resistencia a la compresion simple y velocidad de pulso ultrasonico.

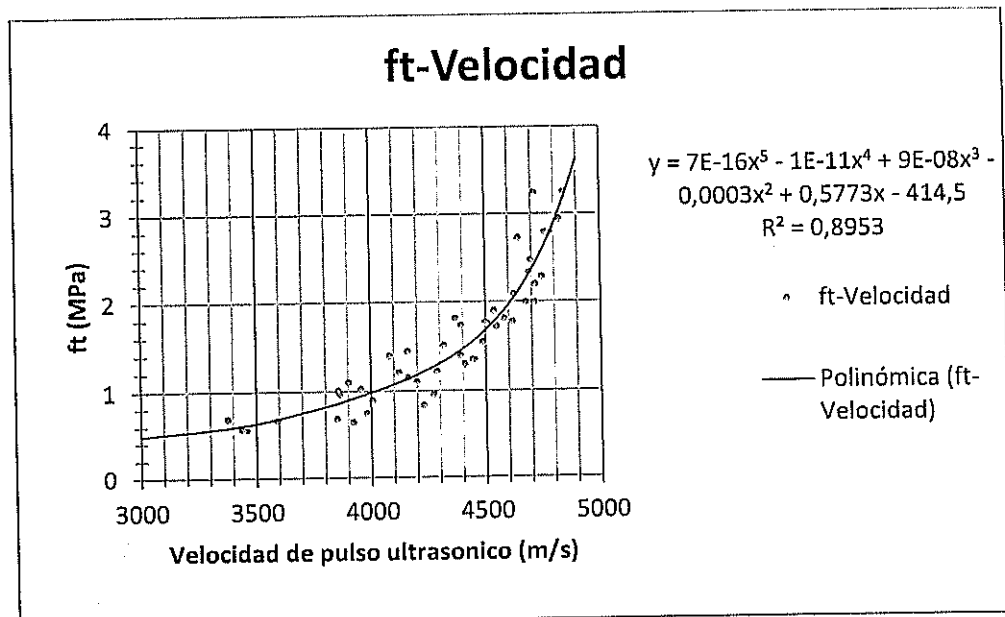


Figura 10.17 Correlacion entre resistencia a la traccion indirecta y velocidad de pulso ultrasonico.

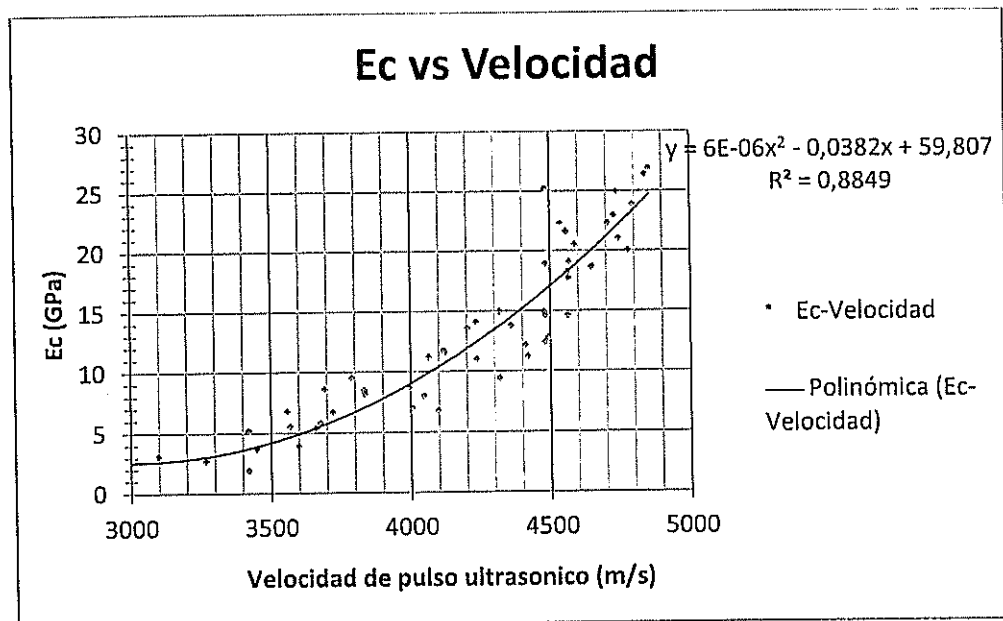


Figura 10.18 Correlacion entre modulo de elasticidad y velocidad de pulso ultrasonico.

Analisis de resultados.

En las correlaciones obtenidas entre la velocidad de pulso ultrasonico y las propiedades mecanicas del HCR se obtuvieron coeficientes de correlacion mayores a 0.88 los cuales se consideran elevadas tomando en cuenta que al momento realizar el ensayo se aplica una presion variable a los transductores. Los resultados muestran que los datos tienen un mejor ajuste para velocidades de pulso ultrasonico mayores a 4500 m/s especialmente en resistencia a la compresion simple y resistencia a la traccion indirecta; por otro lado cabe destacar que las correlaciones se obtuvieron en muestras saturadas, las cuales

presentan una mayor velocidad de pulso ultrasonico que las muestras secas.

10.10. Variación de la velocidad de pulso ultrasónico en los cilindros.

A continuación se muestra los valores de velocidad de pulso ultrasónico promedio obtenidos en el centro y extremos de los cilindros preparados con el cemento HE-95 kg/m³.

Cemento HE (95 kg/m ³)						
Velocidad centro (m/s)	Velocidad centro (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	edad (días)
3608	3669	3686	3673	3740	3704	3
3745	3796	3863	3773	3829	3782	7
4232	4244	4352	4322	4238	4232	14
4405	4470	4577	4512	4592	4450	28
4508	4549	4697	4556	4508	4502	56
4762	4747	4777	4808	4839	4770	90
4773	4736	4810	4848	4803	4795	180

Tabla 10.6 Velocidad de pulso ultrasónico promedio obtenida en los extremos y en el centro de las muestras preparadas con cemento HE-95 kg/m³.⁵

⁵ En el apéndice D se muestran las tablas correspondientes a los cemento HE, GU y MH con contenidos de cemento de 75-95-105 kg/m³.

Como se puede apreciar en la tabla 10.6 los valores de velocidad de pulso ultrasónico en el centro de las muestras son menores que en los extremos, lo cual ha sido una constante que se ha observado en todos los cilindros a los cuales se realizó el ensayo de pulso ultrasónico. Aunque la variación de la velocidad de pulso ultrasónico no es mayor al 3%, los resultados demuestran que durante la elaboración de los cilindros el material se ha consolidado ligeramente mejor en los extremos de los cilindros, lo cual ha sido detectado únicamente mediante el ensayo de pulso ultrasónico.

CAPITULOS 11

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

11.1. Conclusiones.

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

reacciona ante los álcalis de los mismos, por lo que también se la considera idónea para utilizarse en la elaboración del HCR.

- ✓ Para contenidos de cemento entre 75 y 105 kg/m³ y con el arreglo granular propuesto para los agregados, la humedad óptima para compactar el material, es alrededor del 5.1 %, independiente del tipo y contenido de cemento utilizado.
 - ✓ La utilización de filler con el fin de obtener un contenido de finos (material pasante el tamiz No 200) mayor al 5% (con respecto al peso de los agregados), ha logrado proveer una adecuada trabajabilidad a las mezclas de tal manera que en ningún cilindro se presentaron oquedades causadas por una deficiencia de finos.
 - ✓ Los procedimientos que se implementaron para la elaboración de los cilindros requeridos para el estudio de las propiedades mecánicas del HCR son los adecuados para trabajar con volúmenes de material relativamente grandes (160 dm³) pues las densidades obtenidas en los cilindros así lo corroboran; así mismo mediante el equipo de pulso ultrasónico se ha podido detectar las pequeñas variaciones en la proporción de vacíos existentes en los cilindros, lo cual muestra la
-

exactitud con la cual el equipo de ultrasonido puede medir estas variaciones y por lo tanto la importancia del uso del equipo de pulso ultrasónico durante este tipo de investigaciones.

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

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

 - ✓ Mediante el procedimiento de curado acelerado la resistencia a la compresión simple se estima con mayor precisión que el modulo de
-

elasticidad, por lo que los valores de modulo de elasticidad obtenidos de muestras sujetas a este procedimiento deben tomarse como conservadores.

- ✓ Se obtuvieron excelentes coeficientes de correlación para las correspondencias entre las propiedades mecánicas del HCR independientemente del tipo o contenido de cemento utilizado, lo que nos indica un adecuado procedimiento de elaboración y ensaye de especímenes en el laboratorio.
 - ✓ Los análisis de ductilidad muestran que el material tiene una ductilidad que oscila entre 10 y 25, la que varía en el tiempo y cuyos máximos valores se alcanzan durante los 28 y 90 días después de elaborados los cilindros, pudiéndose asumir conservadoramente como 10 para propósitos de diseño.
 - ✓ El tiempo máximo de trabajabilidad del HCR es de aproximadamente 2 horas bajo condiciones temperatura y humedad de 24 °C y 92% respectivamente, el cual se puede reducir dependiendo de las condiciones ambientales de trabajo; Los resultados de este estudio demuestran que la manera más adecuada de determinar el tiempo
-

máximo de trabajabilidad del HCR es mediante el uso del equipo de pulso ultrasónico y no mediante ensayos de resistencia a la compresión simple.

- ✓ Las correlaciones obtenidas entre la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión simple, modulo de elasticidad y resistencia a la tracción indirecta muestran un factor de correlación aceptable (mayor a 0.88) obteniéndose mayor precisión en las correlaciones para valores de velocidad de pulso ultrasónico mayores a 4500 m/s.
 - ✓ El coeficiente de dilatación térmica y la conductividad térmica del material son $7 \times 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ y $1.75 \text{ J/s m } ^{\circ}\text{C}$ respectivamente.
 - ✓ Los ensayos de permeabilidad al aire muestran que el material tiene un adecuado nivel de durabilidad en medios agresivos debido a que por su baja permeabilidad no permite el paso de sustancias dañinas.
 - ✓ Las mezclas preparadas con los cementos tipo HE y GU con contenidos de 75-95-105 kg/m^3 satisfacen los requerimientos de resistencia a la compresión simple y modulo de elasticidad establecidos para la presa "Chontal", por lo que ambos tipos de
-

cemento pueden utilizarse para la elaboración del HCR; sin embargo la mayor eficiencia (valor de resistencia mecánica o modulo de elasticidad producido por cada kilogramo de cemento en la mezcla) se logra con el cemento tipo HE, lo cual lo convierte en el mas ocionado para ser utilizado en la elaboración del HCR, dependiendo únicamente de la economía del proyecto.

11.2. Recomendaciones.

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

BIBLIOGRAFIA

1. ACI Roller-Compacted Mass Concrete, ACI 207.5R-99 [Libro]. - 1999.
 2. ASTM ASTM 04.02 Concrete and Aggregates. - 2011.
 3. DUNSTAN Proc. 4th. Int. Symp. on Roller Compacted Concrete (RCC) [Conferencia] // The State of the Art of RCC Dams in 2003 – An Update of ICOLD Bulletin N° 125. - España, 2003. - págs. 39-48.
 4. E.M.TUCCI CARLOS Plan de manejo integrado de los Recursos Hidricos en la Cuenca alta del rio Guayllabamba [Informe]. - Quito, 2009.
 5. E.P. HIDROEQUINOCCIO Proyecto hidroelectrico Chontal-Diseño de licitacion [Informe]. - Quito, 2011.
 6. HANSEN KENNETH y REINHARDT WILLIAM. Roller-Compacted Concrete Dams. aut. libro Hansen Kenneth y Reinhardt William.. - USA. : McGraw-Hill., 1991.
 7. HARVEY J.C Geologia para ingenieros Geotecnicos [Libro]. - Mexico-España : grupo Noriega, 1987.
 8. HIDROEQUINOCCIO [En línea] // HIDROEQUINOCCIO. - 2010. - MARTES de DICIEMBRE de 2011. - <http://heq.com.ec>.
-

9. INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACION (INEN) Normas técnicas ecuatorianas NTE INEN cemento, cal y yeso. - 2011.
 10. INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACION (INEN) Normas técnicas ecuatorianas NTE INEN hormigon, áridos y morteros. - 2011.
 11. IZA MANOBANDA DARWIN IVAN Tesis de Grado (Facultad de ingeniería en ciencias de la tierra-ESPOL). // Hormigón Liviano con Agregado de Origen Volcánico y Aditivo Incorporador de Aire. - Guayaquil. 2009.
 12. LOPEZ ING. JOSE Procedimiento para el ensayo de curado acelerado aplicado al Concreto Compactado con Rodillo (CCR) [Informe]. - Guayaquil (Centro técnico del hormigon), 2011.
 13. PETROECUADOR ANALISIS PETROGRAFICO [Informe]. - Guayaquil (Centro técnico del hormigon), 2010.
 14. SARGENT-WELCH sargentwelch [En línea]. - 12 de septiembre de 2011. - <http://sargentwelch.com/info.asp?ii=449>.
 15. SCHRADER Dr. ERNEST Chontal Dam RCC Production Schedule & Thermal Analysis [Informe]. - Guayaquil (Centro técnico del Hormigon), 2011.
 16. SCHRADER Dr. ERNEST SpecGrad.doc [Informe]. - Guayaquil (Centro técnico del Hormigon), 2010.
 17. SEARS, ZEMANSKY, YOUNG. Física Universitaria. Editorial Fondo Educativo Interamericano (1986).
 18. LESLIE Y CHEESMAN. Ingeniería de construcción UCV. [Grupo de hormigon]. Tecnología del hormigon.
-

APENDICE A

TABLAS DE ARREGLOS GRANULOMÉTRICOS.

En este apéndice se muestran las tablas de las granulometrías de todos los arreglos granulométricos que se desarrollaron en este trabajo.

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.	---	---	---	---
25 mm	1 in.	0,0	0	0	100
19 mm	¾ in.	7,8	0	0	100
12.5 mm	½ in.	---	---	---	---
9.5 mm	3/8 in.	4363,5	73	73	27
4,75 mm	No. 4	1583,7	26	99	1
2,36 mm	No. 8	9,7	0	99	1
1,18 mm	No. 16	---	---	---	---
600 µm	No. 30	---	---	---	---
300 µm	No. 50	---	---	---	---
150 µm	No. 100	---	---	---	---
BANDEJA		33,6	1	100	0
Módulo de finura:				6,7	

Tabla A.1 Gradación granulométrica de la Piedra No 67.

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.	3577,0	22	22	78
19 mm	¾ in.	8025,4	50	72	28
12.5 mm	½ in.	4363	27	99	1
9.5 mm	3/8 in.	32,6	0	99	1
4,75 mm	No. 4	---	---	---	---
2,36 mm	No. 8	---	---	---	---
1,18 mm	No. 16	---	---	---	---
600 µm	No. 30	---	---	---	---
300 µm	No. 50	---	---	---	---
150 µm	No. 100	---	---	---	---
BANDEJA		122,7	1	100	0
Módulo de finura:				7,7	

Tabla A.2 Gradación granulométrica de la Piedra No 5.

Granulometría del agregado fino INEN 696 (ASTM C 448)					
TAMIZ		Retenido parcial (g)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante acumulado (%)
INEN	ASTM				
9,50 mm	3/8 in.	0,0	0	0	100
4,75 mm	No. 4	115,2	12	12	88
2,36 mm	No. 8	244,2	24	36	64
1,18 mm	No. 16	163,4	16	52	48
600 µm	No. 30	115,6	12	64	36
300 µm	No. 50	102,6	10	74	26
150 µm	No100	109,7	11	85	15
BANDEJA		148,7	15	100	0
MÓDULO DE FINURA :				3,2	

Tabla A.3 Gradación granulométrica de la Arena Triturada.

Granulometría del agregado fino INEN 696 (ASTM C 448)					
TAMIZ		Retenido parcial (g)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante acumulado (%)
INEN	ASTM				
9,50 mm	3/8 in.	64,6	9	9	91
4,75 mm	No. 4	50,0	7	16	84
2,36 mm	No. 8	45,7	7	23	77
1,18 mm	No. 16	66,8	10	33	67
600 µm	No. 30	110,0	16	48	52
300 µm	No. 50	156,3	22	71	29
150 µm	No100	110,7	16	87	13
BANDEJA		94,3	13	100	0
MÓDULO DE FINURA :				2,9	

Tabla A.4 Gradación granulométrica de la Arena Natural.

Gradación granulométrica propuesta para el HCR.		
Tamiz		Pasante acumulado (%)
INEN	ASTM	
100 mm	4 in.	100,0
90 mm	3½ in.	100,0
75 mm	3 in.	100,0
63 mm	2½ in.	100,0
50 mm	2 in.	100,0
37.5 mm	1½ in.	100,0
25 mm	1 in.	88,6
19 mm	¾ in.	71,8
12.5 mm	½ in.	56,4
9.5 mm	3/8 in.	49,2
4,75 mm	No. 4	40,2
2,36 mm	No. 8	32,1
1,18 mm	No. 16	26,0
600 µm	No. 30	20,2
300 µm	No. 50	13,6
150 µm	No. 100	7,8
75 µm	No. 200	5,1
BANDEJA		0
Módulo de finura :		5,1

Tabla A.5 Gradación granulométrica propuesta para el HCR (capítulo 5).

Gradación granulométrica propuesta para estudio de propiedades térmicas del HCR.		
Tamiz		Pasante acumulado (%)
INEN	ASTM	
100 mm	4 in.	100,0
90 mm	3½ in.	100,0
75 mm	3 in.	100,0
63 mm	2½ in.	100,0
50 mm	2 in.	100,0
37.5 mm	1½ in.	100,0
25 mm	1 in.	78,1
19 mm	¾ in.	69,2
12.5 mm	½ in.	61,8
9.5 mm	3/8 in.	52,5
4,75 mm	No. 4	42,0
2,36 mm	No. 8	33,4
1,18 mm	No. 16	27,0
600 µm	No. 30	20,9
300 µm	No. 50	14,1
150 µm	No. 100	8,1
75 µm	No. 200	5,1
BANDEJA		0
Módulo de finura :		5,3

Tabla A.6 Gradación granulométrica propuesta para estudio de propiedades térmicas del HCR.

APENDICE B

**RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS DEL HCR.**

Mezcla	Tipo y contenido de cemento	Contenido de agua (SSS)		Temperatura de trabajo (C)		Densidad real de mezcla			Tiempo Vebé* (Seg.)			Densidad de cilindros (kg/m ³)		Edad (días)	F _c (MPa)			Modulo secante* (GPa)				
		(kg)	Humedad(%)	Mezcla	Ambiente		(kg/m ³)	1st	2nd	3rd	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3		Promedio	Cilindro 3	25% fc	40% fc	50% fc	75% fc	100% fc	
D1	Cemento HE (75 kg/m ³)	125	5,4%	27	25	2508	18,5	28	70	2552	2477	3	7,0	5,7	6,3	0,75	5,9	3,7	3,0	1,9	1,0	
										2498	2491	7	6,4	7,4	6,9	0,80	5,7	5,5	4,2	2,2	0,9	
										2507	2494	14	8,2	8,8	8,5	0,97	10,8	6,8	5,1	2,6	1,1	
										2523	2478	28	10,2	9,0	9,6	1,40	14,9	9,4	7,0	3,7	1,7	
										2515	2515	56	10,9	11,9	11,4	1,75	17,5	12,8	9,8	5,1	2,1	
										2504	2524	90	11,3	12,6	12,0	2,00	24,6	18,2	14,4	7,0	2,4	
										2518	2505	180	15,1	13,9	14,5	2,34	27,0	20,2	16,4	8,9	2,7	
										2476	2487	365 (CA)	14,8	15,3	15,0	2,91	21,2	16,8	13,9	7,2	2,2	
										2516	2511	3	7,9	7,7	7,8	0,99	10,3	6,7	5,1	2,3	0,8	
										2520	2490	7	10,0	9,1	9,5	1,18	13,1	9,5	7,6	4,4	1,4	
										2522	2473	14	11,5	11,1	11,4	1,37	15,1	11,0	9,0	5,3	1,3	
										2483	2486	28	10,6	12,8	11,7	1,55	20,3	14,9	12,3	6,9	2,5	
										D2	Cemento HE (65 kg/m ³)	125	5,4%	27	2558	19	37	75	2474	2479	56	12,2
2509	2551	90	13,5	16,0	14,8	2,50	27,8	22,2	18,3										11,2	3,9		
2531	2512	180	18,3	17,3	17,8	2,94	31,7	26,4	23,0										14,6	5,0		
2490	2523	365 (CA)	16,0	20,5	18,2	3,31	24,5	19,8	17,5										11,1	3,7		
2518	2554	3	8,4	9,7	9,0	1,00	12,7	8,5	6,9										3,7	1,3		
2552	2500	7	11,0	10,5	10,8	1,45	15,4	11,7	9,9										6,1	2,0		
2480	2509	14	11,5	12,7	12,1	1,82	18,5	13,8	11,6										6,9	2,3		
2453	2453	28	12,4	12,4	12,4	1,79	22,0	17,7	15,3										9,8	4,7		
2491	2491	56	16,2	16,5	16,4	2,30	26,6	21,0	18,1										11,4	3,7		
2486	2501	90	18,1	18,6	18,4	2,79	30,2	23,8	20,6										13,1	3,5		
2547	2547	180	21,7	21,7	21,7	3,25	32,1	26,9	23,7										15,9	5,4		
2499	2498	365 (CA)	21,1	21,7	21,4	3,80	28,7	23,2	20,5										14,5	7,0		

Tabla B.1 Resultados del estudio de las propiedades mecánicas del HCR obtenidos con el cemento HE.

*Ensayo Yebe con una sobrecarga normalizada de 22,7 kg.

**El módulo secante es el promedio del cilindro 1 y el cilindro 2.

Mezcla	Tipo y contenido de cemento	Contenido de agua (SSS) (kg)	Humedad(%)	Temperatura de trabajo		Densidad real de mezcla (kg/m ³)	Tiempo Yebe*		Densidad de cilindros		Edad (días)	F _c (MPa)			Módulo secante ¹ (GPa)																				
				Mezcla	Ambiente		1st	2nd	3rd	Cilindro 1		Cilindro 2	Cilindro 1	Cilindro 2	Promedio	Cilindro 3	25% f _c	40% f _c	50% f _c	75% f _c	100% f _c														
D4	Cemento GU (75 kg/m ³)	122	5,3%	26	25	2570	20	36	2862	2827	3	4,7	6,3	6,3	6,3	5,2	0,69	6,3	3,1	2,2	1,1	0,6													
																							2487	2843	7	6,4	7,5	7,1	7,3	0,76	11,7	5,8	4,2	2,0	0,8
																							2489	2515	14	7,5	7,1	7,3	0,96	16,9	11,2	8,1	3,4	1,1	
																							2510	2508	28	7,3	7,7	7,5	10,0	21,3	14,5	10,7	4,7	1,5	
																							2508	2491	56	10,1	9,9	11,5	11,5	24,2	16,7	14,9	7,2	1,9	
																							2492	2503	90	10,7	12,2	13,8	13,5	2,1	23,8	20,4	17,1	10,0	3,7
																							2510	2519	180	13,4	13,8	14,3	14,3	1,9	18,1	17,3	16,0	9,8	6,6
																							2517	2517	365 (C.A.)	14,9	13,7	14,3	14,3	1,1	8,6	5,2	3,9	2,3	1,0
																							2501	2487	3	6,5	5,0	6,7	6,7	1,1	10,4	8,2	6,2	2,9	1,1
																							2492	2525	7	7,8	8,6	8,2	8,2	1,1	15,6	11,5	9,0	4,4	1,6
D5	Cemento GU (85 kg/m ³)	122	5,2%	27	25	2555	21	33	2492	2493	14	11,0	10,5	10,6	10,6	10,0	1,2	15,6	11,5	9,0	4,4	1,6													
																							2497	2523	28	10,8	10,5	11,2	12,1	1,8	23,3	18,6	15,4	8,6	2,8
																							2471	2497	56	13,0	11,2	12,1	13,8	2,20	28,4	22,2	18,0	9,4	2,6
																							2518	2507	90	13,7	13,9	17,5	17,5	2,80	29,5	23,4	19,8	12,5	4,2
																							2510	2510	180	17,1	17,8	17,5	17,5	2,85	23,9	19,5	16,9	10,5	4,3
																							2468	2520	365 (C.A.)	17,0	17,5	17,24	17,24	0,91	10,5	6,8	5,1	2,4	1,0
																							2548	2514	4	7,5	7,4	7,4	7,4	1,09	12,4	8,6	6,6	3,6	1,4
																							2454	2502	7	8,6	8,3	8,5	8,5	1,11	15,3	11,2	9,0	4,0	1,7
																							2478	2473	14	8,1	8,1	11,1	11,1	1,35	19,2	14,1	11,3	6,2	1,8
																							2454	2482	28	11,5	10,5	13,2	13,2	1,90	25,2	18,9	15,5	8,5	1,9
D6	Cemento GU (105 kg/m ³)	122	5,2%	27	25	2542	20	37	2502	2475	56	14,0	14,9	14,6	14,6	17,1	3,24	29,8	24,9	21,9	14,3	4,5													
																							2487	2488	90	14,3	14,9	17,1	17,1	3,15	18,7	15,3	10,3	2,8	
																							2506	2455	180	16,5	17,8	17,1	17,1	3,15	18,7	15,3	10,3	2,8	
																							2511	2537	365 (C.A.)	16,7	18,6	17,6	17,6	3,15	18,7	15,3	10,3	2,8	

Tabla B.2 Resultados del estudio de las propiedades mecánicas del HCR obtenidos con el cemento GU.

*Ensayo Veba con una sobrecarga normalizada de 22.7 kg.

*El módulo secante es el promedio del cilindro 1 y el cilindro 2.

Mezcla	Tipo y contenido de cemento	Contenido de agua (SSS) (kg)	Humedad(%)	Temperatura de trabajo Mezcla	Ambiente	Densidad real de mezcla (kg/m ³)	Tiempo Veba*			Densidad de cilindros		Edad (días)	F _c (MPa)			Módulo secante* (GPa)					
							1st	2nd	3rd	Cilindro 1	Cilindro 2		Cilindro 1	Cilindro 2	Promedio	Cilindro 3	25% f _c	40% f _c	50% f _c	75% f _c	100% f _c
D7	Cemento MH (75 kg/m ³)	120	5.2%	27	25	2531	22	36		2462	2477	3	2.5	3.1	2.8	2.9	1.3	0.5	0.4	0.3	
										2506	2439	8	4.1	3.5	3.8	4.8	1.9	1.2	0.6	0.3	
										2506	2453	14	5.1	5.3	5.2	6.2	3.9	2.5	1.2	0.6	
										2505	2522	28	6.4	6.5	6.4	7.2	5.1	1.9	0.9		
										2463	2507	55	7.4	7.0	7.2	1.15	16.0	12.1	9.2	5.1	1.1
										2486	2480	80	9.7	7.9	8.8	0.97	17.2	12.4	9.7	4.1	1.4
										2500	2458	100	8.9	9.1	9.0	1.52	17.3	12.2	9.2	4.4	1.9
										2540	2475	355 (c.a.)	12.8	13.1	12.9	1.90	16.0	13.0	11.0	6.2	1.9
										2494	2490	3	4.3	4.7	4.5	0.47	3.6	1.5	1.0	0.6	0.3
										2510	2453	7	4.3	4.9	4.6	0.56	6.0	2.7	1.8	0.9	0.5
D8	Cemento MH (65 kg/m ³)	122	5.2%	27	25	2569	21	35	78	2479	2499	14	5.3	5.9	5.6	9.9	5.4	3.3	1.3	0.6	
										2479	2477	25	7.0	6.6	6.8	14.4	8.7	5.9	2.1	0.8	
										2509	2511	56	9.2	9.1	9.2	1.22	16.5	10.2	4.4	1.4	
										2468	2496	90	10.3	11.0	10.7	1.74	21.4	15.0	11.6	5.3	1.5
										2507	2495	180	11.3	12.3	11.8	1.73	25.2	20.7	17.0	8.4	1.9
										2480	2478	365 (c.a.)	13.6	13.6	13.6	2.20	19.0	15.0	13.1	8.0	2.3

Tabla B.3 Resultados del estudio de las propiedades mecánicas del HCR obtenidos con el cemento MH.

APENDICE C

**TABLA DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE
COEFICIENTE DE DILATACIÓN TÉRMICA Y
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL HCR.**

Coeficiente de dilatación térmica.

Temperatura (°C)	Deformación Unitaria
24,3	0,00000
70,4	0,00028
64,6	0,00025
57,3	0,00024
52,6	0,00023
46,6	0,00014
40,6	0,00011
35,8	0,00004
31,2	0,00006

Tabla C.1 Resultados para barra-uno.

Temperatura (°C)	Deformación Unitaria
24,3	0,00000
69,6	0,00035
65,1	0,00023
58,0	0,00021
52,6	0,00014
46,6	0,00010
40,6	0,00001
35,7	0,00001
31,2	-0,00006

Tabla C.2 Resultados para barra-dos.

Conductividad Térmica.

Tiempo (s)	(log (i)) (A)
54,0	-6,52288
60,0	-6,39794
75,0	-6,30103
84,0	-6,22185
87,0	-6,15490
91,8	-6,09691

Tabla C.3 Resultados para disco-uno

Tiempo (s)	(log (i)) (A)
48,0	-6,52288
60,0	-6,39794
78,0	-6,30103
84,0	-6,22185
88,0	-6,15490
92,0	-6,09691

Tabla C.4 Resultados para disco-dos

APENDICE D

**RESULTADOS DEL ENSAYO DE VELOCIDAD DE
PULSO ULTRASONICO.**

En este apéndice se muestran las tablas con los resultados de la velocidad de pulso ultrasónico obtenidas en los diferentes puntos de los cilindros evaluados para cada tipo y contenido de cemento utilizado.

Cemento HE

Cemento HE (75 kg/m ³)						
Velocidad centro (m/s)	Velocidad centro (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	edad (días)
3445	3442	3457	3583	3566	3560	3
3473	3570	3600	3647	3682	3608	7
4073	4010	4161	4116	4100	4089	14
4334	4353	4429	4397	4436	4429	28
4347	4397	4455	4469	4462	4449	56
4502	4522	4590	4625	4556	4640	90
4613	4550	4794	4742	4613	4676	180

Tabla D.1 Velocidad de pulso ultrasónico promedio obtenidas en los extremos y en el centro de las muestras preparadas con cemento HE-75 kg/m³.

Cemento HE (95 kg/m ³)						
Velocidad centro (m/s)	Velocidad centro (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	edad (días)
3608	3669	3686	3673	3740	3704	3
3745	3796	3863	3773	3829	3782	7
4232	4244	4352	4322	4238	4232	14
4405	4470	4577	4512	4592	4450	28
4508	4549	4697	4556	4508	4502	56
4762	4747	4777	4808	4839	4770	90
4773	4736	4810	4848	4803	4795	180

Tabla D.2 Velocidad de pulso ultrasónico promedio obtenida en los extremos y en el centro de las muestras preparadas con cemento HE-95 kg/m³.

Cemento HE (105 kg/m ³)						
Velocidad centro (m/s)	Velocidad centro (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	edad (días)
3826	3865	3930	3875	3910	3925	3
3926	3941	3997	4028	4002	4023	7
4331	4368	4406	4470	4344	4400	14
4464	4464	4517	4537	4544	4477	28
4742	4742	4772	4779	4810	4720	56
4779	4772	4810	4810	4825	4864	90
4847	4886	4894	4902	4886	4983	180

Tabla D.3 Velocidad de pulso ultrasónico promedio obtenida en los extremos y en el centro de las muestras preparadas con cemento HE-105 kg/m³.

Cemento GU

Cemento GU (75 kg/m ³)						
Velocidad centro (m/s)	Velocidad centro (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	edad (días)
2927	3001	3053	3074	3154	3013	3
3731	3731	3796	3848	3768	3805	7
3992	4078	4100	4050	4078	3986	14
4194	4148	4247	4206	4182	4265	28
4413	4419	4426	4413	4426	4446	56
4513	4519	4588	4587	4533	4580	90
4534	4589	4653	4624	4617	4610	180

Tabla D.4 Velocidad de pulso ultrasónico promedio obtenida en los extremos y en el centro de las muestras preparadas con cemento GU-75 kg/m³.

Cemento GU (95 kg/m ³)						
Velocidad centro (m/s)	Velocidad centro (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	edad (días)
3275	3397	3293	3427	3416	3487	3
3701	3760	3701	3751	3756	3657	7
4175	4233	4170	4257	4175	4222	14
4399	4380	4425	4412	4412	4450	28
4487	4507	4568	4520	4500	4520	56
4663	4649	4656	4685	4743	4656	90
4630	4666	4747	4703	4732	4717	180

Tabla D.5 Velocidad de pulso ultrasónico promedio obtenida en los extremos y en el centro de las muestras preparadas con cemento HE-95 kg/m³.

Cemento GU (105 kg/m ³)						
Velocidad centro (m/s)	Velocidad centro (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	edad (días)
3336	3458	3344	3392	3392	3438	3
3815	3888	3943	3878	3834	3825	7
4058	4058	4136	4136	4210	4153	14
4378	4475	4556	4482	4475	4542	28
4623	4637	4703	4659	4666	4703	56
4608	4664	4744	4657	4736	4664	90
4637	4666	4808	4808	4823	4740	180

Tabla D.6 Velocidad de pulso ultrasónico promedio obtenida en los extremos y en el centro de las muestras preparadas con cemento GU-105 kg/m³

CEMENTO MH

Cemento MH (75 kg/m ³)						
Velocidad centro (m/s)	Velocidad centro (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	edad (días)
2902	2964	3025	2949	2964	2907	3
3235	3255	3414	3333	3452	3455	7
3519	3594	3740	3736	3577	3568	14
3960	3997	4056	4072	4018	4002	28
4128	4179	4255	4273	4279	4261	56
4265	4295	4270	4357	4332	4364	90
4190	4196	4316	4261	4279	4310	180

Tabla D.7 Velocidad de pulso ultrasónico promedio obtenida en los extremos y en el centro de las muestras preparadas con cemento MH-75 kg/m³.

Cemento MH (95 kg/m³)						
Velocidad centro (m/s)	Velocidad centro (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	Velocidad extremos (m/s)	edad (días)
2995	2945	2914	3015	2923	3027	3
3396	3344	3466	3366	3462	3462	7
3963	3989	4130	4091	4026	4010	14
4036	4026	4112	4112	4068	4068	28
4345	4376	4370	4480	4428	4441	56
4437	4510	4537	4418	4530	4510	90
4474	4447	4575	4447	4541	4520	180

Tabla D.8 Velocidad de pulso ultrasónico promedio obtenida en los extremos y en el centro de las muestras preparadas con cemento MH-95 kg/m³.