

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

“Control de Calidad y Caracterización de Materiales de Hormigón

Compactado con Rodillo (HCR) Utilizado en el Proceso

Constructivo en la Presa Manduriacu

(Guayllabamba – Pichincha –Ecuador)”

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO CIVIL

Presentada por:

Wilson Wladimir Carofilis Gallo

Samantha Elizabeth Hidalgo Astudillo

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2013

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Hugo Egüez por ser el mentor en la inicialización de este trabajo, al Ing. Cristian Velasco por el sacrificio y dedicación como tutor de tesis, a los técnicos del CTH por la ayuda y consejos brindados, a mis padres por saber apoyarme y darme palabras de aliento en cada etapa de mi vida.

Wilson Carofilis

AGRADECIMIENTOS

A Dios por bendecirme para llegar hasta donde he llegado, al Ing. Hugo Egüez por ser el mentalizador y ayudarnos con los medios necesarios para realizar este trabajo, al Ing. Cristian Velasco por la paciencia y dedicación de continuar con el desarrollo de la investigación hasta el final, a mis padres y hermanas que de una u otra forma estuvieron presentes apoyándonos en todo momento y a Wilson Carofilis por motivarme a ser mejor cada día y nunca rendirme.

Samantha Hidalgo

DEDICATORIA

El presente trabajo va dedicado a las personas que de una manera u otra manera he quedado agradecido en el transcurso de mi formación superior:

Mis padres

Hermanos

Ing. Cristian Velasco

Ing. Martha Caballero

Samantha Hidalgo

Amigos

Wilson Carofilis

DEDICATORIA

A mis padres que su dedicación, valores y consejos dan frutos a través de este trabajo que representa la culminación de mi carrera, a mis abuelitos y abuelitas que siempre estuvieron motivándome y deseándome lo mejor, aunque no todos estén conmigo hoy, a mis hermanas, primos, amigos, que siempre estuvieron presentes durante todos estos años y a la Ingeniería porque es mi pasión.

Samantha Hidalgo

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Cristian Velasco
DIRECTOR DE TESIS

Ph.D. Pedro Rojas
VOCAL

Msc. Alby Aguilar
ALTERNA

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral”.

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

Wilson Carofilis G.

Samantha Hidalgo A.

RESUMEN

El presente trabajo consiste en el control de calidad y caracterización de agregados provenientes de las cercanías del proyecto hidroeléctrico Manduriacu, frontera entre las provincias de Pichincha e Imbabura, para ello se realizaron ensayos normalizados a fin de conocer la idoneidad de estos materiales y obtener su máximo provecho.

Caracterizados los agregados se diseñaron curvas granulométricas y pruebas de densidad con la finalidad de establecer diseños de Hormigón Compactado con Rodillo con distintos tipos y cantidades de cemento puzolánicos (HE, GU y MH), para posteriormente evaluar el desempeño de estas mezclas tanto en estado fresco como en estado endurecido mediante la ejecución de ensayos destructivos (compresión simple, tracción por compresión diametral, módulo elasticidad secante a distintos niveles de carga) ensayados en probetas cilíndricas de 150x300 mm a diferentes edades, de tal manera que se tenga un registro del desempeño mecánico de las distintas mezclas de hormigón, coeficiente de dilatación térmica y adicionalmente establecer correlaciones que permitan evaluar el HCR mediante ensayos no destructivos como la velocidad de pulso ultrasónico.

Para garantizar la competencia de las mezclas también se presentan los controles de calidad que se deberían seguir en cada una de las etapas del proceso constructivo de la presa, con la finalidad de asegurar las propiedades del Hormigón Compactado con Rodillo.

Este estudio no puede ser considerado como un documento preliminar o definitivo del proyecto respecto a los diseños de mezcla; sin embargo esta información puede ser empleada como un apoyo al proyecto.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	IV
SIMBOLOGÍA.....	V
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
ÍNDICE DE FORMULAS.....	VIII

CAPÍTULO 1.

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	2
1.2. OBJETIVOS.....	4
1.2.1. Objetivos Generales.....	4
1.2.2. Objetivos Específicos.....	4
1.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL HCR USADO EN PRESAS.....	5
1.4. METODOLOGÍA DEL TRABAJO Y ALCANCE.....	7

CAPÍTULO 2.

2. DESCRIPCIÓN PROYECTO MANDURIACU, PROCESO DE ABASTECIMIENTO DE MATERIALES PÉTREOS. 8

- 2.1. GENERALIDADES PROYECTO PRESA MANDURIACU.9
 - 2.1.1. Ubicación Geográfica. 9
 - 2.1.2. Descripción del Proyecto Presa Manduriacu. 9
- 2.2. DEFINICIÓN DE MATERIALES PÉTREOS A EMPLEAR. 12
 - 2.2.1. Agregados. 12
 - 2.2.2. Rocas. 12
 - 2.2.3. Clasificación de los Agregados. 13
- 2.3. FUENTE DE ABASTECIMIENTO DE AGREGADOS. 14

CAPÍTULO 3.

3. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS. 16

- 3.1. AGREGADOS EMPLEADOS EN HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO. 17
 - 3.1.1. Agregados Gruesos. 19
 - 3.1.2. Agregados Finos. 21
 - 3.1.3. Finos (Filler). 21
- 3.2. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS. 22
 - 3.2.1. Granulometría de Agregados. 22

3.2.2.	Trituración del Árido.	27
3.2.3.	Densidad.	29
3.2.4.	Absorción.	31
3.2.5.	Masas Unitarias/ Peso Volumétrico.....	33
3.2.6.	Impurezas Orgánicas.	35
3.2.7.	Reacción Alkali-Agregado.	39
3.2.8.	Resistencia a la Abrasión.....	42
3.3.	RESULTADOS DE ENSAYOS.	44
3.4.	ANALISIS DE RESULTADOS.	45
3.5.	ARREGLO GRANULOMÉTRICO ESCOGIDO.....	46

CAPÍTULO 4.

4. ESTUDIO PRELIMINAR Y DOSIFICACION DEL HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO.....17

4.1.	PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS EN LA ELABORACIÓN DE UNA MEZCLA DE HCR.	49
4.2.	MATERIALES EMPLEADOS PARA LA DOSIFICACIÓN DE HCR. 50	
4.2.1.	Agua.....	50
4.2.2.	Agregados.....	52
4.2.3.	Aditivos.....	52

4.2.4.	Cemento.....	53
4.2.5.	Cemento Portland.	53
4.2.6.	Cemento Puzolánico.	54
4.3.	TRABAJABILIDAD.....	55
4.4.	CONSISTENCIA.....	56
4.5.	MÉTODOS DE DISEÑO DE DOSIFICACIONES DE HCR.....	58
4.5.1.	Método del Cuerpo de Ingenieros.	59
4.5.2.	Método de Alto Contenido de Pasta.....	61
4.5.3.	Método de Presas de Hormigón Compactado.	61
4.5.4.	Método de Densidad Máxima.....	62
4.6.	METODOLOGÍA RECOMENDADA PARA OBTENER UNA MEZCLA DE PRUEBA.	63
4.7.	MEZCLA DE PRUEBA EN LABORATORIO.....	64
4.8.	ENSAYO DE CARACTERIZACIÓN DE MEZCLA.	65
4.9.	PROCEDIMIENTOS DE ELABORACIÓN DE MEZCLAS.....	65
4.10.	PROCESO PRELIMINAR.	67
4.10.1.	Curvas Densidad vs. Humedad.	67
4.10.2.	Descripción del Procedimiento de Elaboración de Mezclas... ..	75
4.10.3.	Dosificaciones Estudiadas.	80

4.10.4. Elaboración de Especímenes.	82
4.11. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	84

CAPÍTULO 5.

5. PROPIEDADES MECÁNICAS Y TÉRMICAS DEL HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO.....85

5.1. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HCR.	86
5.2. COMPORTAMIENTO DEL HCR EN ESTADO ENDURECIDO.	86
5.2.1. Resistencia a la Compresión (ASTM C 39M).....	87
5.2.2. Esfuerzo a la Tracción (ASTM C-496 96).....	88
5.2.3. Resistencia al Cortante.	89
5.2.4. Módulo de Elasticidad (ASTM C-496 87).	89
5.3. CAMBIOS DE VOLUMEN.....	90
5.3.1. Contracción Por Secado.	90
5.3.2. Capacidad de deformación por Tracción.....	90
5.4. PROPIEDADES TÉRMICAS.	91
5.4.1. Coeficiente de Dilatación.....	92
5.5. PERMEABILIDAD.....	92
5.6. DURABILIDAD.....	93
5.7. ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS.....	94

5.7.1. Ensayo a la Compresión Simple.	95
5.7.2. Ensayo de Módulo de Elasticidad.	98
5.7.3. Ensayo a la Tracción Por Compresión Diametral.....	100
5.7.4. Ensayo de Pulso Ultrasónico.	105
5.7.5. Ensayo de Coeficiente de Dilatación Térmica.....	108
5.8. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	113

CAPÍTULO 6.

6. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CORRELACIONES.114

6.1. RESULTADOS DE RESISTENCIAS.	115
6.1.1. Incremento de Resistencia a la Compresión Simple con el Tiempo.	115
6.1.2. Incremento de Resistencia a la Tracción por Compresión Diametral con el Tiempo.	117
6.1.3. Incremento del Módulo Secante con el Tiempo.	120
6.1.4. Variación del Módulo de Elasticidad.....	125
6.2. PRESENTACIÓN DE CORRELACIONES.....	127
6.2.1. Correlación entre la Resistencia a la Compresión Simple vs. La Resistencia a la Tracción por Compresión Diametral.....	127

6.2.2.	Correlación entre la Resistencia a la Compresión Simple vs. La Velocidad de Pulso Ultrasónico.....	128
6.2.3.	Correlación entre la Resistencia a la Tracción por Compresión Diametral vs. La Velocidad de Pulso Ultrasónico.....	129
6.2.4.	Correlación entre la Densidad vs. Tiempo de Trabajabilidad.	130
6.3.	EFICIENCIA VS. EDAD.....	131
6.4.	FORMULA PARA ESTIMAR E_c EN FUNCION DEL f'_c	133

CAPÍTULO 7.

7. FABRICACIÓN Y TRANSPORTE DEL HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO.....135

7.1.	FABRICACIÓN DEL HCR EN MASA.....	136
7.1.1.	Hormigón Fabricado en Central.	137
7.1.2.	Almacenamiento de Materias Primas.....	138
7.1.3.	Instalación de Dosificación.....	139
7.1.4.	Dosificación de Materias Primas.	141
7.2.	EQUIPOS DE MEZCLADO.....	143
7.3.	AMASADO.....	145
7.4.	HORMIGÓN FABRICADO EN PLANTAS MÓVILES.....	146
7.4.1.	Instalación de Planta Móvil para la Fabricación del HCR.....	147
7.5.	TRANSPORTE DEL HCR.....	151

7.5.1. Tipos de Transporte.....	152
7.6. MAQUINARIAS Y EQUIPOS PARA EL TRANSPORTE DEL HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO DE LA PLANTA A LA OBRA.....	155
7.6.1. Camiones Tolva.....	156
7.6.2. Cintas Transportadoras.....	157
7.6.3. Descripción General de las Cintas Transportadoras.....	159
7.6.4. Tractores.....	162
CAPÍTULO 8.	
8. PROCESO CONSTRUCTIVO DE PRESAS ELABORADAS CON HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO (HCR).....	163
8.1. Presa de Gravedad.....	164
8.2. Proceso Constructivo Presa de HCR - Método de Capa Extendida.	164
8.2.1. Transporte y Colocación.....	165
8.2.2. Colocación y Extensión.....	166
8.2.3. Minimizando la Segregación.....	170
8.3. MAQUINARIA Y EQUIPO EMPLEADO EN EL PROCESO CONSTRUCTIVO DE PRESAS ELABORADAS CON HCR.....	171
8.3.1. Rodillos Vibradores.....	171

8.3.2.	Velocidad de Rodillos.....	173
8.3.3.	Compactadoras Pequeñas.....	173
8.4.	COMPACTACIÓN.	175
8.4.1.	Pasadas Mínimas con el Rodillo Vibrante y Espesores de Capa..	178
8.5.	JUNTAS DE ELEVACIÓN.	181
8.5.1.	Avance de juntas Horizontales de Elevación.	182
8.5.2.	Tratamiento de Junta.	183
8.5.3.	Juntas de Construcción.....	185

CAPÍTULO 9.

9. CONTROL DE CALIDAD DEL HORMIGON COMPACTADO CON RODILLO.....186

9.1	ACTIVIDADES PREVIAS A LA COLOCACIÓN DE HCR.....	187
9.1.1.	Preliminares.	187
9.1.2.	Control de calidad durante la fabricación del HCR.....	188
9.1.3.	Determinación de la Densidad de Campo / Compactación.	190
9.2.	ACTIVIDADES DURANTE LA COLOCACIÓN DE HCR.....	191
9.2.1.	Ensayo de Materiales.....	193
9.2.2.	Cemento y Puzolana.....	193

9.2.3.	Aditivos.....	193
9.2.4.	Agregados.....	193
9.3.	EVALUACIÓN DE MEZCLAS DE HCR.	194
9.3.1.	Tipo Batch-Registros de la Planta y la Calibración.....	194
9.3.2.	Registros Continuos de la Planta de Mezcla y Calibración.	195
9.3.3.	Mezcla de Ensayo Variabilidad.	195
9.4.	Ensayos del HCR.	196
9.4.1.	Pruebas de Consistencias.....	196
9.4.2.	Densidad y Prueba de Vacíos.....	198
9.4.3.	Pruebas de Contenido de Agua y Humedad.	200
9.4.4.	Temperatura.....	202
9.4.5.	Especímenes de Ensayo.....	204
9.4.6.	Prueba de Resistencia.	205
9.4.7.	Gráficos de Control.	205
9.5.	ACTIVIDADES DESPUÉS DE LA COLOCACIÓN DEL HCR.....	205
9.5.1.	Curado de HCR.....	205
9.5.2.	Protección del HCR.....	206
9.5.3.	Juntas.....	207

CAPÍTULO 10.

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....208

10.1. CONCLUSIONES.....209

10.2. RECOMENDACIONES.....213

ABREVIATURAS

's	Segundos
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
cm	Centímetros
GPa	Giga Pascal
GU	General Use - Uso General
GWh	Gigavatio Hora
HCR	Hormigón Compactado con Rodillo
HE	High Early Strength– Alta Resistencia Inicial
hr	Hora
Hz	Hertz
in	Pulgadas
kg	Kilogramo
kg/cm	Kilogramo sobre Centímetro
kg/mm	Kilogramo sobre Milímetro
km/hr	Kilometro sobre Hora
KN	Kilonewtons
l	Litro
m	Metros
m/s	Velocidad Metro sobre Segundos
m ²	Metros Cuadrados
m ³	Metros Cúbicos
m ³ /hr	Metros Cúbicos sobre Hora
MF	Modulo de Finura
Mg	Miligramos
mg/l	Miligramo sobre Litro
MH	Moderate Heat of Hidratation– Moderado Calor de Hidratación
Min	Minutos
Mm	Milímetros
MPa	Mega Pascal
MW	Megavatios
N/mm	Newton sobre Milímetro
RDC	Roller Compacted Dams
SSS	Saturado Superficialmente Seco
TMA	Tamaño Máximo del Agregado
ton	Toneladas
vs	Versus

SÍMBOLOGÍA

f'c	Resistencia Compresión Simple
E_c	Módulo de Elasticidad del Hormigón
°C	Grados Centígrados
a/cm	Relación Agua Material Cementante
a/c	Relación Agua/Cemento
TCD	Resistencia Tracción Compresión Diametral
\$	Dólares Americanos
MR	Módulo de Rotura

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2. 1 Cadena de Centrales a lo Largo de la Cuenca Guayllabamba.	9
Ilustración 2. 2 Ubicación Geográfica del Proyecto Manduriacu.	10
Ilustración 2. 3 Proyectos Hidroeléctricos en el Ecuador.	10
Ilustración 2. 4 Vista en Planta1 de la Presa Manduriacu.	11
Ilustración 2. 5 Vista en Planta2 de la Presa Manduriacu.	11
Ilustración 3. 1 Agregado 38mm.	20
Ilustración 3. 2 Arena Natural.	21
Ilustración 3. 3 Filler.	22
Ilustración 3. 4 Curva Granulométrica Arena Triturada, ASTM C33M-11.	24
Ilustración 3. 5 Curva Granulométrica Arena Natural, ASTM C33M-11.	24
Ilustración 3. 6 Granulometría Piedra 38mm.	25
Ilustración 3. 7 Tamizadora para Agregado Grueso.	26
Ilustración 3. 8 Curva Granulométrica Piedra 38mm, ASTM C33M-11.	26
Ilustración 3. 9 Curva Granulométrica Piedra 19mm, ASTM C33M-11.	27
Ilustración 3. 10 Ensayo Valor de Trituración.	28
Ilustración 3. 11 Varillado y Colocación de Muestra en Presas.	28
Ilustración 3. 12 Agregados Triturados.	29
Ilustración 3. 13 Peso Agregados Gruesos para Determinar Densidad y Absorción.	30
Ilustración 3. 14 Peso Agregados Finos para Determinar Densidad y Absorción.	31
Ilustración 3. 15 Secado Muestras para Realizar los Ensayos.	32
Ilustración 3. 16 Procedimiento para Determinar Masa Unitaria-Agregados Gruesos.	34
Ilustración 3. 17 Procedimiento para Determinar Masa Unitaria-Arena.	35
Ilustración 3. 18 Preparación de Solución de Hidróxido de Sodio.	37
Ilustración 3. 19 Vertiendo Solución con Agua a la Arena.	38
Ilustración 3. 20 Determinación Materia Orgánica.	39
Ilustración 3. 21 Reacción Alcalina Agregado, ASTM C 1260-07, incluye Cemento Portland Puro.	40
Ilustración 3. 22 Reacción Alcalina Agregado, ASTM C1567-08, incluye Cemento Compuesto HE	41

Ilustración 3. 23 Procedimiento para Ensayo de Abrasión.....	43
Ilustración 3. 24 Curva Granulométrica de Diseño.....	47
Ilustración 4. 1 Resistencia vs. Edad, ACI -2011,207.5R.....	60
Ilustración 4. 2 Curva Granulométrica de Diseño.....	66
Ilustración 4. 3 Cemento GU 75 kg/m3.	68
Ilustración 4. 4 Cemento HE 75 kg/m3.	68
Ilustración 4. 5 Cemento MH 75 kg/m3.....	69
Ilustración 4. 6 Cemento GU 95 kg/m3.....	69
Ilustración 4. 7 Cemento HE 95 kg/m3.	70
Ilustración 4. 8 Cemento MH 95 kg/m3.....	70
Ilustración 4. 9 Cemento HE 105 kg/m3.	71
Ilustración 4. 10 Pesado de Materiales para Elaboración de Mezcla.....	71
Ilustración 4. 11 Mezclado de Materiales.....	72
Ilustración 4. 12 Mezclado y Compactación de Materiales.	73
Ilustración 4. 13 Determinación de Densidades.....	74
Ilustración 4. 14 Pesando Piedra #4 para Diseños de HCR.	75
Ilustración 4. 15 Pesando Arena para Diseños de HCR.	76
Ilustración 4. 16 Mezcladora de 100dm3.	76
Ilustración 4. 17 Ensayo Vebe, Determinación de Trabajabilidad.....	77
Ilustración 4. 18 Llenando Olla de Washington para Determinar la Densidad.	79
Ilustración 4. 19 Elaboración de Especímenes.	83
Ilustración 4. 20 Curado de Especímenes.	83
Ilustración 5. 1 Mezclado de Mortero para Refrentar.....	95
Ilustración 5. 2 Engrasado de Moldes para Refrentar.....	96
Ilustración 5. 3 Colocación de Mortero a los Especímenes.	96
Ilustración 5. 4 Proceso de Vibración y Acabado del Refrentado.	97
Ilustración 5. 5 Prensa de Capacidad de 2000KN.	98
Ilustración 5. 6 Extensómetros para Medir Deformación de Cilindros.....	99
Ilustración 5. 7 Determinación del Módulo de Elasticidad.....	100
Ilustración 5. 8 Cilindros Ensayados a TCD.....	101
Ilustración 5. 9 Ensayo de Pulso Ultrasónico.....	106
Ilustración 5. 10 Curva Granulométrica para Coeficiente de Dilatación Térmica.....	108

Ilustración 5. 11 Elaboración Especímenes para Coeficiente de Dilatación Térmica.....	109
Ilustración 5. 12 Apisonadores y Termocuplas.	110
Ilustración 5. 13 Especímenes Elaborados.....	110
Ilustración 5. 14 Ensayo de Especímenes para Determinar el Coeficiente de Dilatación Térmica.	111
Ilustración 5. 15 Curva Deformación vs Temperatura Espécimen 1.	112
Ilustración 5. 16 Curva Deformación vs Temperatura Espécimen 2.	112
Ilustración 6. 1 Variación f'c vs Edad, 75 kg de Cemento (TMA 38mm).	116
Ilustración 6. 2 Variación f'c vs Edad, 95 kg de Cemento (TMA 38mm).	116
Ilustración 6. 3 Variación f'c vs Edad, 105 kg de Cemento (TMA 38mm). ..	117
Ilustración 6. 4 Variación TCD vs Edad, 75 kg de Cemento (TMA 38mm). ..	118
Ilustración 6. 5 Variación TCD vs Edad, 95 kg de Cemento (TMA 38mm). ..	118
Ilustración 6. 6 Variación TCD vs Edad, 105 kg de Cemento (TMA 38mm).	119
Ilustración 6. 7 Módulo Secante vs Edad, 75 kg de Cemento HE (TMA 38mm).....	120
Ilustración 6. 8 Módulo Secante vs Edad, 75 kg de Cemento GU (TMA 38mm).....	120
Ilustración 6. 9 Módulo Secante vs Edad, 75 kg de Cemento MH (TMA 38mm).....	121
Ilustración 6. 10 Módulo Secante vs Edad, 95 kg de Cemento HE (TMA 38mm).....	121
Ilustración 6. 11 Módulo Secante vs Edad, 95 kg de Cemento GU (TMA 38mm).....	122
Ilustración 6. 12 Módulo Secante vs Edad, 95 kg de Cemento MH (TMA 38mm).....	122
Ilustración 6. 13 Módulo Secante vs Edad, 105 kg de Cemento HE (TMA 38mm).....	123
Ilustración 6. 14 Módulo Secante vs Edad, 105kg de Cemento HE (TMA 38mm).....	123
Ilustración 6. 15 Módulo Secante vs Edad, 105 kg de Cemento HE (TMA 38mm).....	124
Ilustración 6. 16 Variación Módulo Secante (75 kg de Cemento).	125
Ilustración 6. 17 Variación Módulo Secante vs Edad (95 kg de Cemento). ..	126
Ilustración 6. 18 Variación Módulo Secante vs Edad (105 kg de Cemento).	126

Ilustración 6. 19 Gráfica $f'c$ vs TCD.....	127
Ilustración 6. 20 Gráfica $f'c$ vs Velocidad Pulso Ultrasónico.....	128
Ilustración 6. 21 Gráfica TCD vs Velocidad Pulso Ultrasónico.....	129
Ilustración 6. 22 Gráfica Densidad vs Tiempo Trabajabilidad.	130
Ilustración 6. 23 Eficiencia vs Edad (75 kg de Cemento).....	131
Ilustración 6. 24 Eficiencia vs Edad (95 kg de Cemento).....	132
Ilustración 6. 25 Eficiencia vs Edad (105 kg de Cemento).....	132
Ilustración 6. 26 Correlación E_c vs $f'c$	134
Ilustración 7. 1 Proceso de Fabricación del HCR.....	137
Ilustración 7. 2 Planta Dosificadora, partes Principales.	138
Ilustración 7. 3 Almacenamiento de Agua en Planta de HOLCIM.....	139
Ilustración 7. 4 Almacenaje de Agregados Planta de HOLCIM.....	140
Ilustración 7. 5 Silos de Almacenamiento de Cemento y en la parte Inferior Silos de Aditivos.....	141
Ilustración 7. 6 Planta Móvil HOLCIM.	147
Ilustración 7. 7 Base Usada en la Planta Móvil de HOLCIM.	149
Ilustración 7. 8 Compartimentos para la Ubicación de Agregados Planta. .	150
Ilustración 7. 9 Panel de Control Planta HOLCIM.....	151
Ilustración 7. 10 Camión Transportando Material.	153
Ilustración 7. 11 Limpieza de Camiones para Evitar Contaminación.	153
Ilustración 7. 12 Cinta Transportadora.....	154
Ilustración 7. 13 Llegada del Hormigón por Medio de Cinta Transportadora.	155
Ilustración 7. 14 Maquinarias y Equipos.	155
Ilustración 7. 15 Camión Tolva.....	156
Ilustración 7. 16 Cintas Transportadas planta HOLCIM.....	158
Ilustración 7. 17 Sección Transversal de la Cinta Transportadora Planta Móvil HOLCIM.....	160
Ilustración 7. 18 Rodillos / parte de la Cinta Transportadora Planta Móvil HOLCIM.....	160
Ilustración 7. 19 Tractor.	162
Ilustración 8. 1 Presa de Gravedad.....	164
Ilustración 8. 2 Proceso Constructivo de Presas de HCR, Método de Capa Extendida.....	164
Ilustración 8. 3 Colocación del HCR.	166

Ilustración 8. 4 Proceso de Colocación y Extensión del HCR.....	167
Ilustración 8. 5 Crawler Dozer 650 J.....	168
Ilustración 8. 6 Dozer Utilizado en HCR.....	169
Ilustración 8. 7 Caterpillar D-3.....	169
Ilustración 8. 8 Rodillo Vibratorio de Tambor Simple.	172
Ilustración 8. 9 Rodillo Vibratorio de Doble Tambor.....	172
Ilustración 8. 10 Compactador Simple - Monocilindrico.	174
Ilustración 8. 11 Compactador - Apisonador.....	174
Ilustración 8. 12 Placa Vibradora.	175
Ilustración 8. 13 Compactación con Equipos Menores.	175
Ilustración 8. 14 Placa para Darle Irregularidad a las Capas Verticales.	176
Ilustración 8. 15 Colocación de Mortero de Pega.	176
Ilustración 8. 16 Consistencia y Compactación del HCR.	177
Ilustración 8. 17 Humectación de Superficie.....	177
Ilustración 8. 18 Mecanismo de Pasas del Rodillo.....	179
Ilustración 8. 19 Toma de Temperatura.	179
Ilustración 8. 20 Marcas de Equipos sobre Hormigón Endurecido.....	180
Ilustración 8. 21 Típico Acabado Superficial de HCR de Consistencia Seca	180
Ilustración 8. 22 Formación de Fisura por Contracción y Secado.....	181
Ilustración 8. 23 Energía de Compactación.	181
Ilustración 8. 24 Formación de Capas.	185
Ilustración 9. 1 Gráfico de Control para Resultados de Pruebas de Densidad Húmeda Consecutiva.	190
Ilustración 9. 2 Operaciones del Control de Calidad	191
Ilustración 9. 3 Aparato Vebe (ASTM C 1170)	197
Ilustración 9. 4 Aparato Vebe-Coherencia de la Prueba con el Anillo de Mortero en la Muestra Consolidada. – ACI 2011-207.5R.	197
Ilustración 9. 5 Densímetro Nuclear – ACI 2011-207.5R.	199
Ilustración 9. 6 Gráfico de Razones del Contenido de Humedad.....	200
Ilustración 9. 7 Dispositivo para Medir la Temperatura en el HCR Fresco..	202
Ilustración 9. 8 Gráfico de las Temperaturas en Producción de Grandes Masas.	203
Ilustración 9. 9 Gráfico que Indica la Máxima Diferencia de Temperatura .	204
Ilustración 9. 10 Cilindros de HCR para Realizar Pruebas	204

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1 Resultados de Caracterización.	44
Tabla 3. 2 Participación de Agregados en Arreglo Granulométrico.	47
Tabla 4. 1 Calidad de Aceptación del Agua.	51
Tabla 4. 2 Cementos Portland.	54
Tabla 4. 3 Cementos Puzolánicos.	55
Tabla 4. 4 Consistencia Hormigón.	57
Tabla 4. 5 Dosificación HCR, Cemento MH.	80
Tabla 4. 6 Dosificación HCR, Cemento HE.	81
Tabla 4. 7 Dosificación HCR, Cemento GU.	81
Tabla 4. 8 Trabajabilidad, Humedad y Temperaturas de las Mezclas.	82
Tabla 5. 1 Resultados Ensayos Destructivos, Cemento HE.	102
Tabla 5. 2 Resultados Ensayos Destructivos, Cemento GU.	103
Tabla 5. 3 Resultados Ensayos Destructivos, Cemento MH.	104
Tabla 5. 4 Resultados Ensayo de Pulso Ultrasónico.	107
Tabla 5. 5 Dosificación para Ensayo de Coeficiente de Dilatación Térmica	109
Tabla 5. 6 Resultados Coeficiente de Dilatación Térmica.	112
Tabla 9. 1 Tabla con Ensayos de Control de Calidad (ejemplo) – ACI 2011-207.5R.	192
Tabla 9. 2 Calidad de Aceptación del Agua.	202

ÍNDICE DE FORMULAS

FORMULA 3. 1 Valor de Trituración.	27
FORMULA 3. 2 Absorción.	32
FORMULA 3. 3 Relación de Vacíos.	33
FORMULA 3. 4 Desgaste Agregados.	43
FORMULA 3. 5 Estimación E_c	134

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN.

El presente trabajo consiste en el “Control de Calidad y Caracterización de Materiales de Hormigón Compactado con Rodillo (HCR) Utilizado en el Proceso Constructivo en la Presa Manduriacu (Guayllabamba – Pichincha –Ecuador)”. El Hormigón Compactado con Rodillo (HCR) ha desplazado en las últimas décadas al hormigón convencional en cuanto a la construcción de presas, debido a que presenta mayor grado de eficiencia, trabajabilidad, reducción de costos, tiempo, entre otros. Buenos procesos constructivos han resultado en una gran eficiencia al momento de poner en funcionamiento presas elaboradas con HCR, pero tal motivo depende del control de calidad realizado.

Caracterizar los materiales de la presa Manduriacu es fundamental para determinar la cantidad y tipo de cemento necesario para lograr la

Mezcla más idónea. Mediante la relación de propiedades térmicas y ensayos preliminares, junto con todo lo concerniente en el diseño de mezclas de hormigón, se puede determinar el proceso constructivo más óptimo con el que se consiga entender el modo de fabricación del HCR en obra, de tal manera que se pueda garantizar una correcta calidad del material a utilizar, analizando tiempos permisibles de colocación, conocer el correcto procedimiento de curado y verificar la consistencia del HCR al momento de ejecutar el proyecto.

Un estricto control de calidad contribuye a una adecuada calidad del proceso constructivo que aporta significativamente en la obra, ya que debido a malos procedimientos y prácticas podría echar por tierra todo el proyecto.

1.1. ANTECEDENTES.

La exigencia de un control de calidad debe implantarse como norma general para evitar no solo la insatisfacción del dueño del proyecto, sino riegos y pérdidas debido al poco o inexistente control de calidad en las obras de construcción, en el caso de la Presa La Breña II, construida en el Río Guadiato en la ciudad de Córdoba, España, para la colocación del HCR se planteó una programación de turnos del personal que permitía cubrir las 24 Horas del Día, los 7 Días de la Semana con ello se podría reducir al mínimo el número de juntas

Frías previstas, aumentando así la calidad de las misma, para conseguir una excelente adherencia entre capas. Al tener métodos constructivos optimizados se permite construir la presa rápidamente y así alcanzar una calidad satisfactoria.

En la etapa de estudio de factibilidad de la presa de la Central Pangué ubicada en el curso alto del Río BioBio en Santiago-Chile, se analizaron distintas soluciones, para su construcción las cuales surgieron como las de mayor interés las presas de enrocado con pantalla de hormigón por aguas arriba (CFRD) y la presa de hormigón gravitacional en hormigón compactado con rodillo (HCR) de menor presupuesto, pero al realizar los costos globales se igualaron por lo que se decidió por la presa de hormigón gravitacional en hormigón compactado con rodillo (HCR). Se eligió este tipo de presa debido a las condiciones y la ubicación de la misma que se encontraba en la cercanías del volcán Cayaqui, y que en tal motivo este tipo de presa ayudaba en caso de avalanchas de barro, nieve y vertimiento de material súbito de coronamiento, por lo que contribuía con mayor seguridad, entre otras ventajas.

1.2. OBJETIVOS.

1.2.1. Objetivos Generales.

- ✓ Caracterizar los agregados a ser empleados en la dosificación de HCR.
- ✓ Obtener la dosificación más idónea de HCR para evaluar el desempeño mecánico y durabilidad.
- ✓ Determinar los pasos a seguir para garantizar un correcto control de calidad en obra para la colocación del HCR.

1.2.2. Objetivos Específicos.

- ✓ Analizar los tiempos límites permisibles para la colocación del HCR.
- ✓ Verificar consistencia del HCR utilizado en obra.
- ✓ Determinar los pasos a seguir para elaborar probetas de HCR.
- ✓ Conocer los criterios de aceptación de los materiales que conforman al HCR.

1.3. **VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL HCR USADO EN PRESAS.**

Las ventajas y desventajas del HCR usado en presas presentadas a continuación están de acuerdo a presas de tierra y hormigón convencional.

Ventajas

- ✓ Rapidez en su construcción, debido a que se cortan los plazos de tiempo durante su ejecución.
- ✓ Utilización de equipos empleados en movimiento de tierras.
- ✓ Menor costo.
- ✓ Reducción de impacto ambiental por la menor cantidad de material requerido.
- ✓ Si se usa cementos compuestos o puzolánicos se reduce el calor de hidratación.
- ✓ Menor cantidad de cemento empleado.
- ✓ Es reciclable en su totalidad al final de su vida útil.
- ✓ Menor volumen de material de presa que en una elaborada con enrocado.
- ✓ La seguridad sísmica de la presas de HCR ante violentas sacudidas del terreno es muy probablemente satisfactoria, pues las fisuras se desarrollaran a lo largo de las juntas de

Construcción horizontal en la parte central superior de la presa.

Desventajas

- × No necesariamente la fuente de agregados cercanos al proyecto son apropiados para el tipo de hormigón.
- × Infiltraciones entre las capas cuando no existe una correcta adherencia o hermeticidad entre ellas.
- × La adherencia entre capas de HCR hacen vulnerable a las presas durante eventos sísmicos, debido a las características del material.
- × Para adquirir resistencia es necesario aplicarle energía de compactación al hormigón fresco.
- × Se requieren estribos de rocas competentes.
- × Bajo contenido de pasta en el hormigón origina que este se vuelva permeables al menos que se le adicione filler.
- × Baja resistencia a la compresión y tracción.
- × En caso de sismos severos, se formaran fisuras horizontales a lo largo de la unión, acompañada de una apertura de las juntas de dilatación verticales , por lo que es necesario un mortero que aumentará la resistencia a la tracción, este tratamiento impide la figuración durante temblores de tierra moderados.

1.4. **METODOLOGÍA DEL TRABAJO Y ALCANCE.**

Para la metodología de trabajo se empleó el método experimental por ser el medio para poder analizar las características de los materiales realizando ensayos y obteniendo datos, también se utilizó el método analítico, el cual se empleó luego de obtener los datos para determinar si los materiales cumplen los requerimientos del proyecto.

El alcance de este proyecto es el de evaluar la relación que existe entre las propiedades de los material y las mezclas diseñadas proporcionando información y ayudando a formar el criterio sobre este tipo de mezcla para así servir como un respaldo o apoyo, ayudar a llevar un correcto control de calidad , determinar a tiempo posibles fallas en el proceso constructivo para el acabado final del proyecto, tener una base de datos de diferentes tipos de cementos dependiendo de los requerimientos del proyecto y así formar una estructura de orden y asegurar la calidad para futuros y actuales proyectos relacionados con el HCR.

CAPÍTULO 2

2. DESCRIPCIÓN PROYECTO MANDURIACU, PROCESO DE ABASTECIMIENTO DE MATERIALES PÉTREOS.

Con el desarrollo de la sociedad la demanda energética crece, impulsando la ejecución de proyectos encaminados en abastecer estas necesidades. De acuerdo a la factibilidad y disponibilidad de recursos se elige la mejor opción posible, tomando en cuenta los materiales y elementos necesarios para llevar a cabo la ejecución del proyecto.

2.1. GENERALIDADES PROYECTO PRESA MANDURIACU.

2.1.1. Ubicación Geográfica.

Ubicado en las parroquias Pacto y García Moreno de los Cantones Quito y Cotacachi de las provincias de Pichincha e Imbabura respectivamente.

2.1.2. Descripción del Proyecto Presa Manduriacu.

El proyecto Hidroeléctrico Manduriacu apoya el cambio de la matriz energética y la búsqueda de la soberanía energética. La central de 60 MW aportará al país 341 GWh anuales de energía, desde la vertiente del Pacífico, complementaria a la vertiente oriental, asegurando el abastecimiento de energía al país en los períodos de estiaje de octubre a marzo.



Ilustración 2. 1 Cadena de Centrales a lo Largo de la Cuenca Guayllabamba, Tomado de www.heq.com.ec.



Ilustración 2. 2 Ubicación Geográfica del Proyecto Manduriacu, Tomado de www.transporteturismoycarga.com.

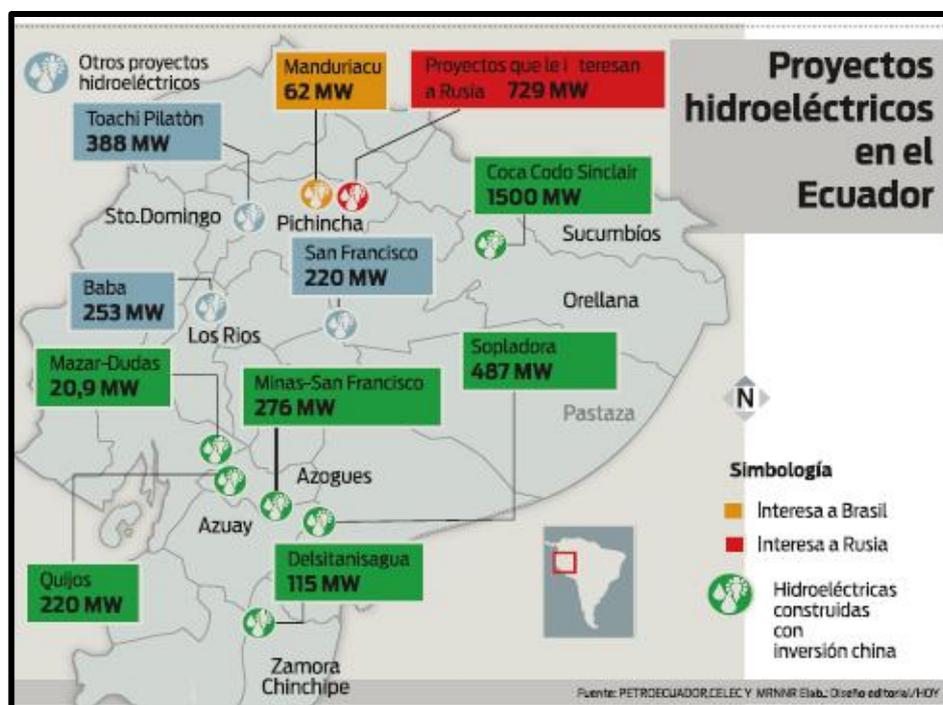


Ilustración 2. 3 Proyectos Hidroeléctricos en el Ecuador, Tomado de www.heq.com.ec.

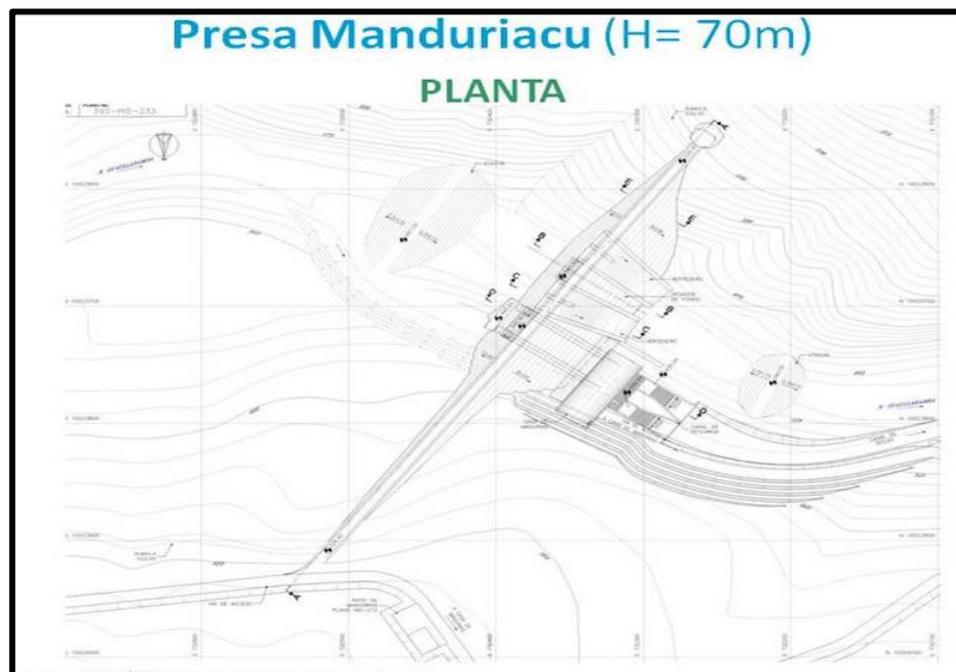


Ilustración 2. 4 Vista en Planta1 de la Presa Manduriacu, Tomado de www.heq.com.ec.

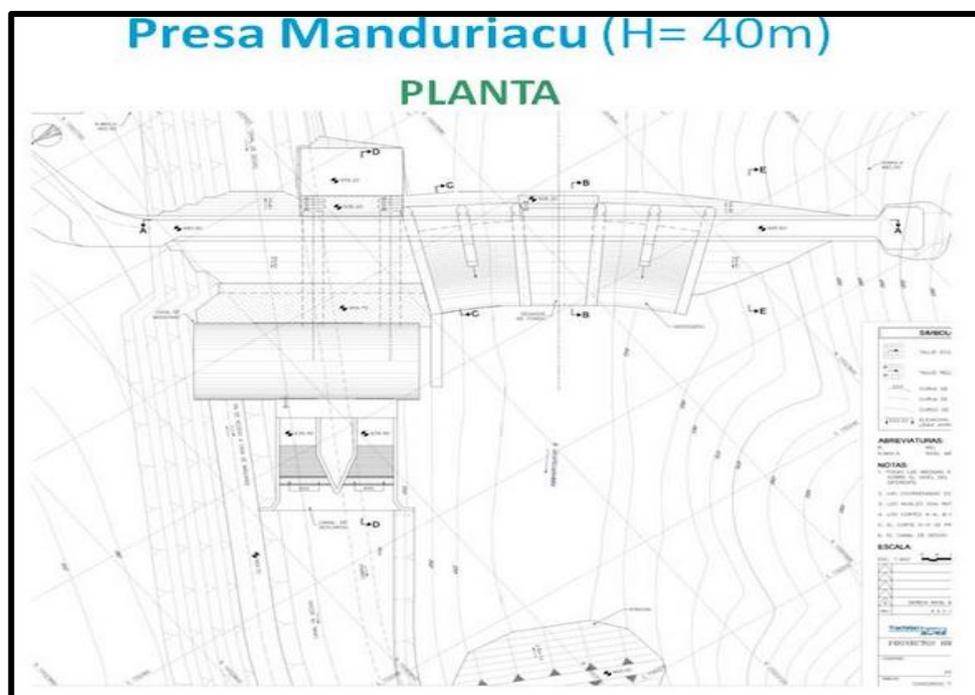


Ilustración 2. 5 Vista en Planta2 de la Presa Manduriacu, Tomado de www.heq.com.ec.

El volumen de HCR estimado para el proyecto es aproximadamente 680.000 m³, siendo el costo del proyecto de \$ 132'900.000 de dólares sin incluir financiamiento.

2.2. DEFINICIÓN DE MATERIALES PÉTREOS A EMPLEAR.

2.2.1. Agregados.

Los agregados son un conjunto de partículas de diversa composición mineral relativamente inertes, natural o artificial, de forma y características determinadas, que los hacen apropiados como material de construcción, se encuentran dispersos en la pasta de cemento, los cuales confieren al hormigón principalmente estabilidad de volumen y mayor durabilidad. Ocupan del 70-75% del volumen total del hormigón es decir, ocupan las 3/4 partes del mismo.

Los agregados conservan las propiedades y características de la roca madre en cuanto a composición mineralógica, dureza, tenacidad, densidad, porosidad, textura y resistencia la interperismo.

2.2.2. Rocas.

Las rocas son agregados compuestos de una o más variedad de minerales siendo estos los siguientes: oxígeno, silicio, aluminio, hierro, calcio, sodio, potasio, magnesio entre otros; de todas las

Combinaciones posibles entre estos ocho elementos. Solo pocos forman los minerales más comunes presentes en las rocas como lo son: los feldespatos, cuarzos, micas, anfíboles piroxenos, olivino.

Resistencia de la Roca.

Para determinar la resistencia de una roca se utilizan probetas de 45x90 mm extraídos de la roca madre, la prueba de resistencia a la compresión en probetas mide la calidad de la roca original más que la calidad del agregado usado en el hormigón, por esta razón se han implementado ensayos de compresión con al agregado BS. 812 Parte 3:1975.

2.2.3. Clasificación de los Agregados.

Los agregados se clasifican de acuerdo:

- Composición Mineralógica-Origen.- Corresponde a roca ígnea, sedimentaria y metamórfica.
- Mecanismo de Obtención de los Mismos.- Pueden ser natural o producto de trituración.
- Tamaño.- Quedan definidos como agregados gruesos para tamaños mayores a 4.75 mm y como agregados finos aquellos menores o iguales a 4.75 mm.

2.3. FUENTE DE ABASTECIMIENTO DE AGREGADOS.

Dentro de las fuentes de abastecimiento de agregados encontramos los depósitos fluviales, eólicos, de glaciación, volcánicos, marítimos, lacustres, canteras y almacenes de plantas de procesamiento o fabricación de agregados artificiales.

- Depósitos Fluviales: se localizan en los playones o causes de los ríos, proporcionan agregados redondeados de fácil y económica explotación. Sin embargo en las zonas tropicales, generalmente pueden contener elevados porcentajes de materia orgánica, limos y arcilla que pueden afectar la calidad del material.
- Bancos: son depósitos de materiales fragmentados que posteriormente fueron cubiertos por otros, estas formaciones tienen características similares a las de los depósitos de ríos, debido a que están cubiertos por otros materiales, se dificulta su explotación.
- Arenas y Gravas Volcánicas: suelen encontrarse en las faldas de los volcanes y están formadas por cenizas, basaltos, andesitas y tobas porosas.
- Arenas de playas Marítimas y Lacustres: estos agregados sufren una constante clasificación por el movimiento del agua. Se depositan en zonas, por partículas casi del mismo tamaño. En estos agregados deben determinarse los contenidos de sales que

Dañan los aceros de refuerzo, tales como los cloruros y los sulfatos que afectan al hormigón, a fin de determinar si requieren de algún tratamiento.

- Canteras: en estas fuentes de abastecimiento se obtienen agregados por trituración que generalmente son de buena calidad, pero que deben extraerse de yacimientos parcial o totalmente abiertos, ya que su proceso de extracción se ejecuta en la superficie del terreno con maquinarias de gran tamaño. Los materiales pétreos extraídos son generalmente para la industria de la construcción u obras civiles.

CAPÍTULO 3

3. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS.

La caracterización de agregados comprende una serie de ensayos necesarios que permiten evaluar la calidad, para su aplicación dentro de la dosificación de Hormigón Compactado con Rodillo.

Este proyecto comprende la caracterización físico-mecánica de agregados triturados de la fuente designada, para la producción de HCR en la Presa Manduriacu. El registro e interpretación de los resultados de cada ensayo realizado a los agregados nos ayuda a obtener las características de los mismos y a su vez permiten tener una idea del posible comportamiento del hormigón en estado fresco (trabajabilidad), y del hormigón endurecido (módulo de elasticidad y resistencia a la compresión).

3.1. **AGREGADOS EMPLEADOS EN HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO.**

Los agregados empleados en este tipo de dosificaciones de HCR generalmente cumplen con los estándares para agregados utilizados en hormigón convencional, aunque también se han empleado agregados que no cumplen con estos estándares, obteniéndose buenos resultados (1).

Por lo general en este tipo de proyectos los agregados empleados provienen de la cercanía con la obra, por ser la fuente más económica eliminando costo adicional de transporte.

La mayoría de proyectos de HCR han sido construidos con agregados basados en los requerimientos del ASTM C 33M-11.

Un objetivo básico es incorporar la máxima cantidad de agregados y la mínima cantidad de agua en la mezcla, así se reduce la cantidad de material cementante y consecuentemente se reduce los cambios de volumen en el hormigón, se genera menor calor de hidratación.

(1) Agregados aptos pueden ser utilizados para cualquier tipo de hormigón quedan definidos por medio del ACI -2011, sección 207.5R

Se logra una buena gradación de agregados en base al tamaño máximo del mismo, con la experiencia se ha llegado a determinar un Tamaño máximo nominal entre 38 y 50 mm es más fácilmente compactable y menos susceptible de segregación. **“ACI -2011, sección 207.5R”**

Sin embargo en mezclas de HCR la posibilidad de segregación y su metodología de compactación deben ser también consideradas primordiales en la selección del máximo tamaño del agregado. Las granulometrías empleadas en HCR destacan por tener una mayor proporción de agregados finos, en relación con la granulometría para hormigones convencionales, consiguiéndose de esta manera reducir la tendencia a la segregación y la relación de vacíos (2).

(2) El Código del Instituto Americano del Concreto ACI, en su sección 207.5R indica que al tener mayor cantidad de finos se tiene una mejor granulometría evitando problemas de segregación debido a vacíos.

Los agregados empleados para este proyecto consisten en grava triturada, provenientes de restos de roca pre-existente de buena resistencia; entre otros, volcánicos como basaltos y andesitas, rocas ígneas intrusivas, donde predomina la Granodiorita, y roca sedimentaria metamorfoseada como las cuarcitas, todos estos materiales han resistido la intensa actividad de un río de alta energía; esto se evidencia en las buenas propiedades mecánicas de los mismos.

3.1.1. Agregados Gruesos.

Corresponden agregados con tamaño mayor a 4.75mm. La selección de un tamaño máximo nominal de agregado se basa en:



La mayoría de proyectos de HCR han empleado tamaño máximos nominales de agregados entre 1 ½ - 3 pulgadas (37.5 – 75 mm), cuando estos exceden un tamaño mayor a 75 mm se producen aumentos en el costo de producción y aumenta la tendencia a la segregación.

Cuando los espesores de las capas de HCR colocadas es mayor a 3 veces el tamaño máximo del agregado nominal (3), la segregación es adecuadamente controlada, empleándose grandes rodillos vibratorios para su compactación. Si el tamaño de agregado aumenta a los rangos establecidos se vuelve más difícil controlar y evitar la segregación de estas partículas durante su almacenamiento y manipulación.



Ilustración 3. 1 Agregado 38mm.

(3) Menor tamaño de la malla por el cual debe pasar la mayor parte del agregado, puede Retener de 5% a 15% del agregado dependiendo del número de tamaño.

3.1.2. Agregados Finos.

Corresponden agregados de tamaño entre 4.75 – 0.075 mm. La gradación de agregados finos es fuertemente influyente en los requerimientos de pasta y facilidad de compactación del HCR, además de ser necesario para llenar los vacíos dejados por los agregados gruesos.



Ilustración 3. 2 Arena Natural.

3.1.3. Finos (Filler).

Las características y contenido de finos afectarán la compactación de mezclas de HCR, pudiendo afectar el número de pasadas del rodillo vibratorio, necesarias para una buena compactación, dejando un espesor de capa deseada, independientemente si se lleva a cabo por adición de finos (filler – finos procedentes de la trituración de agregados), cemento, puzolana o una combinación de estos. Al incluir agregados finos en una mezcla baja en pasta de cemento se permite la

Reducción en el contenido del cemento. Una adición excesiva de finos para rellenar los espacios vacíos, después de que estos se hayan formado, es perjudicial para la mezcla de HCR ya que afecta su trabajabilidad, incrementa la demanda de agua y consecuentemente se produce pérdida de su resistencia.

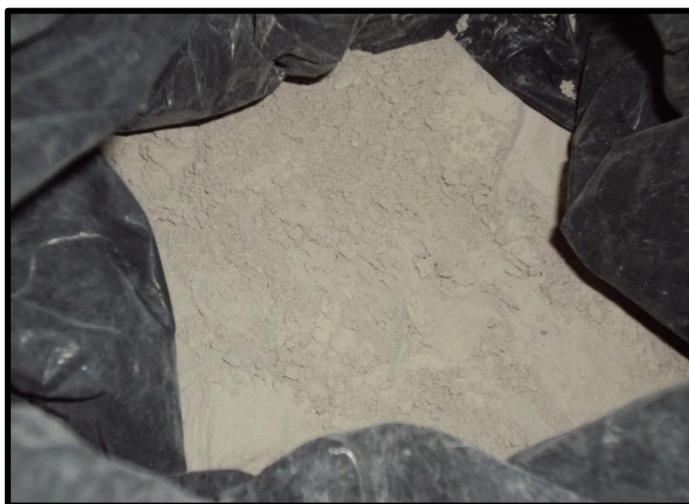


Ilustración 3. 3 Filler.

3.2. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS.

3.2.1. Granulometría de Agregados.

Caracterizar los agregados en una distribución granulométrica utilizando la variable Peso vs. Intervalo granulométrico correspondiente, para tal efecto se utilizan tamices de malla cuadrada montados en marcos que se pueden apilar. Antes de efectuar el análisis granulométrico se deberá secar la muestra

De agregado, con la finalidad de evitar que partículas fina se aglomeren con los gruesos.

Este ensayo es utilizado principalmente para determinar la gradación de materiales utilizados como agregados, el resultado es utilizado para establecer la distribución de tamaño aplicados a especificaciones y proveer la información necesaria para control en la producción de agregados.

Granulometría Agregado Fino.

El porcentaje de agregado fino retenido entre dos mallas consecutivas no debe ser mayor a 45%, el módulo de finura se encuentra entre 2.3 – 3.1 caso contrario deberá realizarse los ajustes necesarios de la proporción entre agregado grueso y fino. La granulometría más apropiada para el agregado fino depende del tipo de trabajo, de la riqueza de la mezcla de hormigón, y del tamaño máximo del agregado grueso.

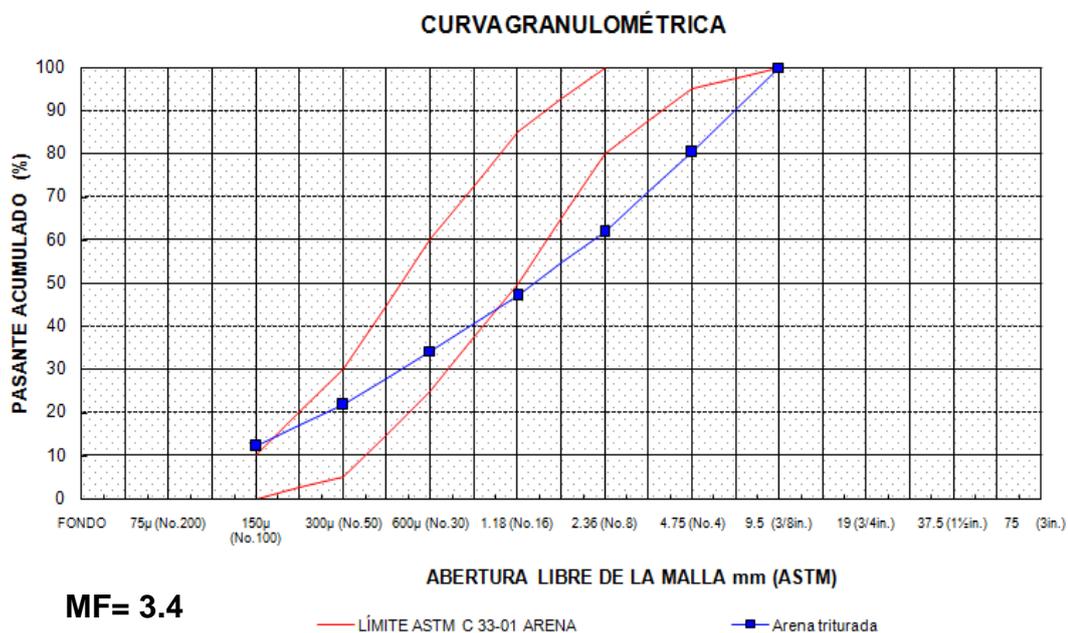


Ilustración 3. 4 Curva Granulométrica Arena Triturada, ASTM C33M-11.

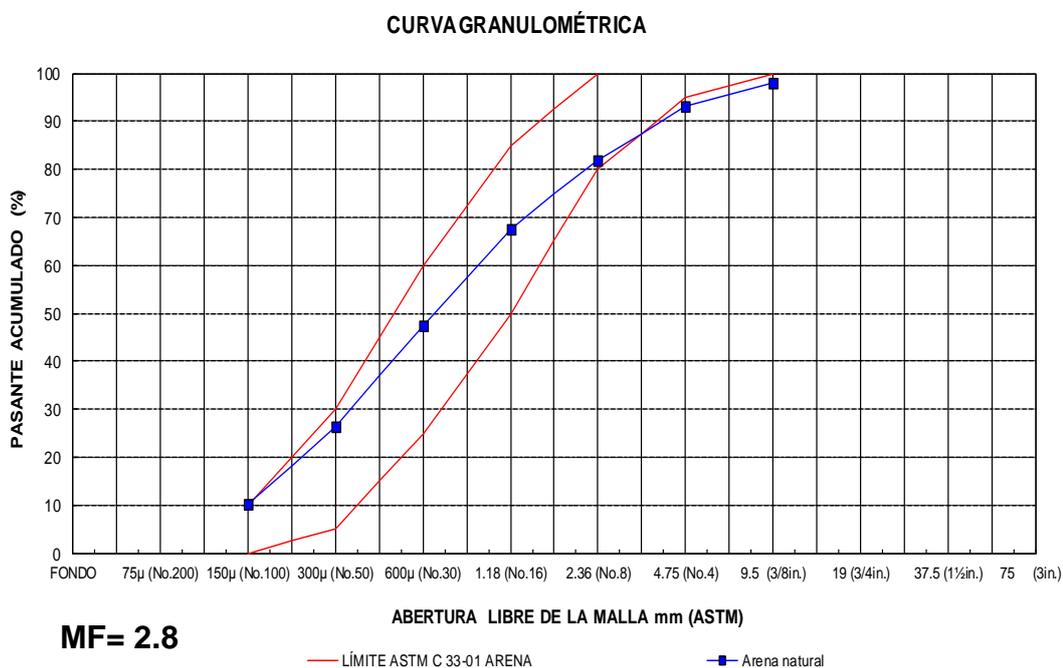


Ilustración 3. 5 Curva Granulométrica Arena Natural, ASTM C33M-11.

Granulometría Agregado Grueso.

Uno de los parámetros más importantes para elegir la granulometría del agregado grueso a utilizar se encuentra en función del tamaño del mismo, el cual puede ser establecido mediante el TMA(4) o mediante el tamaño máximo nominal, independientemente de cuál indicador se use, se debe cumplir en lo posible con los límites establecidos para garantizar una buena gradación y minimizar segregación.



Ilustración 3. 6 Granulometría Piedra 38mm.

(4) Menor tamiz por el que se pasa toda la muestra de agregados.



Ilustración 3. 7 Tamizadora para Agregado Grueso.

CURVAGRANULOMÉTRICA

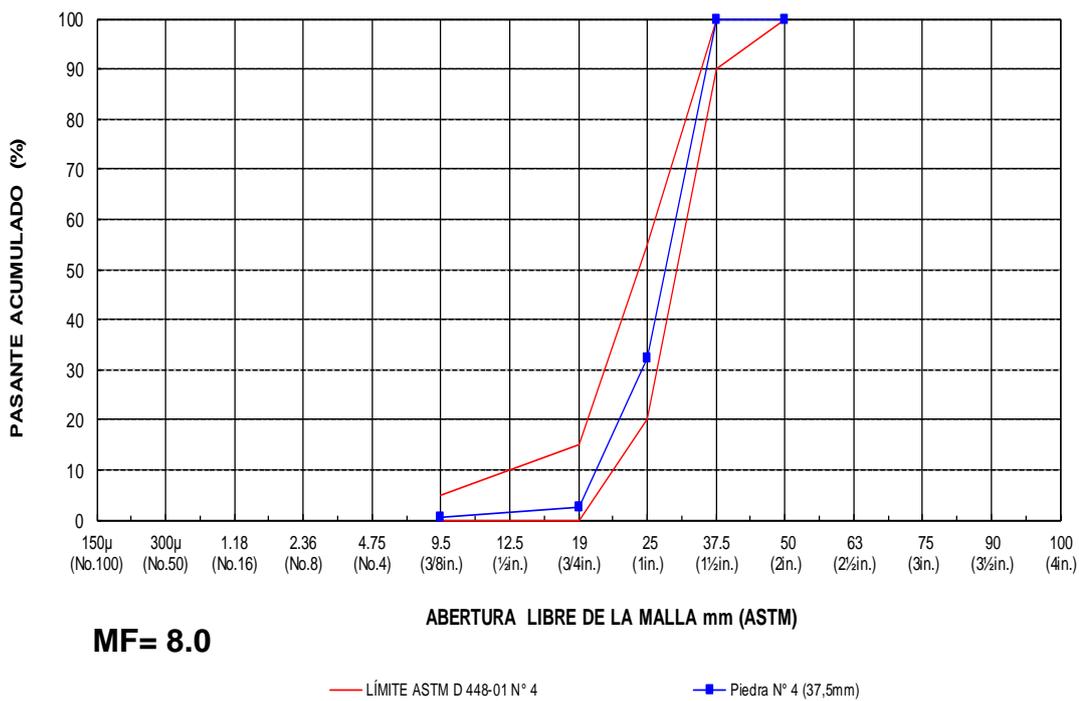


Ilustración 3. 8 Curva Granulométrica Piedra 38mm, ASTM C33M-11.

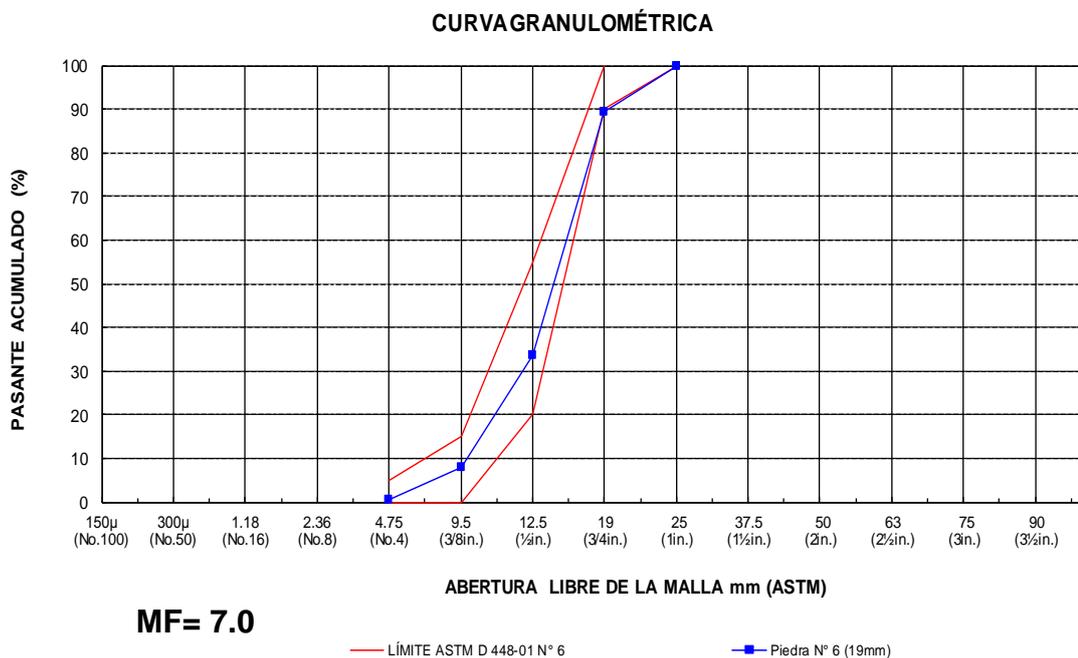


Ilustración 3. 9 Curva Granulométrica Piedra 19mm, ASTM C33M-11.

3.2.2. Trituración del Árido.

El valor de trituración del árido entrega una medida relativa de la resistencia del agregado a trituración bajo una carga gradual de compresión, usando la norma BS 812: PARTE 3:1975.

Áridos que tengan un valor de trituración mayor de 30%, el resultado puede ser anómalo y en esos casos se debe determinar el valor del 10% de los finos, se deben emplear áridos pasantes del tamiz 12.5 mm y retenido en el 9.5mm.

$$\text{Valor de trituración (VT \%)} = \frac{\text{Peso Pasante tamiz \#8}}{\text{Peso Inicial de Muestra}} \times 100\%$$

FORMULA 3. 1 Valor de Trituración.



Ilustración 3. 10 Ensayo Valor de Trituración.



Ilustración 3. 11 Varillado y Colocación de Muestra en Presas.



Ilustración 3. 12 Agregados Triturados.

El valor de trituración es satisfactorio cuando sea menor a 25%, es decir que el agregado tendrá un buen desempeño ante la aplicación de cargas.

3.2.3. **Densidad.**

Una de las propiedades físicas de los agregados es la densidad que se expresa como el valor de su masa para su volumen.

Densidad del Agregado Grueso.

Para determinar este parámetro se utilizó la norma ASTM C 127 – 07. Este ensayo tiene como finalidad conocer la densidad promedio de una cantidad de agregados gruesos (no incluido el volumen de vacíos entre las partículas), la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción de los mismos. Dependiendo del procedimiento a usar la densidad puede ser

Expresada como seca, saturada superficialmente seca (SSS) o como densidad aparente.



Ilustración 3. 13 Peso Agregados Gruesos para Determinar Densidad y Absorción.

Densidad del Agregado Fino.

Para este tipo de agregado se empleó la norma ASTM C 128 – 07a. Este ensayo tiene como finalidad determinar la densidad promedio de una cantidad de agregados finos (no incluido el volumen de vacíos entre las partículas), la densidad relativa (gravedad específica) y su absorción. Dependiendo del procedimiento a usar la densidad puede ser expresada como seca, saturada superficialmente seca (SSS) o como densidad aparente.



Ilustración 3. 14 Peso Agregados Finos para Determinar Densidad y Absorción.

3.2.4. Absorción.

La absorción del agregado es de mucha importancia para el cálculo de agua en el amasado. Los agregados pueden presentar cuatro estados de humedad: Seco Total, Seco al Aire, Saturado Superficialmente Seco (SSS), Húmedo.

$$\text{Absorción \%} = \frac{\text{Peso Condicion SSS} - \text{Peso Seco}}{\text{Peso Seco}} \times 100\%$$

FORMULA 3. 2 Absorción.



Ilustración 3. 15 Secado Muestras para Realizar los Ensayos.

La absorción es un valor usado para calcular el cambio de masa de un agregado, con relación al agua absorbida por los espacios vacíos de los poros que se encuentran en el interior del mismo, comparándolos con su condición seca. El agregado alcanza su mayor potencial de absorción cuando se considera que ha estado en contacto con el agua un tiempo suficiente (5), (6).

(5) Absorción para Agregado Grueso ASTM C 127 – 07.

(6). Absorción para Agregado Fino ASTM C 128 – 07a.

3.2.5. Masas Unitarias/ Peso Volumétrico.

La masa unitaria o peso volumétrico es útil cuando se desea manejar el árido por volumen ya sea en la dosificación, como en la adquisición y transporte del mismo.

Para cuantificar la masa unitaria se valoran dos estados de mezcla del árido, uno suelto y el otro compactado, la prueba se efectúa en un cilindro metálico de diámetro y profundidad prefijado según lo indica la norma ASTM C29 /C29 M que depende del tamaño máximo del agregado en la distribución granulométrica. Estos valores nos dan una idea del porcentaje de vacíos presentes en las masas de agregados.

El peso volumétrico suelto suele ser aproximadamente un 90-95% del compactado.

$$\text{Relación de vacíos} = 1 - \frac{\text{Masa Unitaria}}{\text{Densidad del Árido}}$$

FORMULA 3. 3 Relación de Vacíos.



Ilustración 3. 16 Procedimiento para Determinar Masa Unitaria-Agregados Gruesos.

Este ensayo tiene como finalidad determinar el peso unitario de agregados en una condición compactada o suelta y el cálculo de vacíos entre las partículas de fino , gruesas o una mezcla entre ellos, este ensayo se aplica para agregados que no excedan un tamaño máximo nominal de 125 mm (5 in).

- Masa Unitaria Compactada (Con Varillado)
- Masa Unitaria Suelta (Sin Varillado)
- Masa Unitaria Compactada con Caída



Ilustración 3. 17 Procedimiento para Determinar Masa Unitaria-Arena.

3.2.6. Impurezas Orgánicas.

Impiden la hidratación del cemento: muchas veces la fuente de agregados está en contacto con suelo agrícola, así mismo depósitos aluviales pueden acarrear sedimentos que se depositan con una cantidad considerable de restos vegetales, los cuales interfieren en las reacciones químicas del cemento y afectan la durabilidad del hormigón.

Impurezas Orgánicas son determinadas mediante la norma ASTM C 40 que tiene como finalidad determinar una aproximación de la presencia de impurezas orgánicas perjudiciales.

Recubrimiento que impiden Adherencia: existen en los agregados polvos o partículas finas que se encuentran como recubrimiento de los mismos y que bloquean la adherencia entre este y la pasta cementicia.

Las partículas finas pueden ser: polvo de trituración, arcillas y limos , los minerales de la arcilla son los más perjudiciales ya que algunas arcillas como la “Montmorillonita” absorben mucha agua ,la cual afecta la resistencia del hormigón y traen problemas de fisuración debido a la retracción por secado , según la norma británica BS 882 el contenido de fisuración en los áridos para el hormigón se limita a no más de 15% por peso de arena triturada , 3% por peso de arena natural o grava triturada y 1% por peso de agregado grueso , tomando los porcentajes de partículas menores al tamiz # 200 ASTM en todos los casos.

Partículas Blandas: muchos agregados poseen contaminación de partículas blandas, como terrones de arcilla sobre todo los agregados provenientes de rocas sedimentarias que son susceptibles de tener este tipo de contaminación, debido a la intercalación de sustratos de estos tipos de materiales que contaminan al agregado grueso la norma ASTM C 33 – 78

Limita la cantidad de partículas suaves desmenuzables a 3% para agregados fino, 3 – 10 % para agregado grueso.



Ilustración 3. 18 Preparación de Solución de Hidróxido de Sodio.



Ilustración 3. 19 Vertiendo Solución con Agua a la Arena.



Ilustración 3. 20 Determinación Materia Orgánica.

3.2.7. Reacción Álcali-Agregado.

Usando el “Método de barra de Mortero por Curado Acelerado”, nos permite determinar dentro de 16 días el potencial de reacción de deterioridad álcali-sílice de los agregados ensayados en barras de mortero elaboradas exclusivamente con cemento Portland puro (7).

Este ensayo cubre en primera instancia la determinación de la idoneidad de algunos agregados mediante la combinación con

(7) Reactividad Potencial Alcalina de Agregados ASTM C1260 – 07.

Cemento, en el ensayo si los agregados son reactivos se producirán reacciones expansivas productos de iones de hidróxido asociados con los álcalis (sodio y potasio) durante el ensayo (8). El siguiente gráfico es un ejemplo de agregados potencialmente reactivos.

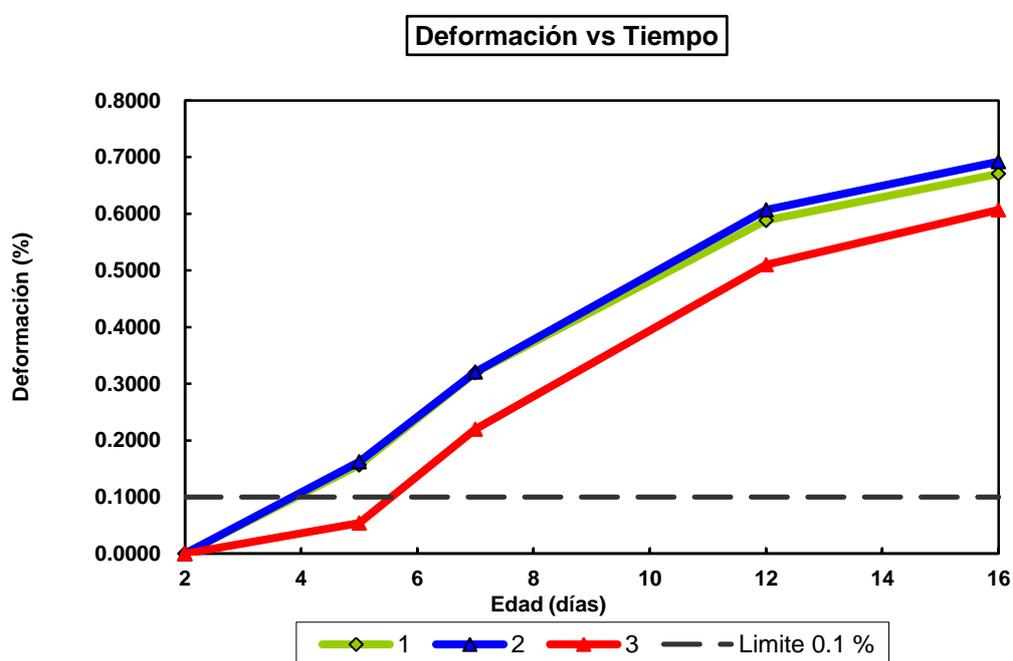


Ilustración 3. 21 Reacción Alcalina Agregado, ASTM C 1260-07, incluye Cemento Portland Puro.

(8) Potencial de Reactividad Alcalina de Combinaciones Cemento – Agregado ASTM C1567 – 08.

Para que se produzcan estas reacciones, es necesaria la presencia de sílice reactiva en los agregados y altos contenidos de álcalis en el cemento. Bajo ciertas circunstancias podrían ser derivadas de otros constituyentes del hormigón, de fuentes externas al mismo, existen dos tipos de reactividad álcali – agregado, la primera es la reacción álcali– sílice, la segunda es álcali-carbonato.

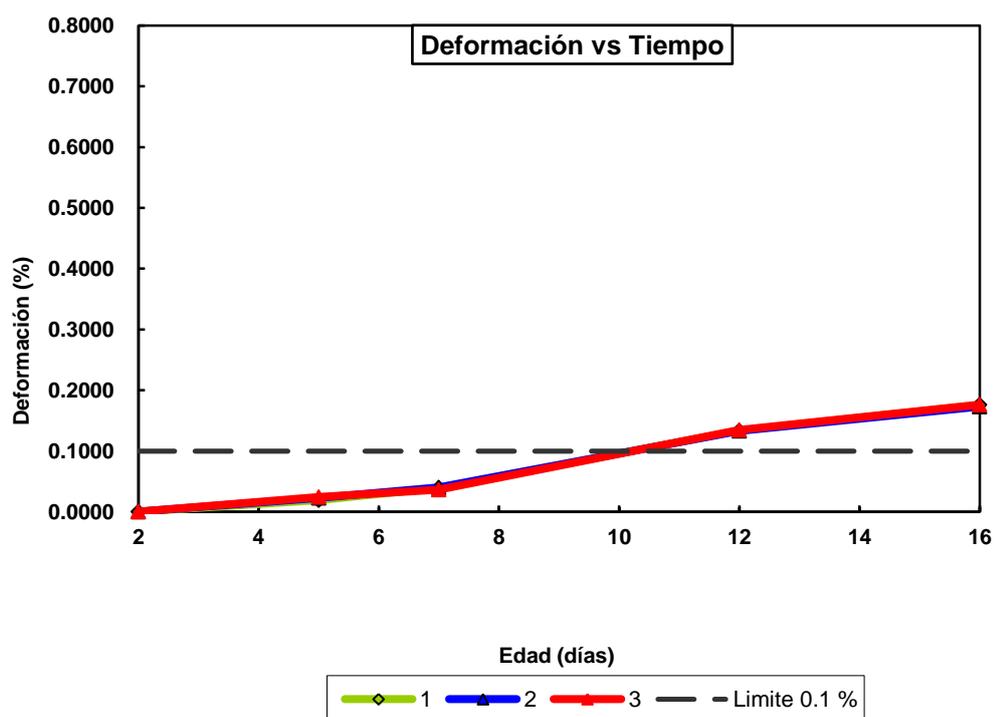


Ilustración 3. 22 Reacción Alcalina Agregado, ASTM C1567-08, incluye Cemento Compuesto HE.

Cuando los límites de reactividad alcalina son superados significa que el agregado es reactivo, pero esta reacción solamente se llevara a cabo si se presentan 3 factores:

- 1.- Agregado Reactivo
- 2.- Presencia de Humedad.
- 3.- Presencia de Álcalis Solubles en el cemento mayor a 0.6% expresado en Oxido de Sodio (Na_2O).

3.2.8. Resistencia a la Abrasión.

Este ensayo se realiza en agregados con tamaños máximos de 37.5mm(1 ½ in) para determinar la resistencia a la degradación usando la máquina de Los Ángeles (9).

Este procedimiento también es realizado en agregados que contengan tamaños mínimos de 19mm (3/4 in) para determinar la resistencia a la degradación usando la máquina de Los Ángeles (10).

(9) Resistencia a la Degradación de Agregados Gruesos de Pequeño Tamaño por Medio de Abrasión e Impacto ASTM C 131-06.

(10) Resistencia a la Degradación de Agregados de Gruesos de Gran Tamaño por Medio de Abrasión e Impacto ASTM C 535-09.

Este ensayo da una medida de la degradación para una granulometría de áridos, dada como resultado de una acción de abrasión o trituración e impacto por medio de esferas de acero y determinado número de vueltas (especificados para cada tipo de agregado) en la máquinas de Los Ángeles que consiste en un cilindro rotatorio, lo que genera un efecto de impacto.

$$\text{Desgaste (\%)} = \frac{\text{Peso Inicial} - \text{Peso Final}}{\text{Peso Inicial}} \times 100\%$$

FORMULA 3. 4 Desgaste Agregados.



Ilustración 3. 23 Procedimiento para Ensayo de Abrasión.

3.3. RESULTADOS DE ENSAYOS.

Tabla 3. 1 Resultados de Caracterización.

CARACTERIZACION DE AGREGADOS	Agregado Grueso		Agregado Fino	
	Piedra # 6	Piedra #4	Arena Natural	Arena Triturada
Densidad SSS (Kg/m3)	2710	2719	2539	2645
Absorción (%)	1.56	1.31	3.79	3.11
P. Volumétrico Suelto (Kg/m3)	1419.5	1298.7	1548.3	1606.7
P. Volumétrico Compactado (Kg/m3)	1557.7	1507.4	1745	1815
Abrasión (%)	30	28	-	-
Impurezas	-	-	-	-
Trituración (%)	20.4	-	-	-
Pasante Tamiz #200 (%)	0.3	0.6	7.9	12.3
Reactividad Alcalina-Agregado	Agregados Reactivos			

3.4. ANALISIS DE RESULTADOS.

La tabla de resultados muestra que los agregados son aptos para ser utilizados en la elaboración de mezclas de HCR.

No hay presencia de materia orgánica, lo cual favorece al agregado, ya que la presencia de la misma contaminaría al hormigón produciendo pérdida de resistencia o retardando el fraguado. Con respecto a las densidades se puede decir que son valores esperados, la densidad de los agregados gruesos son mayores que la de finos, lo contrario sucede con la absorción debido a que las arenas poseen mayor cantidades de partículas pequeñas.

Los valores de abrasión son relativamente bajos, lo cual indica agregados resistentes al desgaste, este valor va de la mano con el resultado del valor de trituración, en el cual para considerar un agregado resistente su porcentaje de trituración debe ser menor al 25% según Norma BS 812: PARTE 3:1975, cumpliéndose en este caso.

Las masas unitarias tanto suelta como compactada de las arenas son mayores a de las piedras, debido a que, por ser de menor tamaño tienen la capacidad de llenar fácilmente vacíos ocupando un mayor volumen, en los ensayos de reactividad alcalina agregado a pesar que los valores se encuentran por encima del límite, es

Decir que aunque los agregados son reactivos, no se producirá la reacción alcalina – agregado en el hormigón, ya que los contenidos de cemento utilizados en HCR son bajos, adicionalmente la presencia de álcalis solubles representadas como Óxido de Sodio (Na_2O) en los cementos empleados corresponden al 0.3% lo cual es menor a 0.6% para que la reacción se lleve a cabo. Por esta razón se recomienda utilizar cementos con contenidos de puzolanas, como los cementos por desempeños, bajo la norma INEN 2380, ya que al reducir el contenido de álcalis es posible mitigar la reacción.

Aunque las curvas granulométricas de los agregados finos no se encuentran dentro de los límites establecidos, estas no puede ser descartada ya que los 4 agregados serán combinados junto con el filler, de tal manera que se obtenga la curva de diseño, la cual en lo posible no deberá salirse de sus límites o estar cercanos a ellos.

3.5. **ARREGLO GRANULOMÉTRICO ESCOGIDO.**

Una vez determinada la idoneidad de los agregados, se procede a buscar la mejor gradación posible, de tal manera que se obtenga la curva granulométrica combinando los diferentes agregados a utilizar en el diseño del hormigón. Los límites establecidos para la curva de diseño fueron escogidos mediante un diseño existente en base a

Las referencias y consejos del Dr. ERNEST K. SCHRADER ingeniero civil, miembro del American Concrete Institute, quien ha participado en el diseño y construcción de más de 100 presas de HCR en 35 países.

Tabla 3. 2 Participación de Agregados en Arreglo Granulométrico.

Material	Piedra #4	Piedra #6	Arena Triturada	Arena Natural	Filler
% Participación	25%	25%	27%	22%	1%
Módulo de Finura	8.0	7.0	3.4	2.8	

Modulo de Finura Ideal del arreglo granulometrico 5.3

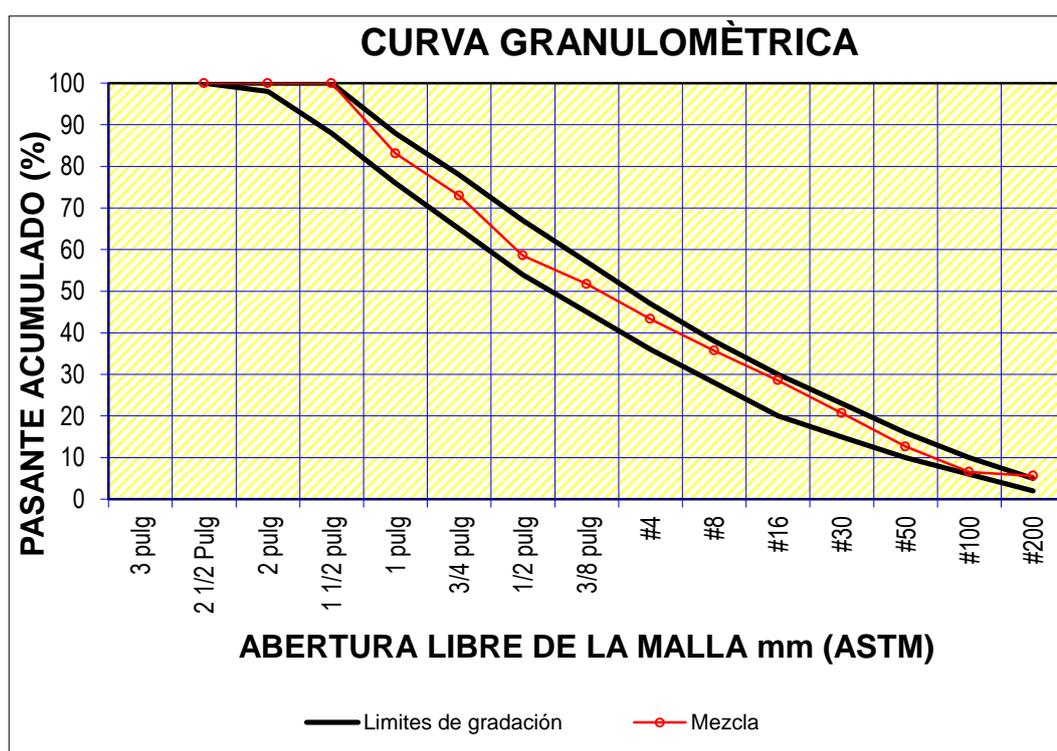


Ilustración 3. 24 Curva Granulométrica de Diseño.

CAPITULO 4

4. ESTUDIO PRELIMINAR Y DOSIFICACION DEL HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO.

En el estudio de dosificaciones de Hormigón Compactado con Rodillo (HCR) es necesario aplicar el método que mejor se acople al medio y proyecto a realizar, se parte de una dosificación patrón, a la cual se le efectuarán correcciones en base a los resultados que se busca alcanzar y de acuerdo a la disponibilidad de materiales que constituirán la mezcla. Ensayos Preliminares son necesarios para determinar características y propiedades del hormigón en estado fresco, que permitirán realizar ajustes a la dosificación patrón y conseguir una mezcla óptima, que posteriormente será ensayada para adquirir los parámetros de diseño tanto en estado fresco y endurecido del hormigón.

4.1. **PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS EN LA ELABORACIÓN DE UNA MEZCLA DE HCR.**

- Menor contenido de cemento que en un hormigón convencional. La proporción de cemento, sea este puro o compuesto se encuentra respecto al total de los agregados en el orden $1/5 - 1/8$ de su masa.
- Menor contenido de agua.
- Densificación del hormigón obtenida por medio de altas energías de compactación.
- Gradación Granulométrica diferenciada.

El contenido de agua en la mezcla:

- Depende básicamente de la absorción de los agregados y de la cantidad mínima necesaria para la hidratación del cemento.
- Fluctúa usualmente entre 4,5 y 7,5%.
- Se la determina en base a pruebas de compactación tipo Proctor o kango o en base a trabajabilidad VeBe del hormigón.

4.2. MATERIALES EMPLEADOS PARA LA DOSIFICACIÓN DE HCR.

4.2.1. Agua.

El contenido de agua para cada dosificación, debe ser la cantidad mínima necesaria para producir una mezcla plástica, que proporcione la resistencia especificada, densidad, uniformidad y trabajabilidad deseada, además que sea compatible con los métodos de transporte y colocación. La calidad del agua debe cumplir con los mismos requerimientos establecidos para hormigón convencional. Como regla se puede decir que son aptas para realizar el mezclado y curado del hormigón las aguas potables. Aguas que no sean potables se las consideran bajo el término “agua dudosa” por lo que deberán cumplir con las siguientes condiciones para ser consideradas como aptas.

- 1- La resistencia a la compresión simple a los 7 días en cubos de mortero elaborados con agua dudosa no deberán ser menor que el 90% de la resistencia conseguida por cubos elaborado con agua potable, este ensayo está basado bajo la norma INEN 488 (Cemento Hidráulico, Determinación de la Resistencia a la Compresión de Mortero en Cubos de 50mm de Arista), Norma ASTM C109, AASHTO T106.
- 2- El tiempo de fraguado inicial no debe adelantarse en más de 60 minutos ni retardarse en más de 90 minutos, respecto del tiempo

Que se obtiene con el agua aceptada. Este ensayo está basado bajo la norma INEN 158 (Cemento Hidráulico, Determinación del Tiempo de Fraguado Método de Vicat), Norma ASTM C191, AASHTO T131.

Otra manera de aceptación de agua dudosa es mediante valores límites obtenidos de resultados de un análisis químico. En la normativa vigente a nivel mundial, para el proyecto y ejecución de obras de hormigón en masa y armado, se especifica rechazar todas las aguas que contengan hidratos de carbono, un PH menor a 5 o que no cumpla con los límites indicados a continuación:

Tabla 4. 1 Calidad de Aceptación del Agua, Tomado Norma NTE INEN 1 855-1 :2001.

Concentración en Agua de Mezcla	Limites (Máximos)
Cloruros como Cl	
Para Hormigón Pretensado	500 mg/l
Para Hormigón Armado o con elementos metálicos embebidos	1000 mg/l
Sulfatos como SO₄	3000 mg/l
Álcalis , como (Na₂O + 0,658k₂O)	600 mg/l
Total de solidos (por masa)	50000 mg/l

4.2.2. **Agregados.**

El contenido de agregados variará de conformidad con la dosificación de hormigón. El tamaño máximo de agregados a utilizarse debe ser respetado. La caracterización de agregados a ser empleados en la dosificación se especificó en detalle en el CAPÍTULO 3.

4.2.3. **Aditivos.**

Los aditivos que generalmente se utilizan en HCR son los reductores de agua, retardadores e incorporación de aire. Siendo los reductores de agua y los retardadores los que le proveen una mejor trabajabilidad a la mezcla, se consigue extender el tiempo de trabajabilidad, reducir la demanda de agua e incrementar el tiempo de fraguado, todas estas características permiten obtener juntas con mayor cohesión entre capas y una menor infiltración a través de estas. Los aditivos son efectivos en mezclas de HCR que contienen una cantidad suficiente de agua de tal manera que se logra una pasta fluida. Para el presente trabajo se ha omitido el uso de cualquier aditivo.

4.2.4. **Cemento.**

El contenido de cemento se ajustará, dependiendo del tamaño, forma y granulometría de los agregados, de los requerimientos estructurales de resistencia y durabilidad. Será determinado en base de los diseños realizados en laboratorio con los materiales a usarse en un Proyecto específico. Generalmente la cantidad de cemento varía entre $60 - 248 \text{ kg/m}^3$ “**ACI – 2011, 207.5R**”.

4.2.5. **Cemento Portland.**

La Mezcla de HCR puede estar hecha con cualquier tipo de cemento Portland. La generación de calor junto con la hidratación del cemento es generalmente controlada con el uso de temperaturas bajas, agua helada o con escarchas de hielo. En hormigones convencionales masivos, este caso se controlará con contenidos bajos de cemento y de bajo calor de hidratación.

Tabla 4. 2 Cementos Portland, Tomado de NORMA NTE INEN 152/ASTM C 150 .

Tipo	Uso
I / IA	Uso General
II / IIA	Moderada resistencia a los sulfatos. Moderado calor de hidratación
III / IIIA	Alta Resistencia Inicial
IV	Bajo calor de hidratación
V	Alta resistencia a los sulfatos

4.2.6. Cemento Pozolánico.

Con el uso de puzolana se puede conseguir los siguientes propósitos:

- Reemplaza al cemento Portland o gran parte de él para reducir la generación de calor
- Reducción de costos
- Proveer mayor trabajabilidad a la mezcla

En presas de hormigón se han empleado cementos pozolánicos con el fin de reducir el calor de hidratación generado, su uso depende de su disponibilidad, características de la puzolana y de las condiciones a las que será expuesto el hormigón. La

Ventaja de utilizar cementos puzolánicos es la reducción de costos y proveer una mayor trabajabilidad en la mezcla.

Tabla 4. 3 Cementos Puzolánicos, NORMA NTE INEN 2380 / ASTM C 1157 .

Tipo	Uso
GU	Uso general.
HE	Alta resistencia inicial.
MS	Moderada resistencia a sulfatos.
HS	Alta resistencia a sulfatos.
MH	Moderado calor de hidratación.
LH	Bajo calor de hidratación.

Opción

R Baja reactividad álcali-agregados

El cemento HE tiene un 20% puzolana, el GU 35% y el MH 45%, siendo estos cementos los utilizados en las dosificaciones.

4.3. TRABAJABILIDAD.

Es necesario garantizar en la mezcla de HCR una adecuada trabajabilidad para lograr una máxima compactación y consolidación, apariencia o acabado aceptable. La trabajabilidad se ve afectada por la porción de pasta presente en la mezcla compuesta por cemento, puzolana, agregado fino, agua y aire. Un criterio para buena trabajabilidad es conseguido cuando exista suficiente pasta para llenar los espacios vacíos producidos por los agregados. La trabajabilidad puede ser medida en una mesa vibratoria con el aparato Vebe de acuerdo a la norma “**ASTM C**

1170". Este ensayo nos da un indicador de trabajabilidad mediante un tiempo denominado tiempo Vebe. Son necesarias mezclas de HCR con un buen grado de trabajabilidad para facilitar la compactación de manera que se consiga una densidad uniforme, garantizando la unión con capas previamente colocadas y de suficiente resistencia para soportar el equipo de compactación. Generalmente un tiempo Vebe que permite conseguir todos estos objetivos se encuentra en el rango de 10 – 45 segundos. La demanda de agua para un nivel específico de trabajabilidad estará influenciado por el tamaño, forma, textura y gradación de los agregados, volumen, material cementicio y agregados finos.

4.4. **CONSISTENCIA.**

La consistencia nos da una medida de la facilidad con la que fluye un material o sustancia. En el caso del hormigón la consistencia determina el grado de humedad de la mezcla, el cual dependerá del uso que se le dará. Si el hormigón tiene poca humedad como es el caso del HCR con revenimiento inferior a 20 mm, se aplica el ensayo de VeBe del "**ASTM C 1170**". Dependiendo de la capacidad de fluir del hormigón existen tres diferentes ensayos generalmente

Adoptados y normalizados para poder determinar su consistencia de acuerdo a la aplicación como se detalla a continuación en la tabla:

Tabla 4. 4 Consistencia Hormigón, Tomado de ACI 2011-207.5R.

Consistencia del hormigón para diferentes propósitos			
Propósito	VeBe s	Revenimiento mm	Extendido mm
Hormigón compactado con rodillo	20 - 30 sobrecarga de 10 kg	0	-
Hormigón de resistencia muy alta para secciones pretensadas de hormigón, compactadas mediante fuertes vibraciones.	Sobre 20	0	-
Secciones de hormigón de alta resistencia, pavimentos y masas de hormigón compactadas por vibraciones.	7 - 20	10	-
Secciones de hormigón reforzadas normalmente y compactadas por vibraciones. Masa de hormigón compactadas manualmente.	-	50	-
Secciones de hormigón muy reforzadas y compactadas por vibraciones. Hormigón compactado manualmente en losas, vigas maestras, columnas y tabiques reforzados normalmente.	-	50 - 100	-
Secciones de hormigón muy reforzadas compactadas sin vibraciones y trabajos donde la compactación es particularmente difícil.	-	100 - 150	-
Hormigón fluido, bombeo.	-	150 - 200	300 - 500
Autonivelante, bajo agua, etc.	-	-	500 - 650

4.5. MÉTODOS DE DISEÑO DE DOSIFICACIONES DE HCR.

Existen métodos basados en la relación existente entre la resistencia con la relación agua – cemento (ley de Abrams), y métodos basados en la relación entre la densidad con la humedad, en el cual se determina el contenido de humedad óptimo que produzca la máxima densidad. “**ACI – 2011, 207.5R**”

El método de HCR con bajo contenido de cemento fue desarrollado en la presa Willow Creek (Estados Unidos) en la que se emplearon contenidos de cemento menor de 120 kg/m^3 , este método se basa en la relación entre la densidad y humedad en la que se determina el contenido de humedad óptimo. Hormigón con bajo contenido de cemento $111- 133 \text{ kg/m}^3$, se podría generar solo de la mitad a 2/3 partes del calor de hidratación de un hormigón normal y por lo tanto tendría menor tendencia al cambio volumétrico.

Numerosos métodos han sido usados satisfactoriamente para el diseño de mezclas de estructuras de HCR alrededor del mundo. Estos métodos tienen diferencias, las cuales están en función de la localización y requerimientos de diseño de la estructura, disponibilidad de materiales, mezclas, colocación, equipos usados, y límite de tiempo. La mayoría de métodos proporcionados son variaciones de dos enfoques generales:

1) La Relación agua cemento

Determina la dosificación por medio del volumen de sólidos.

2) Enfoque del cemento-agregado

Determina la dosificación mediante cada volumen de sólidos o por la relación humedad – densidad. Ambos enfoques están destinados a producir un hormigón con una calidad apropiada para la construcción de presas. Mezclas de HCR pueden seguir la convención del hormigón tradicional, donde la masa de cada material árido es determinada por medio de la condición SSS (Saturado Superficialmente Seco). Una razón práctica para el uso de esta convención estándar, es debido, que la mayoría de plantas mezcladoras de HCR requieren que los constituyentes de la mezcla sean bien identificados en el control de entrada al sistema.

4.5.1. **Método del Cuerpo de Ingenieros.**

Este método es basado en la relación de resistencia con respecto a la relación agua/cemento, con este método se permite calcular las cantidades de mezclas para un volumen de sólido determinado. La relación agua/cemento equivalente para un contenido de cemento está establecido en la siguiente ilustración basada en el criterio de resistencia.

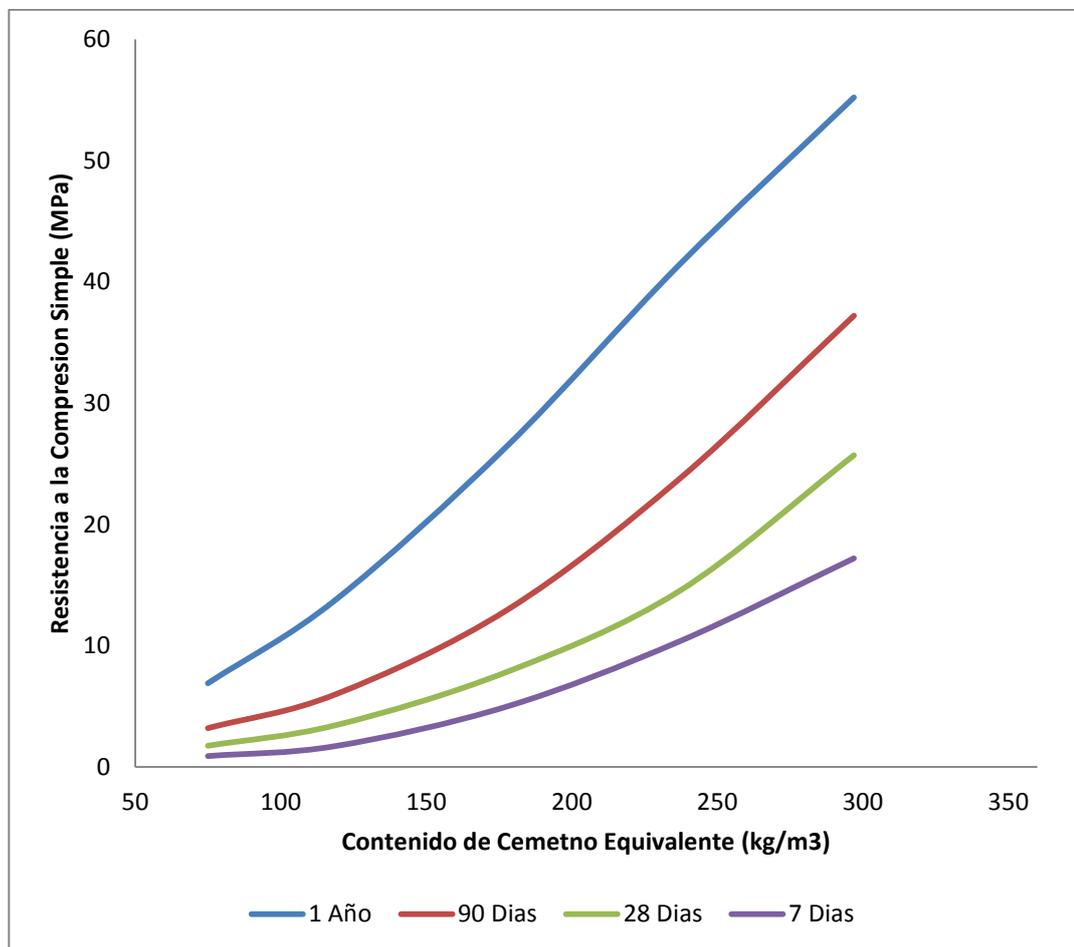


Ilustración 4. 1 Resistencia vs. Edad, Tomado de ACI -2011,207.5R.

La demanda de agua aproximada es basada en el tamaño máximo nominal de los agregados y del tiempo Vebe deseado. Este método también provee algunos aspectos únicos, incluyendo combinación ideal de gradaciones de agregados gruesos con gradaciones de agregados finos limitando la incorporación alta de finos. La resistencia de diseño para la mayoría de presas está basada en 1 año, Un objetivo podría ser

La resistencia a 90 o 180 días y luego podría estimarse mediante la ilustración 4.1.

4.5.2. **Método de Alto Contenido de Pasta.**

Este método fue desarrollado por The U.S. bureau of Reclamation. El propósito de este método fue de proveer una excelente resistencia a la adherencia entre las juntas de elevación y poseer bajas juntas de permeabilidad por medio de contenidos suficientes de pasta en mezclas, con lo que se consiguió mejorar el rendimiento de las juntas de elevación. El óptimo contenido de agua, agregados finos y agregados gruesos son determinados por medio de ensayos de prueba, evaluando la consistencia Vebe para un rango de 10 a 30 segundos.

4.5.3. **Método de Presas de Hormigón Compactado.**

Este método fue desarrollado por ingenieros japoneses y es usado principalmente en Japón. Este método es similar al empleado para hormigón convencional de acuerdo con el “**ACI 2011**” excepto cuando es incorporado el uso de una consistencia métrica. La consistencia métrica es similar al del aparato de tiempo Vebe para mezclas de HCR colocadas en contenedores. El dispositivo es lo suficientemente grande para

Permitir una mezcla completa. El procedimiento consiste en determinar la relación entre la consistencia, **determinado el valor VC**, y el contenido de agua, relación arena –agregado, peso volumétrico del mortero y resistencia a la compresión. La mezcla de HCR adecuada es la óptima combinación de materiales, los cuales siguen las especificaciones del criterio de diseño. Estas mezclas no son extensamente utilizadas fuera de Japón.

4.5.4. **Método de Densidad Máxima.**

Este método es similar al enfoque geotécnico usado para suelo – cemento y bases estabilizadas. El contenido de agua necesario será determinado por medio del tiempo Vebe o por la relación Densidad – Humedad Óptima de los especímenes compactados usando la norma “**ASTM D 1557 Método D**”. Variaciones de este método pueden ser usados dependiendo de la composición de la mezcla o máximo tamaño nominal del agregado. Equipos de compactación como martillo vibrador estándar pueden ser utilizados, algunas variaciones de estos equipos se adoptan mejor para mezclas con agregados grandes o por medio del método de apisonamiento/vibración que simula el equipo compactador en campo y se obtienen densidades similares. En este método, una serie de mezclas con cada

Contenido de material cementicio establecido es preparada y ensayada usando rangos de contenidos de agua. Cada mezcla preparada es compactada con un esfuerzo estándar. La densidad máxima y contenido de agua óptimo son determinados a partir de una gráfica de densidad versus contenido de agua, para especímenes compactados con cada contenido de material cementicio. El contenido de agua usado es ligeramente mayor, generalmente (aproximadamente 1% más) que el valor óptimo determinado en laboratorio para compensar de esta manera la perdida de humedad durante transporte, colocación y extendido de HCR.

4.6. METODOLOGÍA RECOMENDADA PARA OBTENER UNA MEZCLA DE PRUEBA.

El Hormigón Compactado con Rodillo (HCR) tiene características muy similares al hormigón convencional en cuanto a comportamiento estructural y en apariencia. Se requiere diseñar una mezcla de hormigón con bajos calores de hidratación y en la que exista control de fisuramiento y en ocasiones sistemas de enfriamiento. Para lograr esto, el HCR debe tener en lo posible el menor contenido de cemento para cumplir con el requerimiento estructural y así poseer una consistencia seca.

Para obtener una mezcla de prueba debemos tomar en consideración los siguientes puntos:

- Utilice una mezcla previamente probada.
- Realice ajustes de un diseño satisfactorio previamente ensayado.
- Tradición.
- Experiencia.
- Utilice práctica y procedimiento recomendados

Las mezclas que puedan producir problemas de exudación serán controladas con el uso de cementos de grano fino o con el uso de aditivos o adiciones tipo filler. En todo caso, la exudación no será mayor del 3 %.

Una óptima proporción de HCR consiste de un equilibrio entre materiales de buena calidad y métodos de colocación aceptables. Esto incluye minimizar la segregación.

4.7. MEZCLA DE PRUEBA EN LABORATORIO.

Es recomendado que una serie de mezclas sean proporcionadas y ensayadas en laboratorio para abarcar el rango potencial de los requisitos de desempeño dentro de un proyecto determinado. Esta

Práctica permitirá luego realizar modificaciones y ajustes a la mezcla en pruebas industriales sin necesidad de repetir nuevamente el proceso de evaluación.

4.8. ENSAYO DE CARACTERIZACIÓN DE MEZCLA.

Son ensayos de laboratorio, que incluyen temperatura, consistencia, peso volumétrico, y contenido de aire deberán ser realizados al HCR en estado fresco producido a partir de cada mezcla de ensayo. En adición especímenes deberán ser preparados para ser ensayados a compresión simple a varias edades, usualmente 7,28, 90, 180 días y 1 año para indicar la ganancia de resistencia caracterizada para cada mezcla.

Estos especímenes también pueden ser usados para determinar el módulo de elasticidad y relación de Poisson a las edades seleccionadas. Adicionalmente especímenes deben ser también fabricados para resistencia a tracción indirecta o resistencia a flexión a varias edades según lo establecido.

4.9. PROCEDIMIENTOS DE ELABORACIÓN DE MEZCLAS.

El método de diseño empleado fue el de Densidad Máxima, siguiendo los pasos de la metodología para obtener una mezcla de prueba, se partió de un diseño existente mediante las referencias y

Consejos del Dr. ERNEST K. SCHRADER Ingeniero Civil y Especialista en Hormigón.

“Una clave para tener un Buena mezcla de HCR es tener cerca del 21% al 23% de pasta por volumen de mezcla, definiéndose como pasta todo material fino pasante del tamiz #200 (75 um), junto con el cemento, aire, agua y agregado fino. Otra clave para HCR es tener una adecuada gradación, con aproximadamente 45% del agregado que pasa el tamiz # 4 (4,75 mm), y aproximadamente 52% que pase por el tamiz de 3/8 de pulgada (9,5 mm)”.

Así mediante la caracterización de agregados en el CAPÍTULO 3, se obtuvo la siguiente curva granulométrica de diseño.

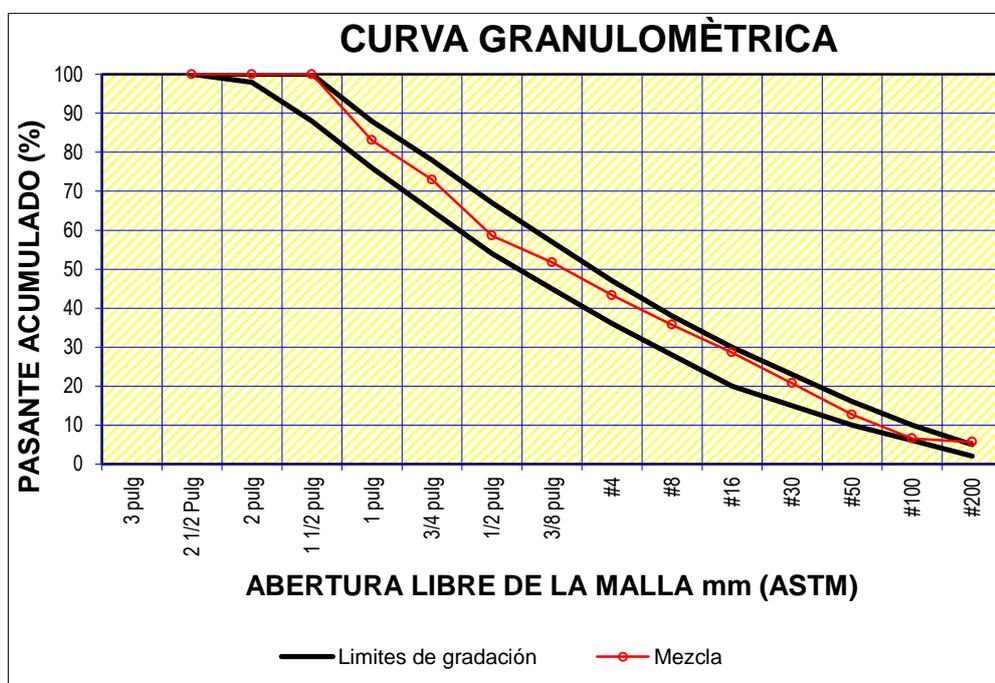


Ilustración 4. 2 Curva Granulométrica de Diseño.

4.10. PROCESO PRELIMINAR.

Para determinar el contenido de humedad óptimo. Se decidió ensayar 3 tipos de Cementos Pozolánicos, HE, GU y MH, los que están regidos bajo la norma internacional “**ASTM C 1157**”y localmente INEN 2380. Posteriormente a la dosificación preliminar se procedió a variar el contenido de agua para que de esta manera se puedan elaborar las curvas Densidad vs Humedad con la finalidad de obtener la Densidad Máxima.

4.10.1. Curvas Densidad vs. Humedad.

Para obtener la dosificación de diseño es necesario encontrar la Densidad Máxima para cada una de las cantidades y tipos de cementos presentados en el proceso preliminar, por tal motivo es necesario elaborar Curvas Densidad vs. Humedad, el punto máximo en la curva representara mi densidad máxima que estará en función de la humedad optima con la cual se calculara la cantidad de agua necesaria para esa dosificación.

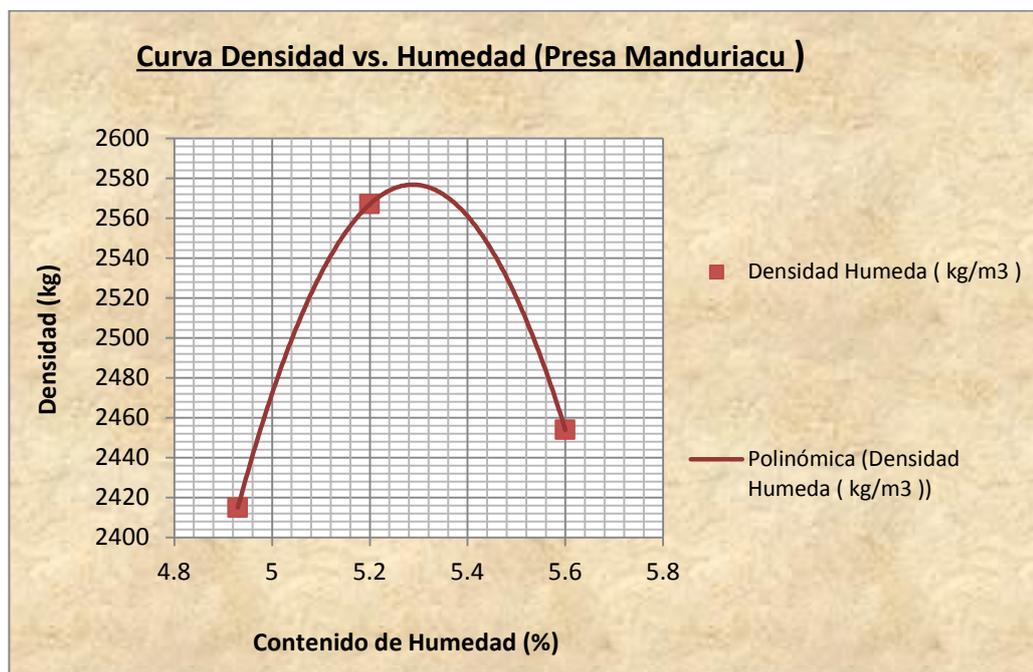


Ilustración 4. 3 Cemento GU 75 kg/m3.

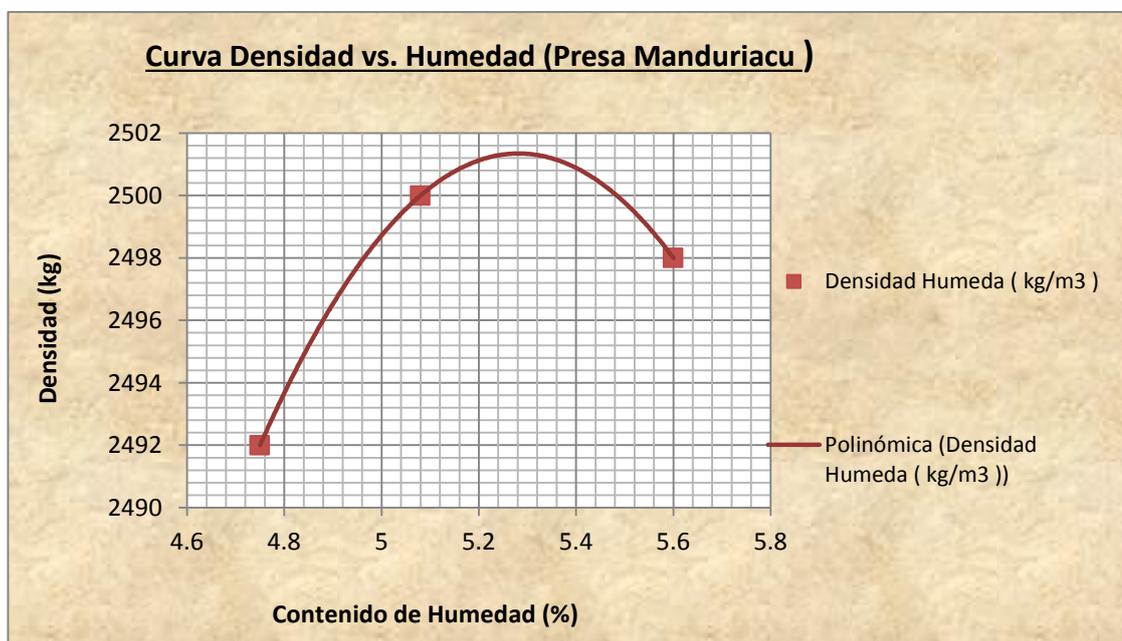


Ilustración 4. 4 Cemento HE 75 kg/m3.

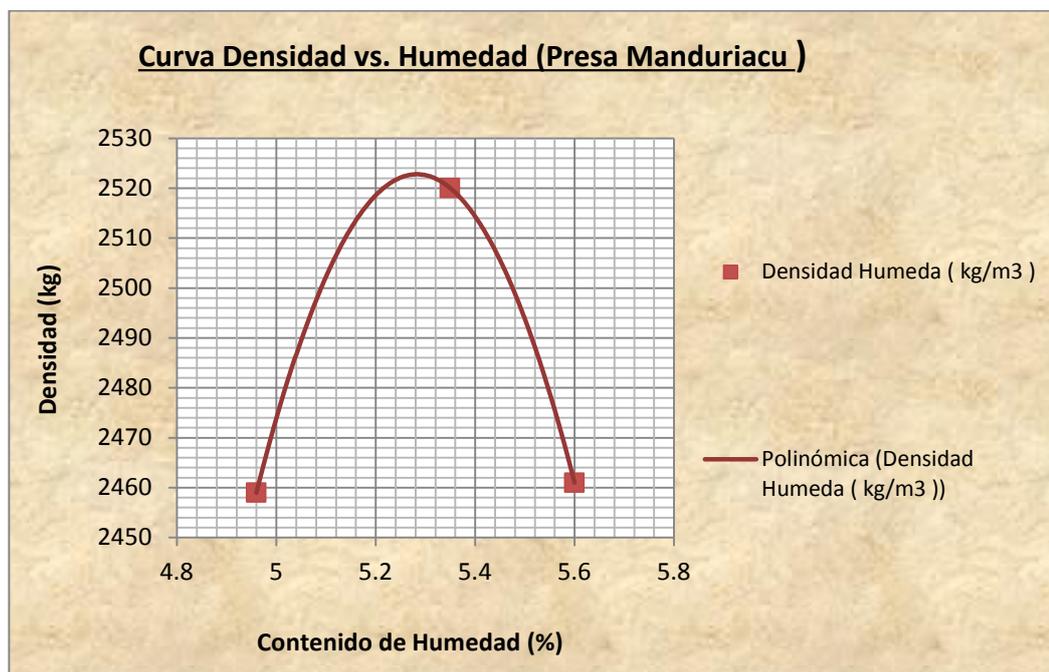


Ilustración 4. 5 Cemento MH 75 kg/m3.

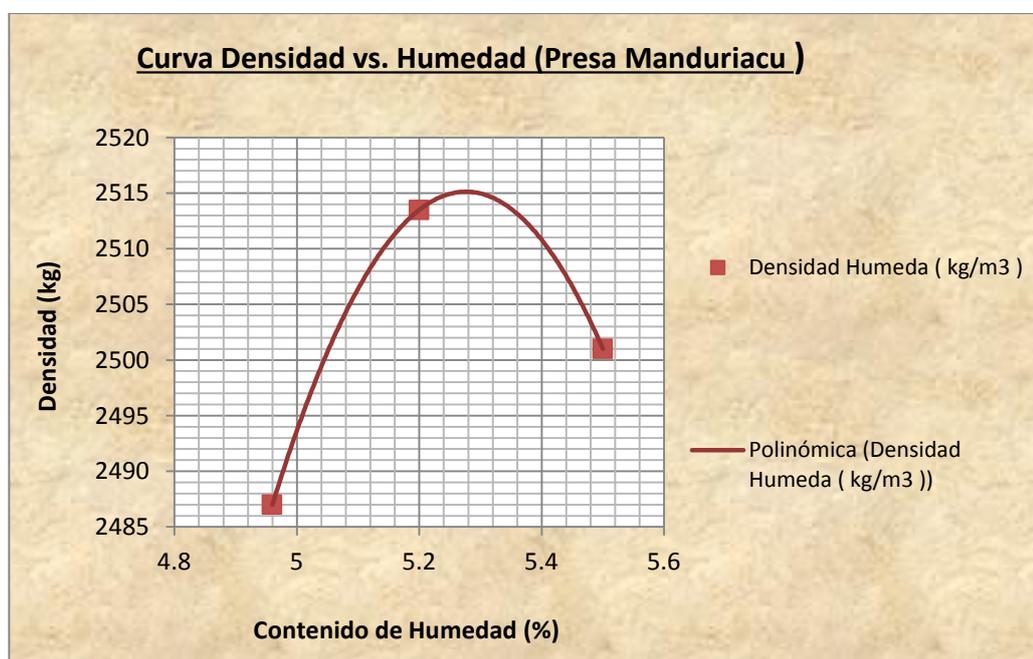


Ilustración 4. 6 Cemento GU 95 kg/m3.

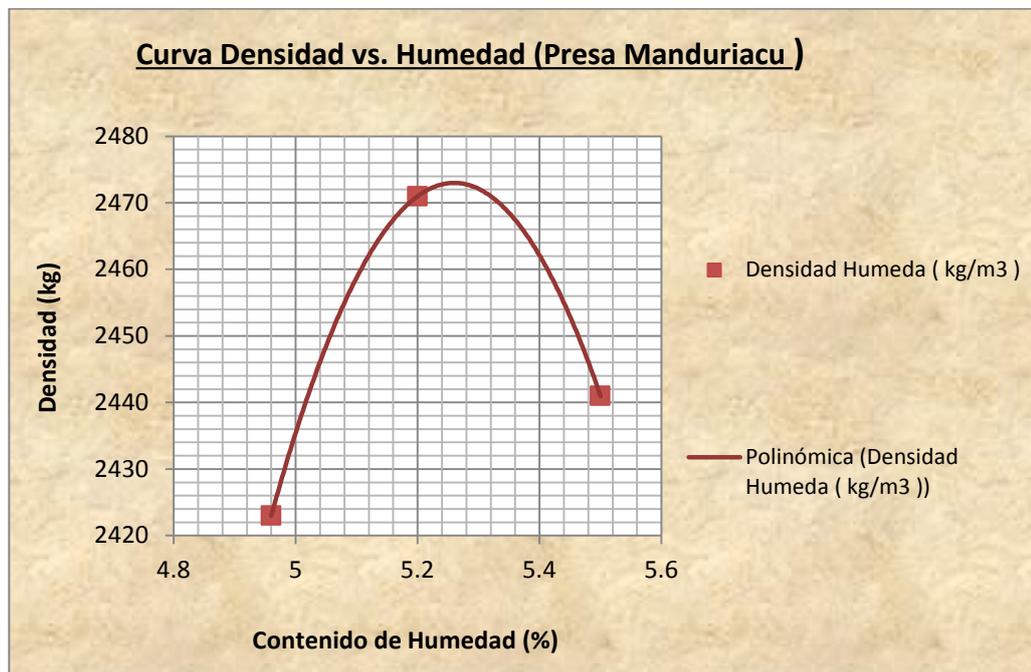


Ilustración 4. 7 Cemento HE 95 kg/m3.

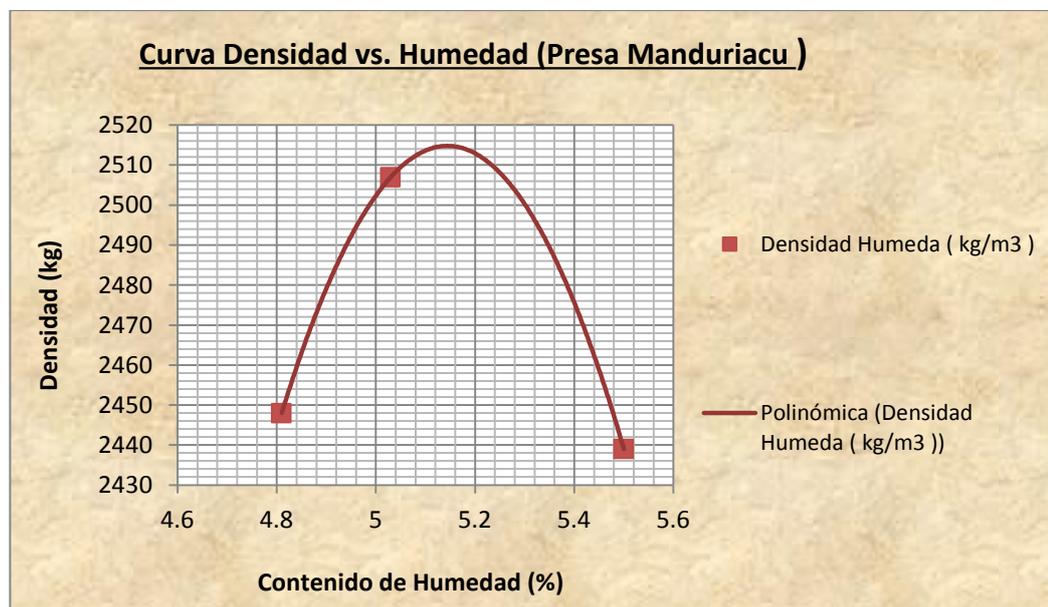


Ilustración 4. 8 Cemento MH 95 kg/m3.

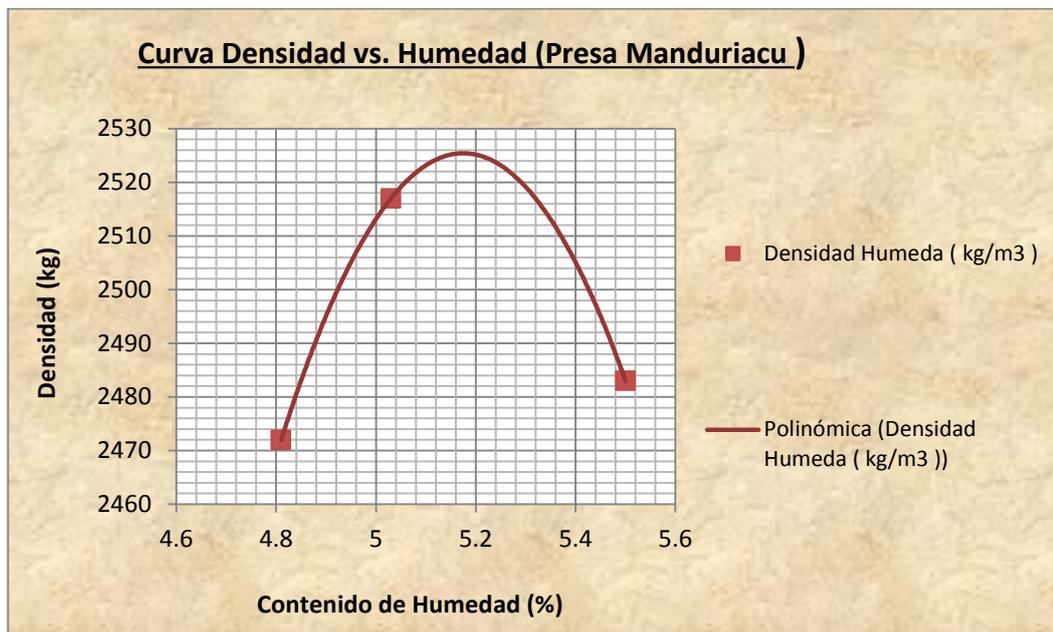


Ilustración 4. 9 Cemento HE 105 kg/m³.

Como se observa en las gráficas hay una tendencia similar en los 3 tipos de cementos, en los cuales el contenido de humedad óptimo es el mismo para cada una de los 3 cementos, por tal motivo obviamos el cálculo para los contenidos de 105 kg de cemento para GU y MH.



Ilustración 4. 10 Pesado de Materiales para Elaboración de Mezcla.



Ilustración 4. 11 Mezclado de Materiales.

Para determinar la curva Densidad vs. Humedad se procedió a determinar la densidad junto con el contenido de aire de cada mezcla mediante la olla de Washington la cual se llenó en 3 capas de igual volumen, posteriormente fueron debidamente compactadas mediante el martillo Hilti modelo TE 805 que posee un apisonador Circular de 75 mm de diámetro, la idea es simular a un rodillo vibrador de 10 toneladas. La acción del martillo se detuvo cuando la pasta sobresalía y cubría el apisonador. Para la última capa es necesario utilizar un collarín y un disco de madera para darle el acabado final a la superficie. Para determinar la densidad se procedió a dividir el peso de la olla incluido el hormigón para su volumen.



Ilustración 4. 12 Mezclado y Compactación de Materiales.

Para determinar el contenido de aire se debió enrasar la olla de Washington y colocarle su tapa, se procedió a golpearla para que el aire atrapado por la tapa saliera, se introdujo agua y nuevamente se golpeó la olla. Se cerró una válvula y se inclinó ligeramente para sacar el aire en exceso. Finalmente se cerró la segunda válvula y se procedió a realizar la lectura del contenido de aire en la mezcla.



Ilustración 4. 13 Determinación de Densidades.

4.10.2. Descripción del Procedimiento de Elaboración de Mezclas.

Del proceso de elaboración de mezclas se prepara el diseño de hormigón, en este caso se probaron 9 mezclas, en los que varía el tipo de cemento, humedades y densidades.

1. Se pesaron cada uno de los materiales que intervinieron en la dosificación.



Ilustración 4. 14 Pesando Piedra #4 para Diseño de HCR.



Ilustración 4. 15 Pesando Arena para Diseño de HCR.

2. Se empleó una mezcladora con una capacidad de 100dm^3 , la cual se humedeció previamente antes de introducir los materiales sobre todo los agregados para que estos no pierdan humedad.



Ilustración 4. 16 Mezcladora de 100dm^3 .

3. Se introdujeron primero a la mezcladora los agregados gruesos, seguidos de los finos (arenas), se dio un primer

Encendido a la mezcladora para que los materiales se homogenicen. Posteriormente se colocaron el cemento junto con el filler, el agua era arrojada poco a poco dentro de la mezcladora en funcionamiento. El proceso de mezclado debe ser realizado por no más de 3 minutos.

4. Se procedió a medir la temperatura de la mezcla y a determinar el tiempo Vebe.



Ilustración 4. 17 Ensayo Vebe, Determinación de Trabajabilidad.

Para medir la trabajabilidad se tomó una muestra aproximada de 13 kg, la cual fue colocada dentro del molde, posteriormente se coloca una sobrecarga de 22.7 kg sobre la superficie de la muestra, se encendió la máquina Vebe y se tomaron 3 tiempos, T1 es el tiempo que le demoró a la pasta comenzar a fluir alrededor de la

Sobrecarga, el T2 es el tiempo que le toma la pasta formar un anillo alrededor del anillo de la sobrecarga, y T3 es el tiempo que le demora a la pasta cubrir el anillo de sobrecarga.

5. Se Procedió a llenar la olla de Washington previamente humedecida en 3 capas del material, las cuales fueron vibro-compactadas mediante el martillo Hilti modelo TE 805 que posee un apisonador circular de 75 mm de diámetro, la idea es similar a un rodillo vibrador de 10 toneladas. La acción del martillo se detuvo cuando la pasta sobresalía y cubría el apisonador.

Para la última capa es necesario utilizar un collarín y un disco de madera para darle el acabado final a la superficie. Posteriormente se determinó la densidad por medio de la división entre el peso de la olla incluido el hormigón con su volumen.



Ilustración 4. 18 Llenando Olla de Washington para Determinar la Densidad.

6. Se procedió a determinar el contenido de aire, para lo cual una vez enrasada la olla se le coloca su tapa, se procedió a golpearla para que el aire atrapado saliera, se introdujo agua y nuevamente se golpeó la olla, se cerró una válvula y se inclinó ligeramente para sacar el aire en exceso. Finalmente se cerró la segunda válvula y se procedió a realizar la lectura del contenido de aire en la mezcla.

4.10.3. Dosificaciones Estudiadas.

Una vez determinado el contenido de humedad óptimo se procede a realizar ajustes para determinar la dosificación de diseño.

Tabla 4. 5 Dosificación HCR, Cemento MH.

DOSIFICACION HORMIGON COMPACTADO CON RODILLO - PRESA MANDURIACU				
Tipo de Cemento : MH				
<i>Materiales (Kg)</i>	<i>Pesos S.S.S. x m3</i>	<i>Pesos S.S.S. x m3</i>	<i>Pesos S.S.S. x m3</i>	<i>Porcentaje Agregados</i>
<i>Cantidad Cemento</i>	78	97	107	
<i>Agua</i>	134	132	131	
<i>Piedra No 4(38mm)</i>	578	571	566	24.76%
<i>Piedra No 6(19mm)</i>	578	571	566	24.76%
<i>A. triturada</i>	624	616	611	26.74%
<i>A. natural</i>	508	502	498	21.79%
<i>Filler</i>	23	23	23	0.99%
<i>Densidad Teorica</i>	2522.0	2513.0	2502.0	
<i>Humedad (SSS)</i>	5.31%	5.27%	5.24%	

Tabla 4. 6 Dosificación HCR, Cemento HE.

DOSIFICACION HORMIGON COMPACTADO CON RODILLO - PRESA MANDURIACU				
Tipo de Cemento : HE				
Materiales (Kg)	Pesos S.S.S. x m3	Pesos S.S.S. x m3	Pesos S.S.S. x m3	Porcentaje Agregados
<i>Cantidad Cemento</i>	77	96	108	
<i>Agua</i>	133	131	132	
<i>Piedra No 4(38mm)</i>	573	563	571	25.00%
<i>Piedra No 6(19mm)</i>	573	563	571	25.00%
<i>A. triturada</i>	619	608	617	27.00%
<i>A. natural</i>	504	496	503	22.00%
<i>Filler</i>	23	23	23	1.00%
<i>Densidad Teorica</i>	2501.0	2479.0	2526.0	
<i>Humedad (SSS)</i>	5.31%	5.27%	5.24%	

Tabla 4. 7 Dosificación HCR, Cemento GU.

DOSIFICACION HORMIGON COMPACTADO CON RODILLO - PRESA MANDURIACU				
Tipo de Cemento : GU				
Materiales (Kg)	Pesos S.S.S. x m3	Pesos S.S.S. x m3	Pesos S.S.S. x m3	Porcentaje Agregados
<i>Cantidad Cemento</i>	79.4	98	107.6	
<i>Agua</i>	136.6	132	132.2	
<i>Piedra No 4(38mm)</i>	589.0	571	570.1	24.94%
<i>Piedra No 6(19mm)</i>	589.0	571	570.1	24.94%
<i>A. triturada</i>	636.1	617	615.7	26.94%
<i>A. natural</i>	518.3	503	501.7	21.95%
<i>Filler</i>	23.6	23	22.8	1.00%
<i>Densidad Teorica</i>	2572.0	2515.0	2520.0	
<i>Humedad (SSS)</i>	5.31%	5.27%	5.24%	

Tabla 4. 8 Trabajabilidad, Humedad y Temperaturas de las Mezclas.

Tipo Cemento	Cantidad	Tiempos Vebe (s)			Temperatura Ambiente (°C)	Humedad Relativa (%)	Temperatura Hormigon (°C)	Densidad (kg/m ³)
		T1	T2	T3				
GU	75.0	31.5	42.0	60.2	26.0	96.0	28.4	2572.0
GU	105.0	23.0	25.0	60.4	26.5	90.0	28.6	2520.0
GU	95.0	20.0	42.0	60.1	25.0	97.0	27.8	2515.0
HE	75.0	14.0	17.5	25	26.0	94.0	28.7	2501.0
HE	105.0	30.9	41.6	46.62	27.0	86.0	28.8	2526.0
HE	95.0	2.4	18.8	24.16	26.0	90.0	28.5	2479.0
MH	75.0	3.0	9.0	21	27.0	92.0	28.9	2522.0
MH	105.0	8.0	14.0	26	27.0	89.0	28.6	2502.0
MH	95.0	15.0	20.0	30	28.0	89.0	29.1	2513.0

4.10.4. Elaboración de Especímenes.

1. Por el tamaño máximo nominal del agregado (piedra No. 4, 38 mm) se emplearon modelos de 150 x 300 mm para la confección de los cilindros.
2. Cada cilindro debía estar previamente limpio, engrasado y ajustados para evitar que se abran durante la vibro – compactación.
3. Se procedió a llenar en 3 capas con el martillo Hilti modelo TE 805, el cual simula un rodillo vibrador de 10 toneladas, el tiempo por cada capa es de 10 –20 segundos o cuando se vea fluir pasta sobre el apisonador.



Ilustración 4. 19 Elaboración de Especímenes.

4. Una vez terminado el proceso de fabricación de los cilindros, se los dejó reposar 24 horas para luego desmoldarlos y ponerlos en la piscina de curado llena con agua y cal donde permanecieron hasta la fecha en la cual se realizaron los ensayos. Todos los cilindros deben ser moldeados dentro de un tiempo de 25 minutos luego que se ha finalizado el proceso de mezclado.



Ilustración 4. 20 Curado de Especímenes.

4.11. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

De los resultados obtenidos de los ensayos preliminares se demostró una tendencia con el contenido de humedad óptimo, es decir que el tipo de cemento no influye en este parámetro por ser contenido bajo del mismo. Las densidades fluctúan en el orden de 2479 – 2572 kg/m³ lo que caracteriza a un hormigón denso.

Con la dosificación corregida se realizaron los ensayos pertinentes al hormigón para determinar los tiempos Vebe (T₂). Estos tiempos están acorde con el rango de 10 – 45 segundos lo que describe a una mezcla con una buena trabajabilidad. Un valor Promedio de 1.1 % de aire indica que la mezcla puede desarrollar una buena compactación cuando se apliquen energías de compactación adecuadas consiguiendo una menor relación de vacíos debido a una mayor densificación de los materiales lo cual influye a la trabajabilidad.

Temperaturas de las mezclas fluctúan en el orden de 26 – 28 °C, lo que indican poca generación de calor, muy importante en hormigones masivos por la gran cantidad de volumen manejado.

CAPITULO 5

5. PROPIEDADES MECÁNICAS Y TÉRMICAS DEL HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO.

En la mayoría de casos prácticos la propiedad más importante del hormigón es la durabilidad o la permeabilidad, sin embargo aún en muchos casos se considera como característica más importante del hormigón a la resistencia que puede ser a compresión o tracción. Por lo general, el objetivo de hacer los ensayos es determinar el cumplimiento de las especificaciones de resistencia y medir el nivel de variabilidad de la misma en el hormigón. Las propiedades mecánicas y térmicas del HCR influyen el comportamiento del hormigón ante las condiciones de servicio dentro de obra y una vez que la misma entre en funcionamiento.

5.1. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HCR.

Las propiedades de dureza del HCR son similares al de grandes masas de hormigón convencional. Sin embargo existen algunas diferencias debido principalmente a los distintos requerimientos de resistencia, rendimientos y contenidos de vacíos de las mezclas de HCR utilizado para presas (1).

5.2. COMPORTAMIENTO DEL HCR EN ESTADO ENDURECIDO.

Las propiedades presentadas por este tipo de hormigón en estado endurecido son:

- Resistencia a la compresión
- Módulo de Elasticidad
- Resistencia a la tracción
- Contracción por Secado
- Coeficiente de dilatación

Por la falta de equipos no se ha podido realizar el ensayo para determinar la Resistencia al corte.

(1) Resistencias exigibles 7 y 28 días correspondientes a las característica deseadas a los 90 días, debido a que la resistencia crece de forma más lenta que en un hormigón convencional.

5.2.1. Resistencia a la Compresión (ASTM C 39M).

El ensayo es realizado en la fase de pre-diseño donde por medio de ensayos a la rotura se determina si la proporción de agregados, contenido de cemento y humedad empleada en las diferentes mezclas permite obtener la resistencia especificada (para este proyecto - 10MPa mínimo a 90 días). La resistencia a la compresión es usada para satisfacer los requerimientos de carga de diseño y para influenciar otras propiedades como la durabilidad. Durante la construcción, este ensayo es usado para realizar el control de calidad de la mezcla. Diferencias significantes en la compactación afectará la resistencia del HCR.

Para especímenes de laboratorio debe impartirse una energía de compactación suficiente para lograr una adecuada densificación o de lo contrario no se llegará al nivel de resistencia requerido debido a un incremento de vacíos. La resistencia del HCR depende de la calidad y gradación de los agregados, proporción de la mezcla, así también como del grado de compactación. Para mezclas totalmente consolidadas, la ligera disminución del contenido de humedad produce un mayor esfuerzo de compresión. Las probetas pueden ser preparadas usando la mesa vibratoria como se describe en la

Norma “**ASTM C 1176**”, en el caso de tener mezclas con altos contenido de material cementicio o puede ser compactada por martillo vibrador para mezclas de consistencia seca. En nuestro país el INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización) regulariza los procedimientos de ensayos, basándose en las normas ASTM. La NTE “**INEN 1576**” o el “**ASTM C 31**” las cuales proporcionan el procedimiento para la toma de muestras, indicando que el cilindro estándar a partir del cual se realizara el ensayo será de 150 mm de diámetro por 300 mm de longitud.

5.2.2. **Esfuerzo a la Tracción (ASTM C-496 96).**

El esfuerzo a la tracción de HCR es requerido para propósitos de diseño, la relación entre esfuerzo a tracción y compresión de mezclas de HCR se encuentran generalmente en el rango de 5 – 15% de resistencia a la compresión, dependiendo de la calidad del agregado, resistencia, edad y método de ensayo empleado. La relación directa entre el esfuerzo a tracción y compresión crecerá junto con el incremento de la edad y resistencia a la compresión simple. Hay tres tipos de ensayos para determinar la resistencia a la tracción: tracción directa, flexión y tracción Indirecta. La resistencia a tracción indirecta del HCR es menor que la de la resistencia a la tracción directa.

5.2.3. Resistencia al Cortante.

El esfuerzo al cortante es generalmente la propiedad de dureza más crítica para las presas de gravedad de HCR. El esfuerzo total al corte es la suma de la cohesión más la fricción interna, principalmente a través de las uniones, intactas y juntas de elevación horizontal. El esfuerzo al cortante sin confinamiento de una sección de HCR varía de 16 – 39 % del esfuerzo de compresión, mientras que el esfuerzo al cortante sin confinamiento para colocación de hormigón convencional, es determinado por el ensayo de corte directo generalmente es un 20 – 25% del esfuerzo a compresión, pero un valor conservador de aproximadamente 10% es usada en el diseño.

5.2.4. Módulo de Elasticidad (ASTM C-496 87).

El módulo de elasticidad es típicamente requerido para realizar modelos de análisis de esfuerzo. En análisis lineal elástico, un bajo módulo de elasticidad podría ser deseable, ya que puede reducir el esfuerzo de una supuesta relación lineal vs. alto módulo de material. Sin embargo, en materiales frágiles la resistencia última es usada para predecir el esfuerzo que podría presentarse al momento de las fisuras (no lineal) rango para

Materiales con bajo módulo. Esto no predice correctamente el comportamiento de resistencia lineal elástica.

Generalmente para un tipo de agregado, módulo de elasticidad son funciones de la resistencia.

5.3. CAMBIOS DE VOLUMEN.

5.3.1. Contracción Por Secado.

La contracción por secado es principalmente gobernada por el contenido de agua de la mezcla y, en parte medida por el grado de restricción que producen los agregados. Los cambios de volumen producto de contracción por secado en HCR es similar al de hormigón convencional o menor debido a la reducción de agua empleada.

5.3.2. Capacidad de deformación por Tracción.

Deformación es inducida en el hormigón cuando se produce cambio de volumen moderado. Cuando resultan cambios de volumen en deformación que exceden la capacidad de deformación por tracción máxima ocurren la formación de fisuras. Deformaciones por tensión en hormigón puede ser desarrollado

Por cargas externas así como por cambios de volumen inducidos mediante secado, reducción en temperatura y retracción autógena (2).

5.4. PROPIEDADES TÉRMICAS.

Propiedades térmicas incluyen calor específico, conductividad, coeficiente de expansión térmica y temperatura adiabática (3) como principal preocupación en hormigones masivos. Propiedades térmicas son gobernadas por la cantidad de material cementicio de la mezcla. Sin embargo valores para hormigón convencional y HCR son similares, los valores de medida actuales pueden variar significativamente dependiendo de los agregados, cemento y tipo de puzolana.

(2) Cambio de volumen del hormigón debido a la pérdida de agua producto de combinarse Químicamente con el cemento.

(3) Pérdida de Temperatura entre hormigón y el entorno.

5.4.1. **Coefficiente de Dilatación.**

En el análisis térmico de presas son requeridos parámetros como el calor específico, el coeficiente dilatación térmica, el crecimiento diabático de temperatura y la conductividad térmica; estas propiedades dependen directamente de las propiedades térmicas de los agregados y contenido de cemento.

5.5. **PERMEABILIDAD.**

La permeabilidad de HCR es en gran parte dependiente de la porosidad presente en la masa compactada, como en juntas en una matriz de mortero, por lo tanto la permeabilidad es parcialmente controlada por la mezcla proporcionada, método de colocación, y grado de compactación. HCR es relativamente impermeable cuando la mezcla contiene suficiente pasta y mortero, una adecuada distribución de partículas finas que minimicen los vacíos del sistema, de tal manera que llenen espacios vacíos en ocasiones se emplean fillers. En general una masa sin juntas de HCR proporcionada con suficiente pasta tendrá valores de permeabilidad similar o inferiores al hormigón de masa convencional cuando está muy bien compactada.

Mezclas que tienen un volumen de pasta en el orden de 18 – 22 % por masa de hormigón proveerán un nivel adecuado de impermeabilidad, similar al hormigón convencional.

5.6. DURABILIDAD.

El HCR al igual que el hormigón convencional, está sujeto a una deterioración potencial debido a los efectos de abrasión/erosión, congelamiento y descongelación y otros factores como la reacción álcali – sílice y ataque de sulfatos

Abrasión/erosión: esta resistencia es principalmente gobernada por la calidad de los agregados y contenido de cemento.

Vertederos de desbordamiento de presas de HCR sujetas a uso frecuente deberán generalmente ser alineado con alta calidad de hormigón para prevenir el daño por este factor.

Congelación y Descongelación: Mezclas de HCR normalmente tienen poca cantidad de aire incorporado y consecuentemente no tendrá una alta resistencia ante el congelamiento / descongelamiento. Aire incorporado en muestras de HCR demuestran mayor resistencia ante el congelamiento/descongelamiento comparadas con las que no

Tienen aire incorporado. Sin embargo en nuestro país este fenómeno no es frecuente.

5.7. ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS.

Los ensayos destructivos permiten determinar propiedades físicas en el hormigón mediante especímenes (4) ensayados hasta llegar a la falla o rotura de los mismos. Las propiedades determinísticas que dan a conocer el buen desempeño de la estructura, es decir la resistencia del HCR requerido para el diseño son: Resistencia compresión simple (f'_c), Resistencia Tracción Compresión Diametral (TCD), Modulo de Elasticidad (E_c). Los ensayos no destructivos permiten determinar propiedades en el hormigón endurecido sin la necesidad de llevar a las probetas a la falla o rotura de las mismas, entre ellos encontramos el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico y coeficiente de dilatación térmica.

(4) Muestras cilíndricas de 150 mm de diámetro por 300mm de alto para determinar propiedades mecánicas del hormigón.

5.7.1. Ensayo a la Compresión Simple.

Para realizar el ensayo a compresión simple fue necesario realizar un refrentado de los especímenes para nivel la superficie sobre la que se aplicó la carga de compresión. El refrentado consiste en colocar un mortero de nivelación con el fin de conseguir una transmisión uniforme de la carga, de esta manera no existirá concentración de esfuerzo en alguna irregularidad en la cara del espécimen donde fue aplicada la carga. El mortero está constituido de Cemento Tipo I, agua, humo de sílice, aditivo plastificante, aditivo acelerante y arena fina, que cumplen con la Norma "ASTM C 167".



Ilustración 5. 1 Mezclado de Mortero para Refrentar.

Una vez preparado el mortero se procedió a engrasar los moldes para el refrentado, se debió humedecer la cara del Cilindro a refrentar y colocar el mortero formando un pequeño cono.



Ilustración 5. 2 Engrasado de Moldes para Refrentar.



Ilustración 5. 3 Colocación de Mortero a los Especímenes.

Una vez que el cilindro con mortero fue colocado en el molde de refrentado, se procedió a llevar el mismo a una cama vibradora para realizar el proceso final, la pasta de mortero fluyó alrededor del cilindro lo que indicó un nivelado uniforme, a continuación se limpiaron los bordes. Se dejaron reposando los cilindros por 24 horas para que el mortero adquiriera resistencia, luego se los volvieron a colocar en la piscina para continuar con su proceso de curado hasta que cumplieran con la edad requerida para ser ensayos.



Ilustración 5. 4 Proceso de Vibración y Acabado del Refrentado.

Cuando los cilindros cumplieron con las edades establecidas para ser ensayadas, fueron medidos para determinar sus dimensiones y peso, estos datos se fueron ingresando a la Prensa con capacidad de 2000KN que calculca el esfuerzo a compresion simple, este ensayo esta regido bajo la Norma “**ASTM C 39M**”.



Ilustración 5. 5 Prensa de Capacidad de 2000KN.

5.7.2. Ensayo de Módulo de Elasticidad.

Este ensayo fue realizado a la par con el de compresión simple, fue necesario el uso de un extensómetro el cual mide las deformaciones del cilindro con una precisión de 0.002mm, el registro de esfuerzos con Deformaciones permite elaborar la curva esfuerzo vs. deformación. El extensómetro se ancló al cilindro por medio de unos tornillos de manera que al deformarse

El cilindro se accionase un deformímetro que mediante un dial se de lectura de la deformación. Para elaborar la curva fue necesario realizar una precarga, posteriormente se realizaron lecturas cada 5 KN y una vez que la carga alcanzaba el limite elástico las lecturas se hacían cada 2.5 KN.

Este ensayo se encuentra regido bajo la Norma “**ASTM C-469 87**” , el valor de Módulo de elasticidad es el módulo secante correspondiente al 40% del esfuerzo de rotura el cual es una aproximación bien cercana a la realidad del módulo de elasticidad.



Ilustración 5. 6 Extensómetros para Medir Deformación de Cilindros.



Ilustración 5. 7 Determinación del Módulo de Elasticidad

5.7.3. Ensayo a la Tracción Por Compresión Diametral.

Los Cilindros fueron ensayados en la Prensa con capacidad de 2000KN , para transmitir la carga a los cilindros fue necesario el uso de un molde metálico con dos tiras de plywood de tal manera que la carga fuera transmitida del molde metálico a los especimenes,este ensayo esta regido bajo la Norma “**ASTM C-496 96**”.



Ilustración 5. 8 Cilindros Ensayados a TCD.

Tabla 5. 1 Resultados Ensayos Destructivos, Cemento HE.

Cemento : HE 75 kg/m³			
Edad (dias)	f'c (MPa)	TCD (MPa)	E_c (GPa)
	Promedio	3 Especimen	40% f'c
3	3.17	0.37	3.10
7	4.00	0.53	7.66
14	4.50	0.84	9.00
28	5.95	0.87	12.08
56	8.64	1.40	14.14
90	9.91	1.58	16.20
180	11.32	1.83	17.27
365	14.70	1.92	18.11
Cemento : HE 95 kg/m³			
3	4.61	0.67	6.50
7	6.44	0.83	10.12
14	8.20	1.15	13.00
28	9.38	1.45	15.23
56	12.90	2.21	19.41
90	16.33	2.35	23.06
180	18.41	2.44	23.77
365	20.14	2.54	25.21
Cemento : HE 105 kg/m³			
3	5.17	0.71	7.55
7	6.75	1.06	10.80
14	8.50	1.44	15.38
28	10.08	1.65	17.76
56	14.06	2.18	19.11
90	16.80	2.55	24.87
180	19.97	2.77	27.17
365	21.04	3.19	28.57

Tabla 5. 2 Resultados Ensayos Destructivos, Cemento GU.

Cemento : GU 75 kg/m³			
Edad (dias)	f'c (MPa)	TCD (MPa)	E_c (GPa)
	Promedio	3 Especimen	40% f'c
3	3.90	0.42	2.14
7	4.10	0.67	5.62
14	5.45	0.74	8.26
28	5.85	0.94	11.67
56	8.56	1.31	14.30
90	9.93	1.47	14.72
180	10.21	1.49	14.80
365	13.30	2.01	16.95
Cemento : GU 95 kg/m³			
3	4.44	0.59	5.84
7	5.23	0.75	8.02
14	6.85	1.01	12.14
28	8.68	1.39	14.69
56	11.24	1.87	17.86
90	13.90	2.16	18.20
180	14.21	2.16	19.75
365	15.87	2.22	20.29
Cemento : GU 105 kg/m³			
3	4.88	0.66	7.43
7	5.60	0.77	9.27
14	7.21	1.26	13.44
28	10.80	1.61	15.88
56	14.76	2.19	22.20
90	16.92	2.24	23.76
180	18.32	2.59	23.80
365	18.88	2.42	24.01

Tabla 5. 3 Resultados Ensayos Destructivos, Cemento MH.

Cemento : MH 75 kg/m³			
Edad (dias)	f'c (MPa)	TCD (MPa)	E_c (GPa)
	Promedio	3 Especimen	40% f'c
3	2.03	0.29	1.00
7	2.73	0.44	3.40
14	3.59	0.47	4.90
28	5.09	0.68	6.90
56	6.48	0.77	8.86
90	6.83	0.78	9.28
180	7.35	0.87	9.30
365	7.89	1.32	10.38
Cemento : MH 95 kg/m³			
3	2.69	0.35	2.41
7	3.42	0.50	6.35
14	4.68	0.69	10.30
28	7.04	1.07	12.40
56	7.87	0.96	12.72
90	9.04	1.27	13.11
180	9.97	1.34	13.27
365	10.30	1.61	13.76
Cemento : MH 105 kg/m³			
3	2.85	0.39	3.93
7	3.70	0.57	7.87
14	4.79	0.78	10.86
28	7.72	1.13	14.62
56	9.41	1.40	14.56
90	10.26	1.43	14.75
180	11.10	1.66	15.56
365	13.09	1.93	16.36

5.7.4. Ensayo de Pulso Ultrasónico.

Este ensayo no destructivo permite determinar la presencia de fisuras y espacios vacíos en las probetas cilíndricas, con lo que se evalúa la homogeneidad del HCR. Este ensayo consiste en el paso de una onda ultrasónica a lo largo de las probetas por medio de un equipo de ultrasonido, este equipo registra la velocidad y tiempo de la onda, valores altos de velocidad indicarán una buena compactación y poca presencia de vacíos, mientras que valores bajos serán indicativos de mala compactación y presencia elevada de vacíos o fisuras. Norma ASTM C 597.

Generalmente valores de velocidad para hormigón deben estar en el rango de 3050 – 4570 m/s para ser considerada como buena la condición del hormigón, valores mayores a 4570 m/s serán clasificadas como excelentes según “ **Leslie y Cheesman** ”.



Ilustración 5. 9 Ensayo de Pulso Ultrasónico.

Tabla 5. 4 Resultados Ensayo de Pulso Ultrasonico.

Velocidad de Pulson Ultrasonico Promedio (m/s)			
Edad (Dias)	Contenido de cemento (kg/m ³) HE		
	75	95	105
3	3456	4312	3516
7	4234	4129	4123
14	3997	3613	4161
28	4137	3489	4173
56	4613	4156	4526
90	4635	4229	4568
180	4641	4333	4610
365	4352	4521	4562
Edad (Dias)	Contenido de cemento (kg/m ³) GU		
	75	95	105
3	2800	3668	3320
7	3253	3330	3418
14	3522	3780	3567
28	3815	4104	4173
56	3766	3979	4063
90	3808	4095	4302
180	4050	4258	4232
365	4105	4384	4391
Edad (Dias)	Contenido de cemento (kg/m ³) MH		
	75	95	105
3	3782	3949	3780
7	3493	3862	3821
14	3795	3578	4521
28	4006	4156	4326
56	3965	4208	4354
90	4193	4335	4477
180	4235	4506	4602
365	3884	4188	4246

5.7.5. Ensayo de Coeficiente de Dilatación Térmica.

Para realizar este ensayo fue necesario generar una dosificación, para lo cual se empleó la siguiente curva granulométrica definida dentro de los límites granulométricos para pavimentos de hormigón compactado(5) con la finalidad de cumplir con requisitos del ensayo. Norma ASTM C 157.

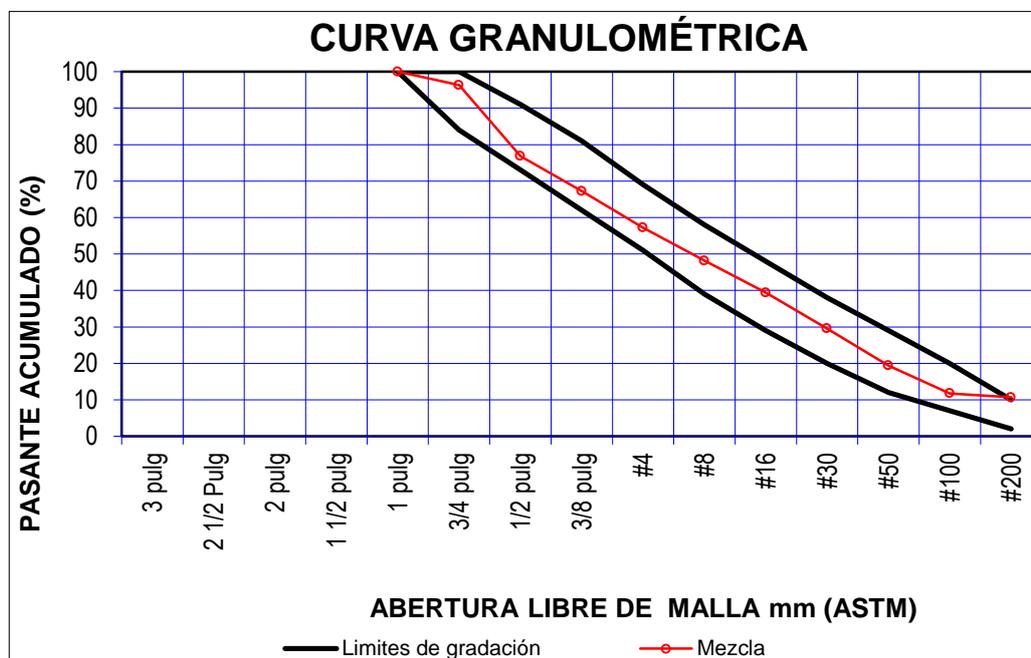


Ilustración 5. 10 Curva Granulométrica para Coeficiente de Dilatación Térmica.

(5) Gradaciones de agregados más pequeñas tamaño máximo de 20mm.

Tabla 5. 5 Dosificación para Ensayo de Coeficiente de Dilatación Térmica.

Materiales	Peso (kg)
Cemento HE	98
piedra 38	571
piedra 19	571
Arena Tri.	617
Arena Nat.	503
Filler	23
agua	132
Densidad (kg/m ³)	2515

Para determinar el coeficiente de dilatación térmica fue necesario usar moldes de vigas prismáticas de 100x100x285mm las cuales fueron compactadas en 2 capas con el martillo Hilti modelo TE 805 con un apisonador rectangular pequeño de 100x50 mm, entre las capas se colocó una termocupla, la que nos indicó la temperatura interior del hormigón a diferentes edades y variaciones de temperatura.



Ilustración 5. 11 Elaboración Especímenes para Coeficiente de Dilatación Térmica.



Ilustración 5. 12 Apisonadores y Termocuplas.

Una vez que se armaron los especímenes se dejaron curar, al día siguiente se desmoldaron y se realizó la primera medición de temperatura y deformación.

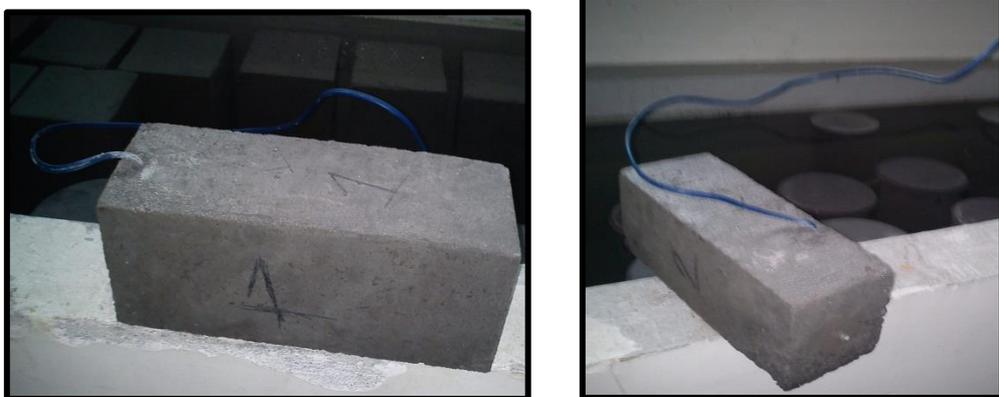


Ilustración 5. 13 Especímenes Elaborados.

Luego de 7 días se procedió a introducir las probetas en un balde con agua el cual se selló e introdujo al horno a una temperatura de 70°C durante 24 horas, posteriormente se midió

La temperatura y deformación de cada espécimen de manera que se tenía un registro cada vez que la temperatura disminuyera 5°C hasta alcanzar la temperatura ambiente.



Ilustración 5. 14 Ensayo de Especímenes para Determinar el Coeficiente de Dilatación Térmica.

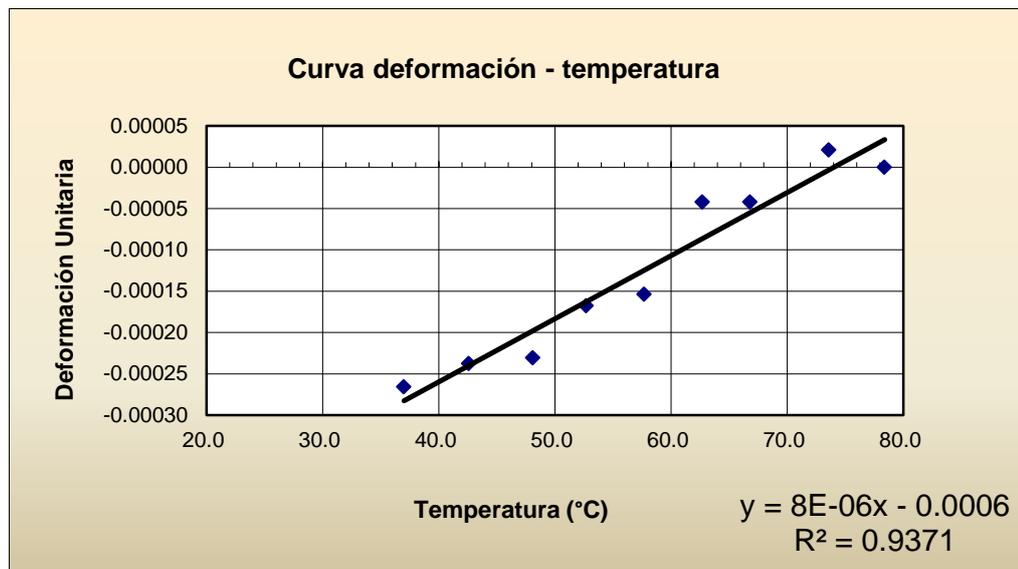


Ilustración 5. 15 Curva Deformación vs Temperatura Espécimen 1.

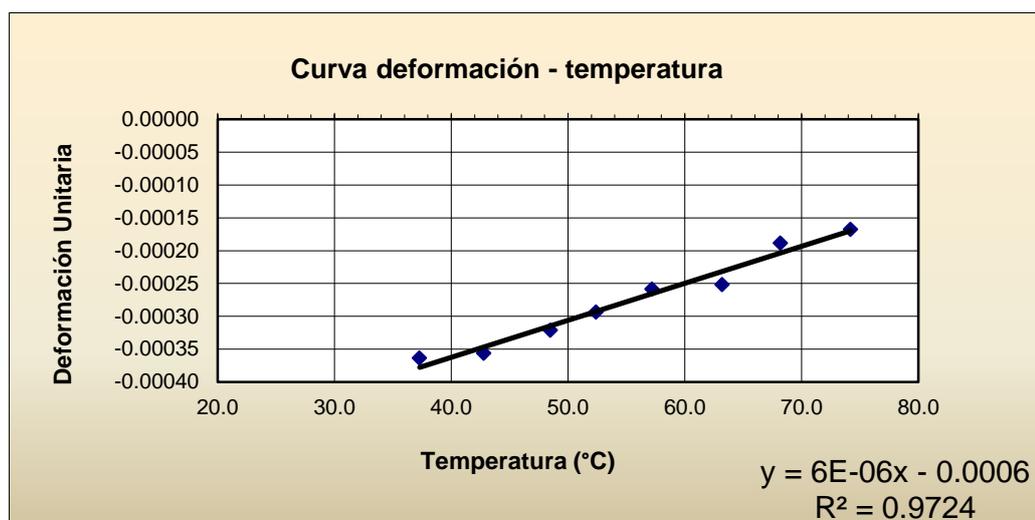


Ilustración 5. 16 Curva Deformación vs Temperatura Espécimen 2.

Tabla 5. 6 Resultados Coeficiente de Dilatación Térmica.

Especimen	Coeficiente Dilatacion Termica (1/°C)
1	8.00E-06
2	6.00E-06

5.8. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Se comprobó que cilindros elaborados con mezclas de cemento HE presentan mayores valores de resistencia, seguidos del GU y por último el MH. Para una cantidad de 75 kg de cemento el GU y HE presentan resistencias similares, por lo que podría decirse que ambos tienen un buen desempeño de resistencia por lo que no es necesario incrementar el consumo de cemento, por otro lado los módulos de elasticidad para los especímenes elaborados con cemento MH presentan valores bajos, lo que es indicativo de una gran ductilidad, esto es importante dentro del diseño de presas ya que debe dársele la capacidad de deformación necesaria al hormigón. Valores de pulso ultrasónico se encuentran dentro del rango establecido como bueno para un hormigón, esto es un indicativo de lo importante que es impartir una energía de compactación suficiente para reducir la cantidad de vacíos, esta propiedad se ve relacionada con la resistencia ya que las muestras de HE presentaron los valores más altos de velocidad de pulso ultrasónico. Los valores de coeficiente de dilatación térmica están acordes con los esperados para hormigones a ser empleados en presas.

CAPITULO 6

6. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CORRELACIONES.

Para comprender mejor las propiedades del HCR es necesario realizar correlaciones donde se analizan los resultados obtenidos de los diversos ensayos desarrollados, comprender las relaciones existentes entre una propiedad y la otra, entre propiedades intrínsecas y extrínsecas, de tal manera que se obtenga un registro para el control de calidad del hormigón, tener una referencia para un optimización dentro del proceso de diseño y constructivo.

6.1. RESULTADOS DE RESISTENCIAS.

6.1.1. Incremento de Resistencia a la Compresión Simple con el Tiempo.

El ensayo de resistencia a la compresión simple es realizado bajo la norma ASTM C39 a los cilindros de 150x300mm los cuales fueron ensayados a las edades de 3, 7, 14, 28, 56, 90, 180 y 365 días. Fueron destinados 3 Cilindros por cada tipo de dosificación, es decir por tipo de cemento (HE, GU, MH) y cantidad (75, 95, 105 kg/m³) para cada edad especificada.

Dos cilindros fueron destinados para la realización de los ensayos de compresión simple junto con el de módulo secante, de tal manera que los valores de resistencia fueran obtenidos mediante el promedio de los especímenes. El espécimen restante fue empelado en la determinación del valor de tracción del hormigón por medio de la compresión diametral.

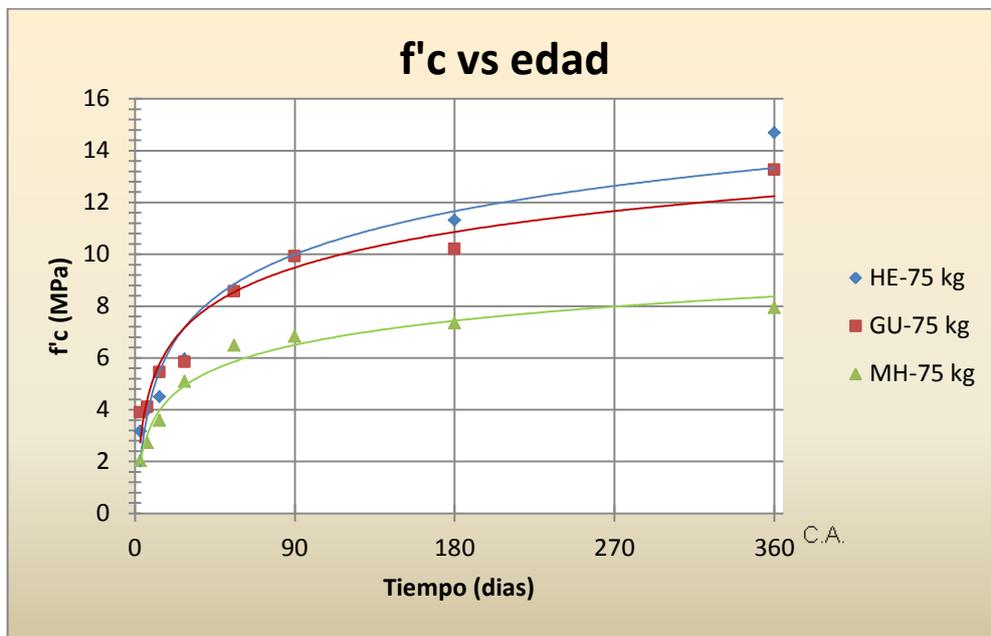


Ilustración 6. 1 Variación f'c vs Edad, 75 kg de Cemento (TMA 38mm).

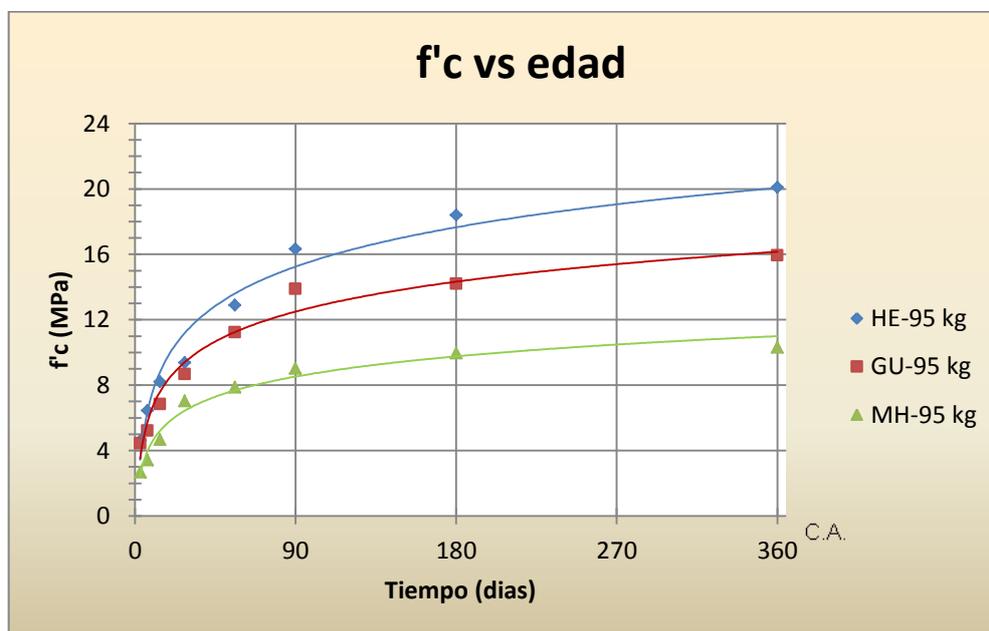


Ilustración 6. 2 Variación f'c vs Edad, 95 kg de Cemento (TMA 38mm).

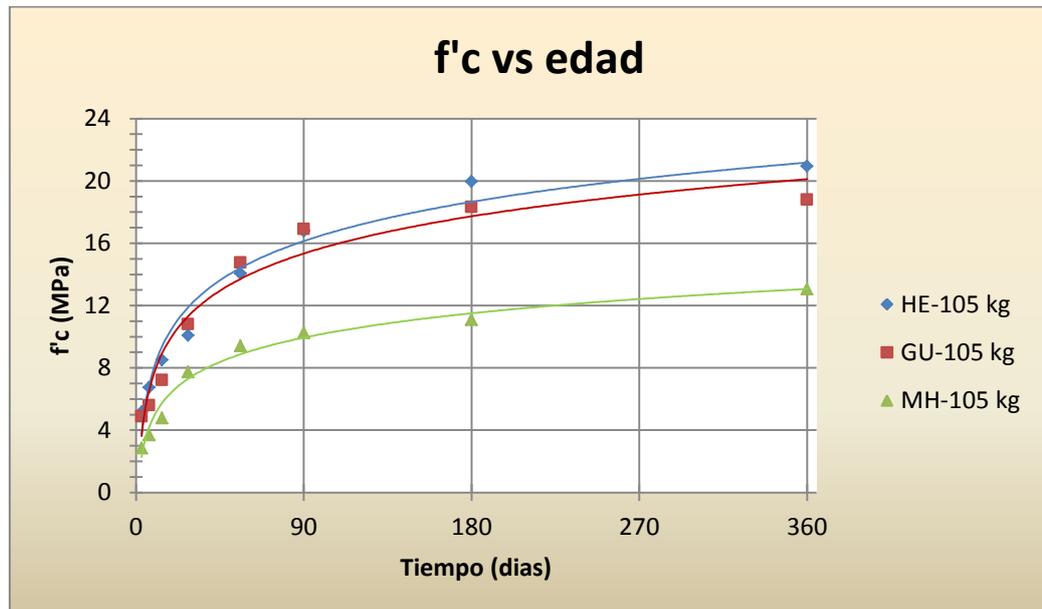


Ilustración 6. 3 Variación f'c vs Edad, 105 kg de Cemento (TMA 38mm).

6.1.2. Incremento de Resistencia a la Tracción por Compresión Diametral con el Tiempo.

Los ensayos a la tracción por compresión diametral fueron realizados siguiendo la norma ASTM C-496, a diferencia del ensayo a compresión simple en la que eran probados 2 cilindros, para la tracción solo se destinó un cilindro para cada tipo y cantidad de cemento.

La prensa es configurada para este tipo de rotura con lo que se consigue disminuir la velocidad de carga que aplicada uniformemente sobre un aparejo de metal es distribuida sobre una tabla de plywood hacia el cilindro.

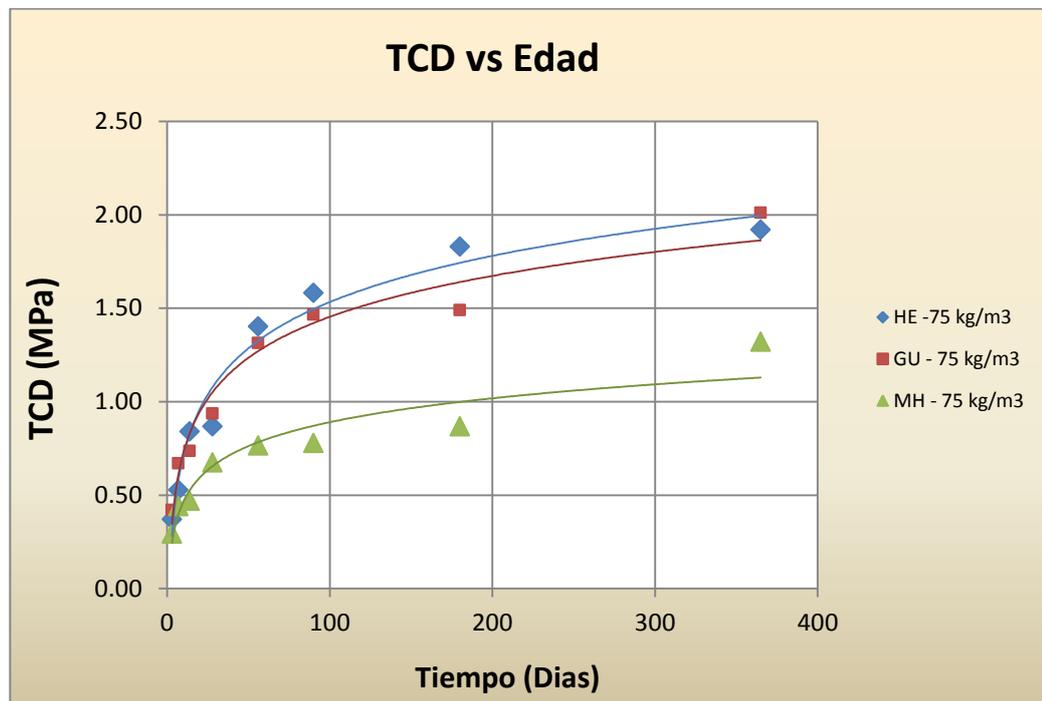


Ilustración 6. 4 Variación TCD vs Edad, 75 kg de Cemento (TMA 38mm).

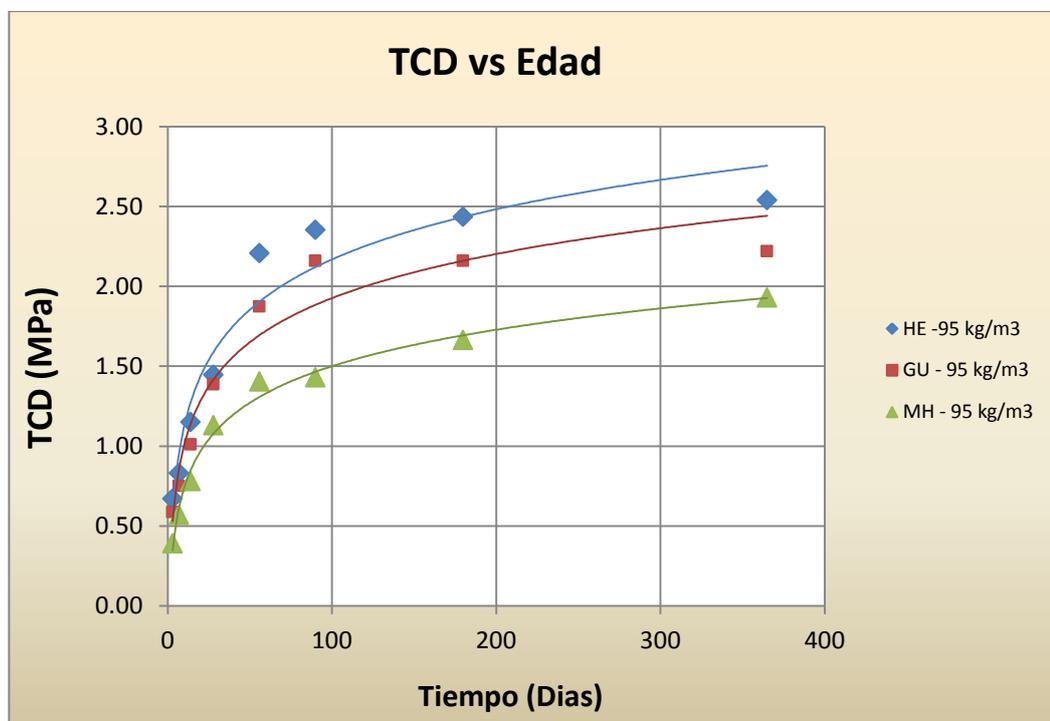


Ilustración 6. 5 Variación TCD vs Edad, 95 kg de Cemento (TMA 38mm).

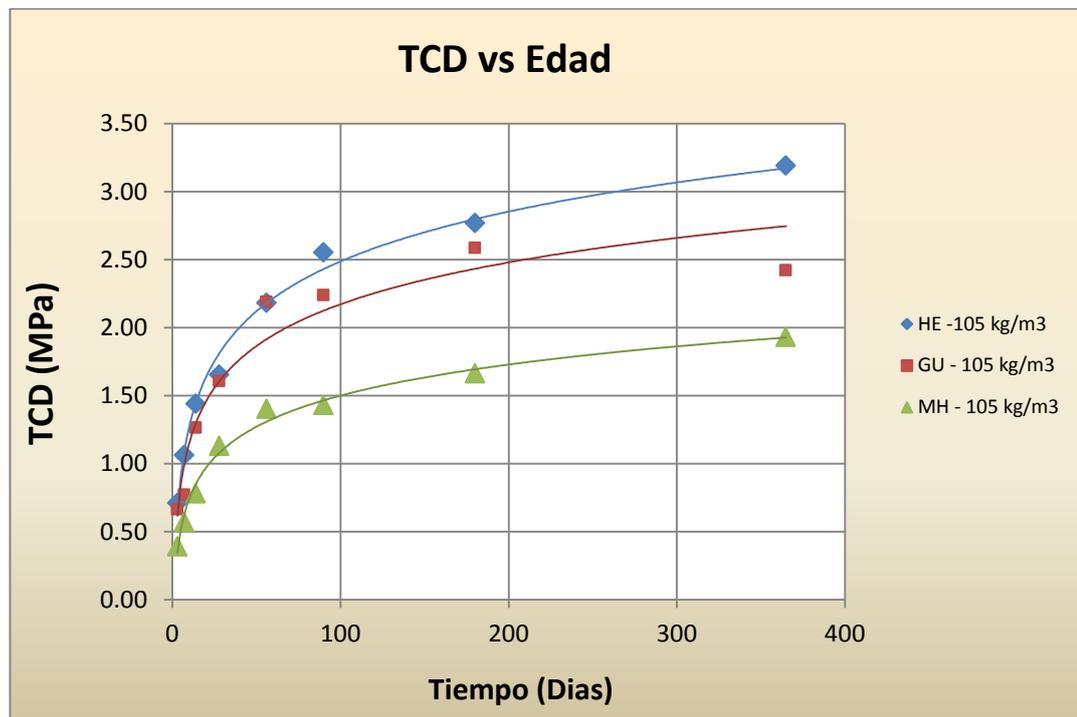


Ilustración 6. 6 Variación TCD vs Edad, 105 kg de Cemento (TMA 38mm).

Se puede demostrar una vez más la tendencia en el incremento de la resistencia con el tiempo, a edades tempranas, la resistencia aumenta drásticamente, pero a edades mayores esta se incrementa, la resistencia tiende a ser asintótica y volverse constante.

6.1.3. Incremento del Módulo Secante con el Tiempo.

Este ensayo fue realizado de acuerdo a la norma ASTM C-469.

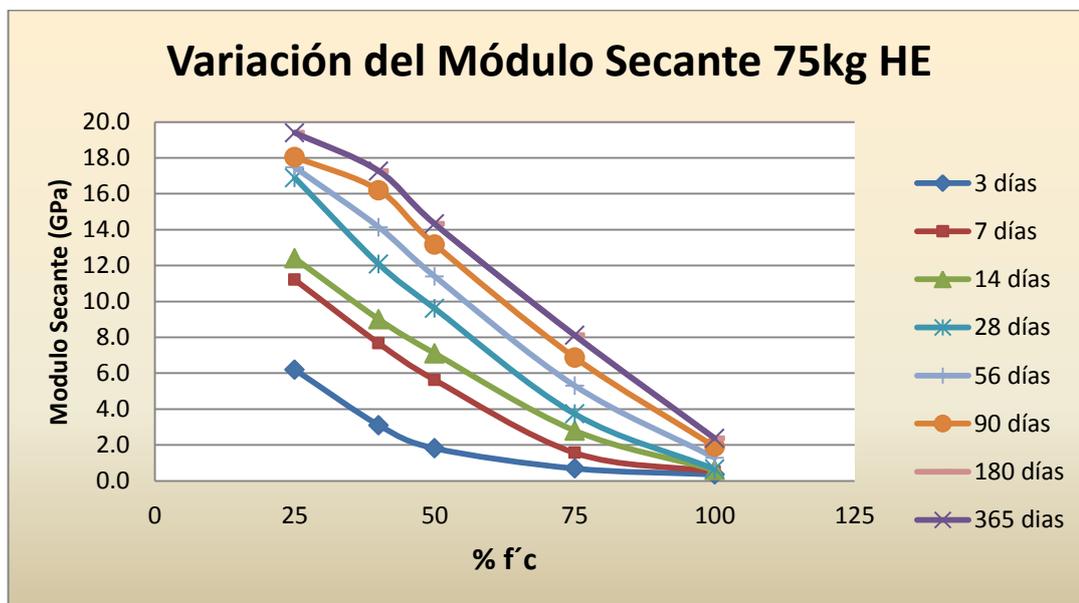


Ilustración 6. 7 Módulo Secante vs Edad, 75 kg de Cemento HE (TMA 38mm).

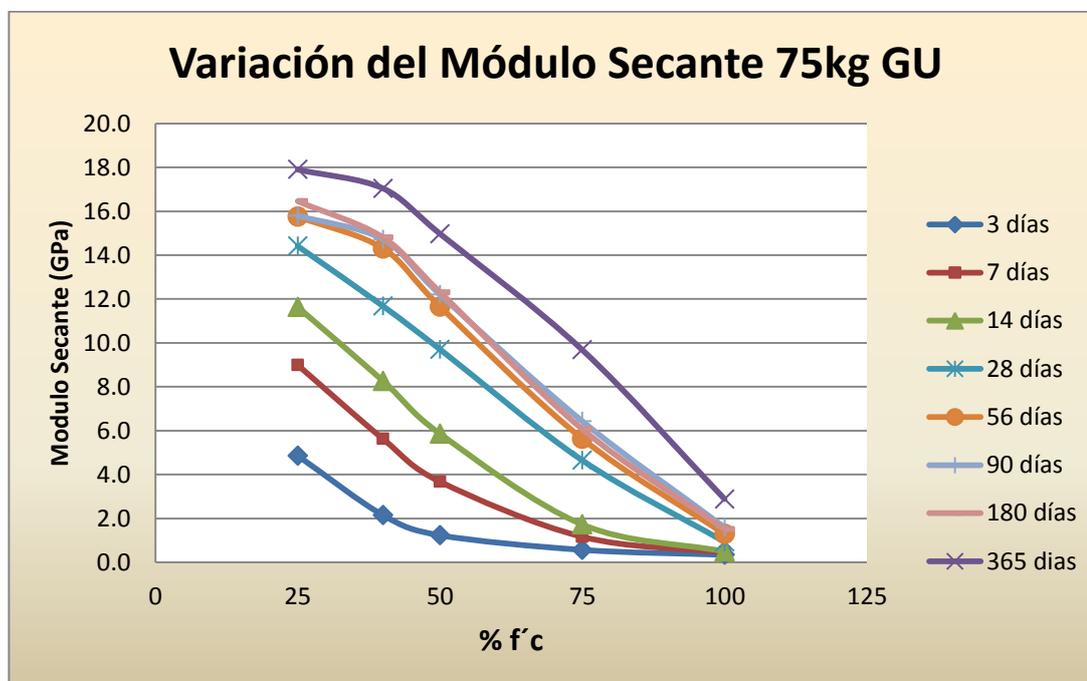


Ilustración 6. 8 Módulo Secante vs Edad, 75 kg de Cemento GU (TMA 38mm).

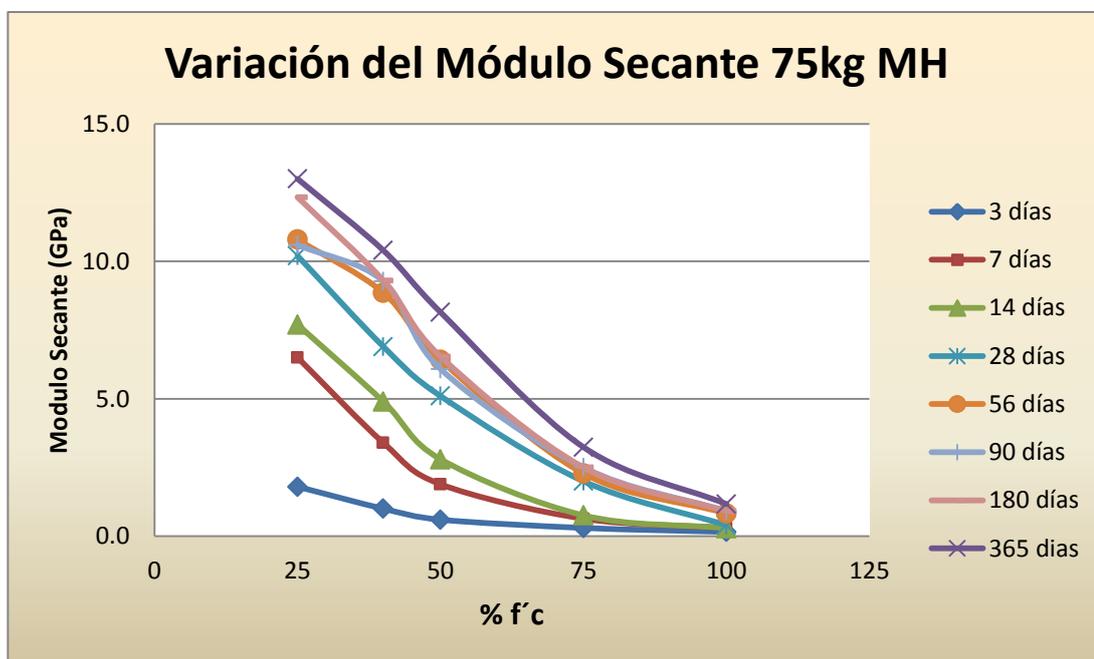


Ilustración 6. 9 Módulo Secante vs Edad, 75 kg de Cemento MH (TMA 38mm).

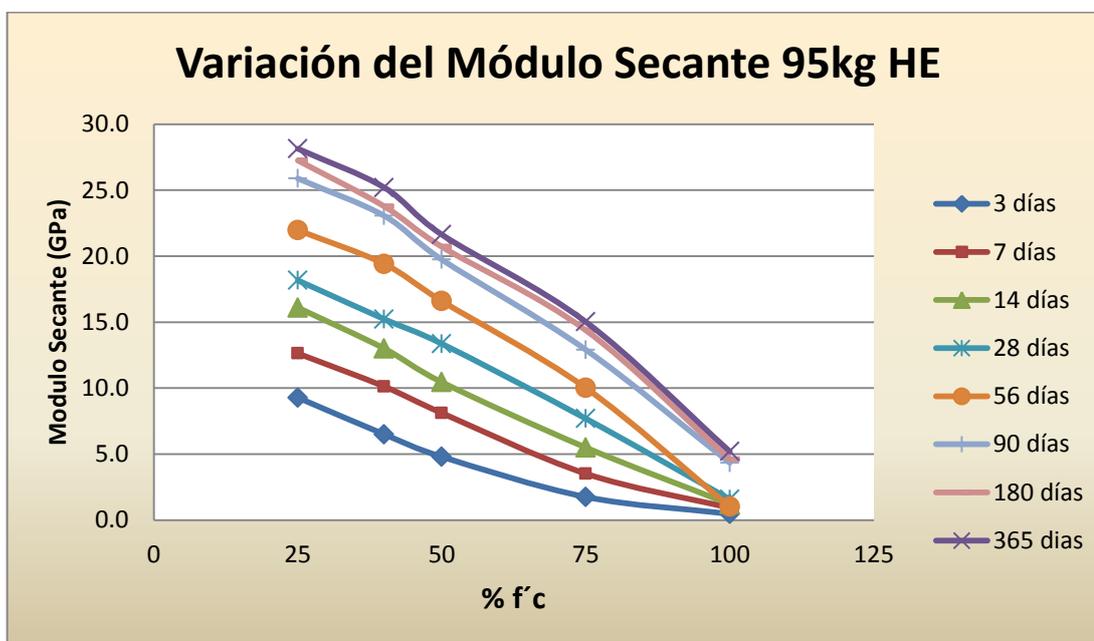


Ilustración 6. 10 Módulo Secante vs Edad, 95 kg de Cemento HE (TMA 38mm).

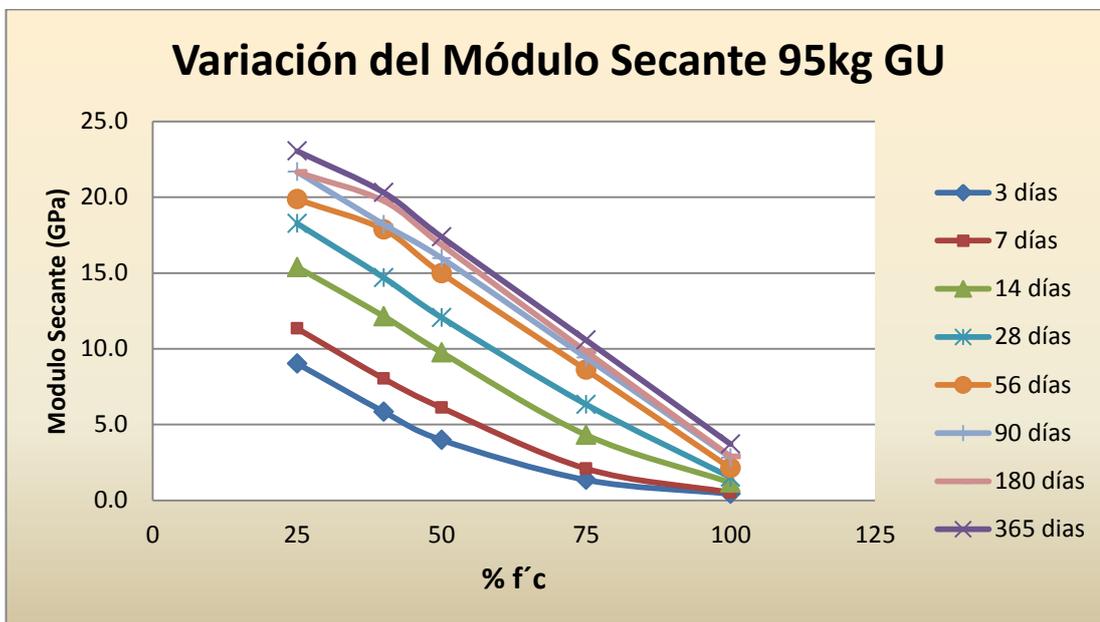


Ilustración 6. 11 Módulo Secante vs Edad, 95 kg de Cemento GU (TMA 38mm).

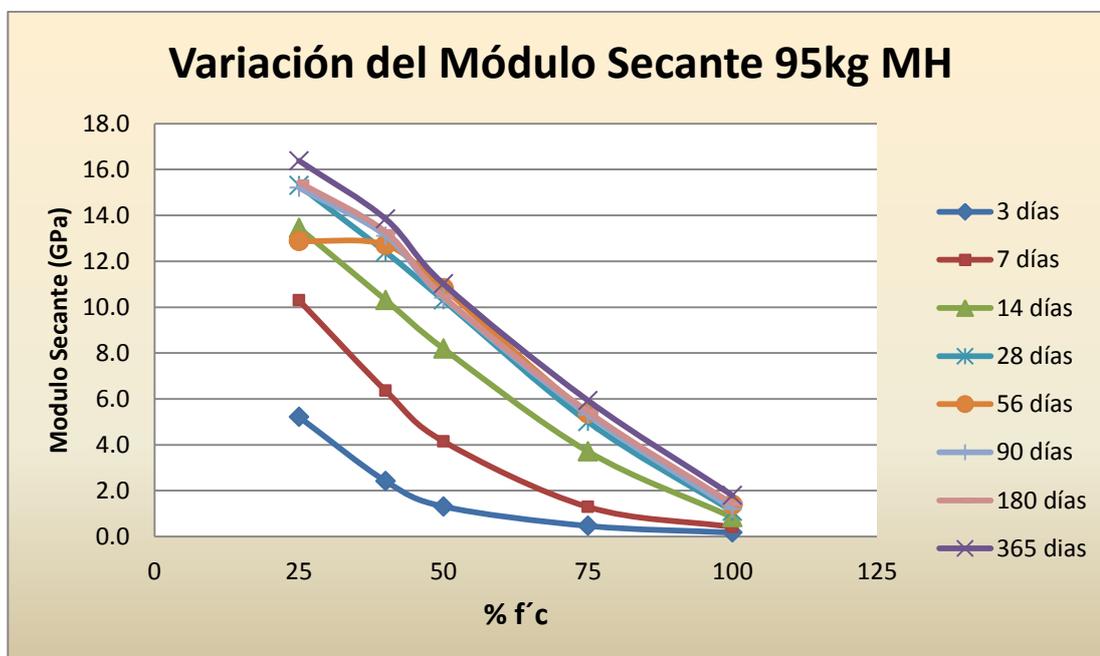


Ilustración 6. 12 Módulo Secante vs Edad, 95 kg de Cemento MH (TMA 38mm).

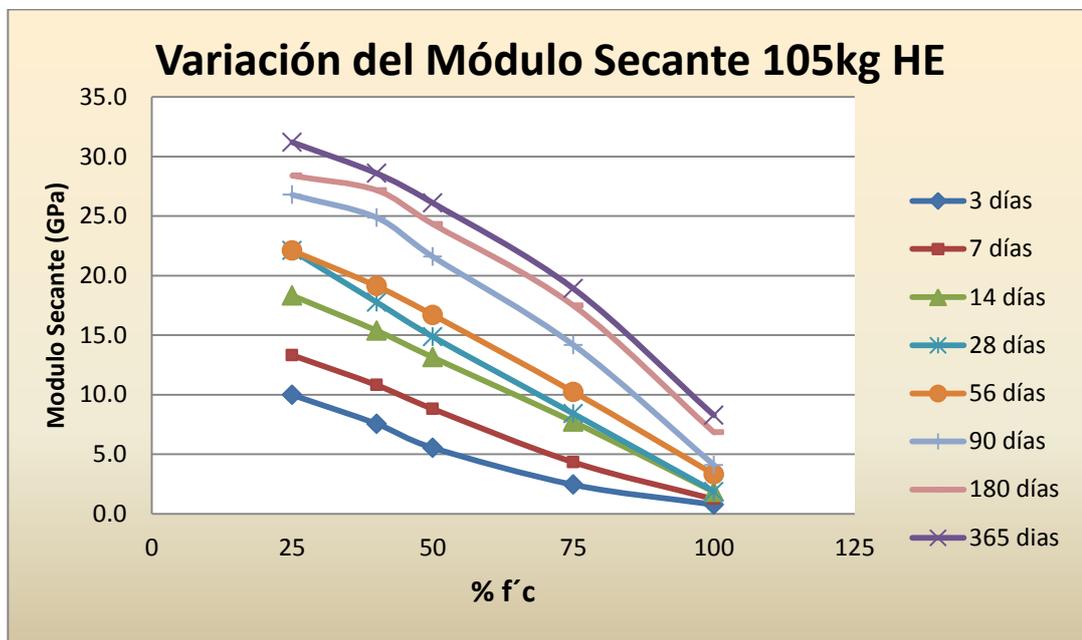


Ilustración 6. 13 Módulo Secante vs Edad, 105 kg de Cemento HE (TMA 38mm).

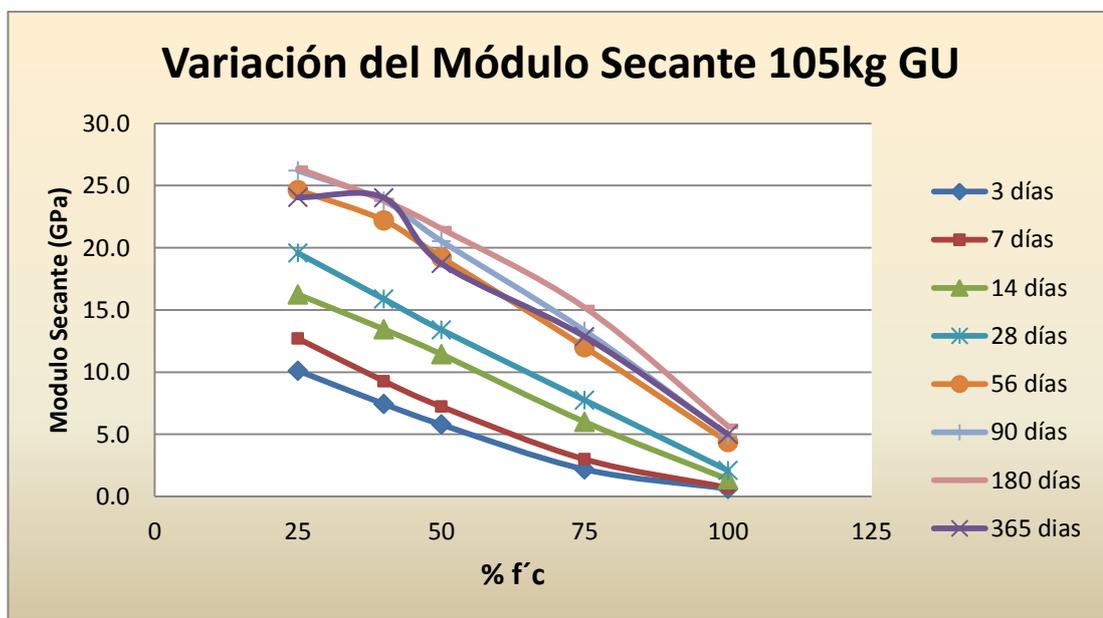


Ilustración 6. 14 Módulo Secante vs Edad, 105kg de Cemento HE (TMA 38mm)

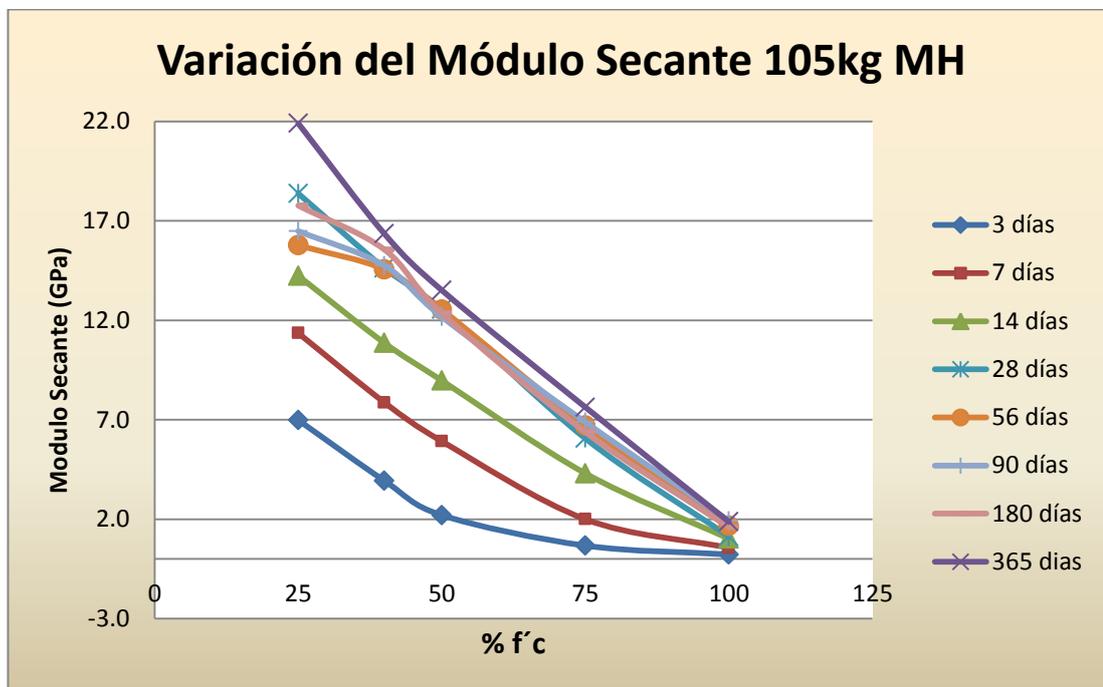


Ilustración 6. 15 Módulo Secante vs Edad, 105 kg de Cemento HE (TMA 38mm).

Las muestras elaboradas con cemento HE presentan un mayor Módulo Secante debido a las propiedades de alta resistencia del mismo. Las muestras elaboradas con GU tienen mayores valores de Módulo Secante que los de MH debido a las cantidades bajas de cemento empleadas y a las características de la puzolana, sin embargo este cemento posee mayores deformaciones con el tiempo, lo cual es importante en presas donde es necesario que se deforme con el tiempo, se puede notar el incremento drástico de los módulos secantes a medida que aumenta la edad del

Hormigón, esto es debido que en hormigón compactado con rodillo el desarrollo de las propiedades de resistencia se da de una manera lenta en comparación con el hormigón convencional debido a los contenidos bajos de cementos.

6.1.4. Variación del Módulo de Elasticidad.

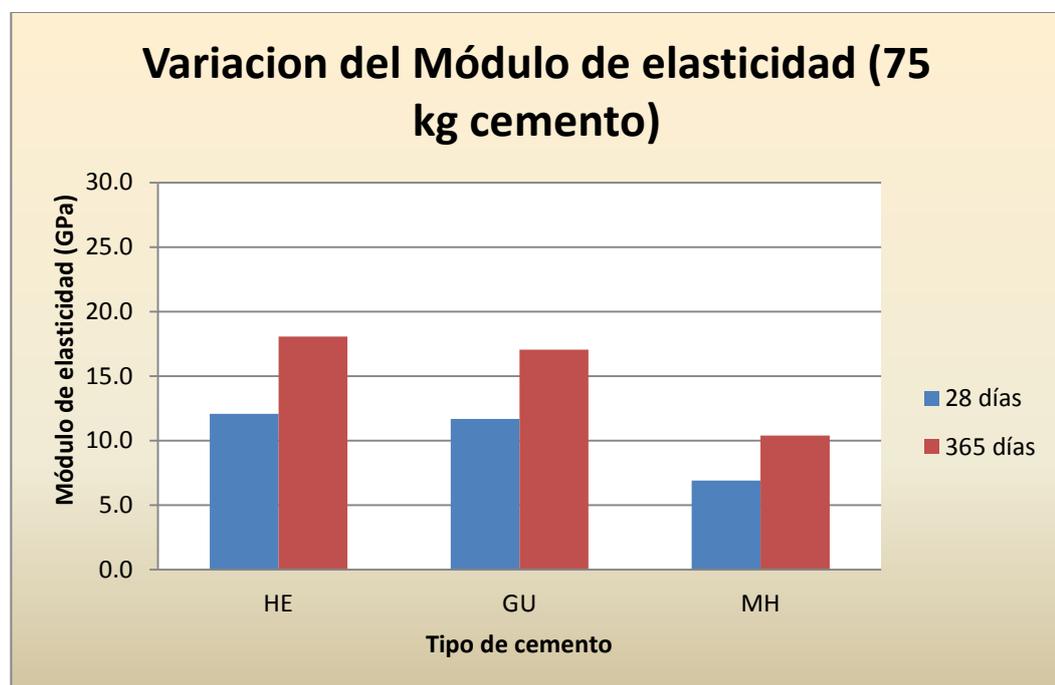


Ilustración 6. 16 Variación Módulo Secante (75 kg de Cemento).

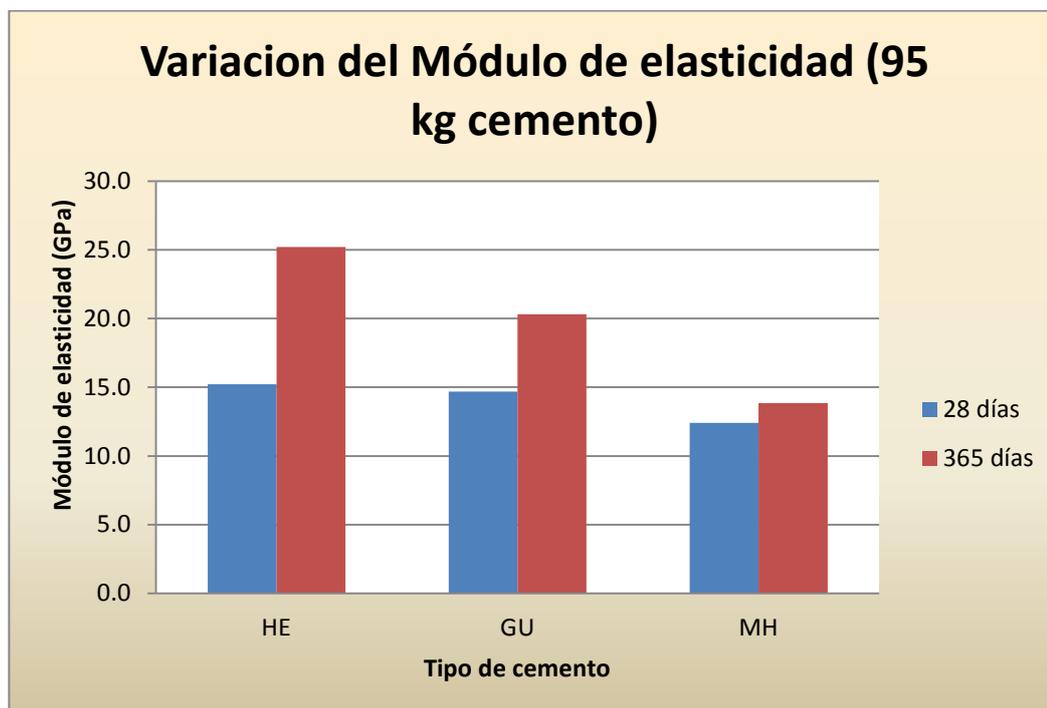


Ilustración 6. 17 Variación Módulo Secante vs Edad (95 kg de Cemento).

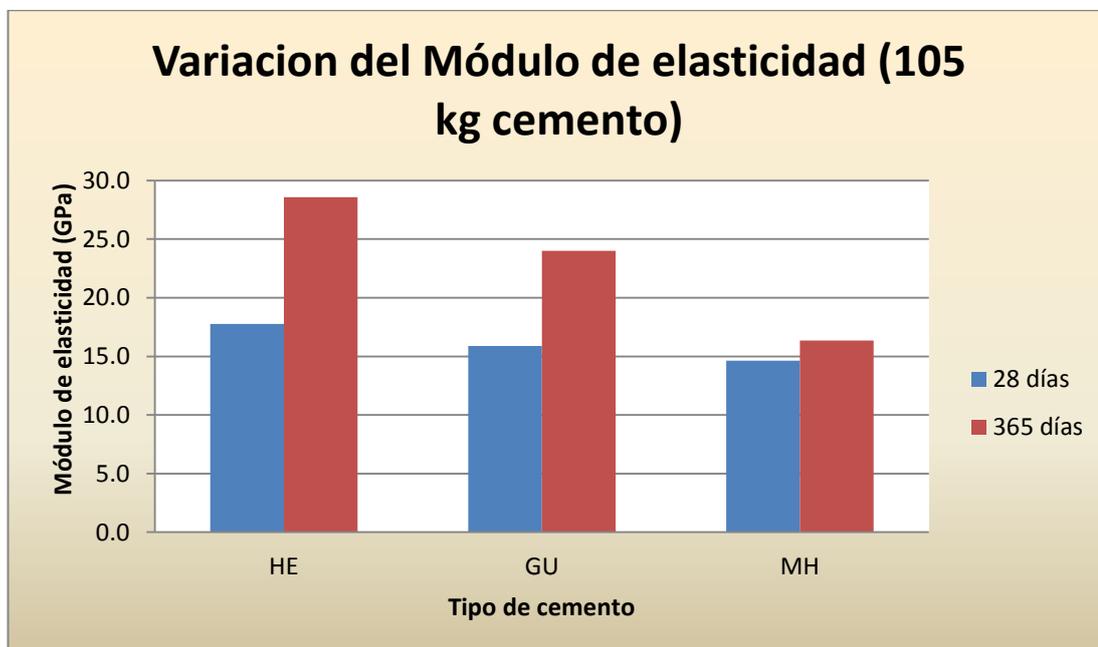


Ilustración 6. 18 Variación Módulo Secante vs Edad (105 kg de Cemento).

Los mayores valores de Módulo de Elasticidad se obtienen con el cemento HE, seguidos por el GU y por último el MH, los porcentajes de variación entre los cilindros ensayados a 28 días con los del año muestran una variación cercana a un 25% debido al lento desarrollo de las propiedades de resistencia del HCR.

6.2. PRESENTACIÓN DE CORRELACIONES.

6.2.1. Correlación entre la Resistencia a la Compresión Simple vs. La Resistencia a la Tracción por Compresión Diametral.

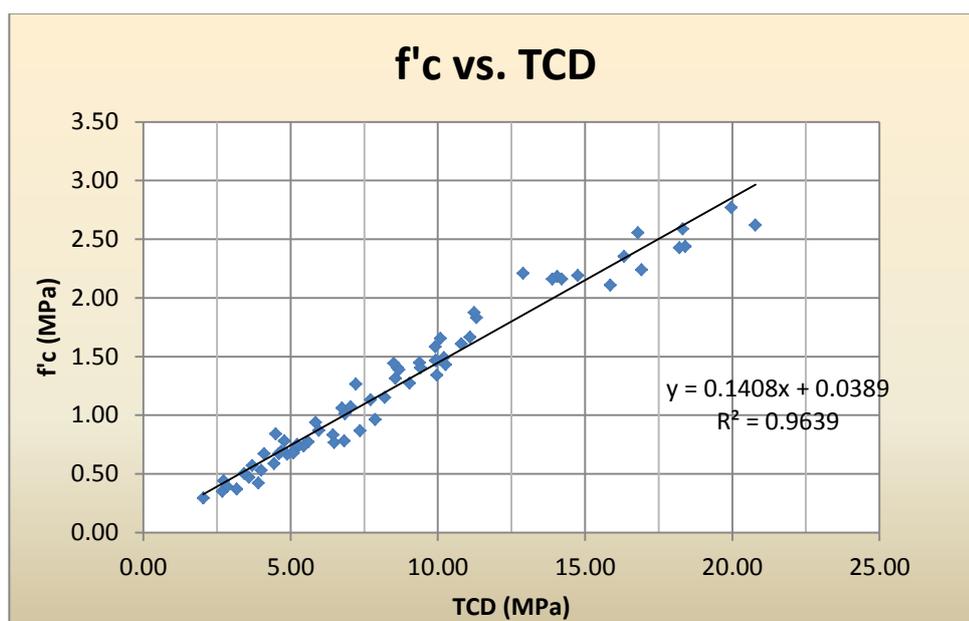


Ilustración 6. 19 Gráfica f'c vs TCD.

De la gráfica se puede observar una relación lineal entre estas dos resistencias fundamentales para el HCR, el valor de 0.96 indica una excelente correlación con lo cual se podría determinar fácilmente una

Estimación del f'_c o TCD para controlar la calidad del hormigón en obra y de esta manera establecer si los resultados en la misma están acordes con el diseño definido.

6.2.2. Correlación entre la Resistencia a la Compresión Simple vs. La Velocidad de Pulso Ultrasonico.

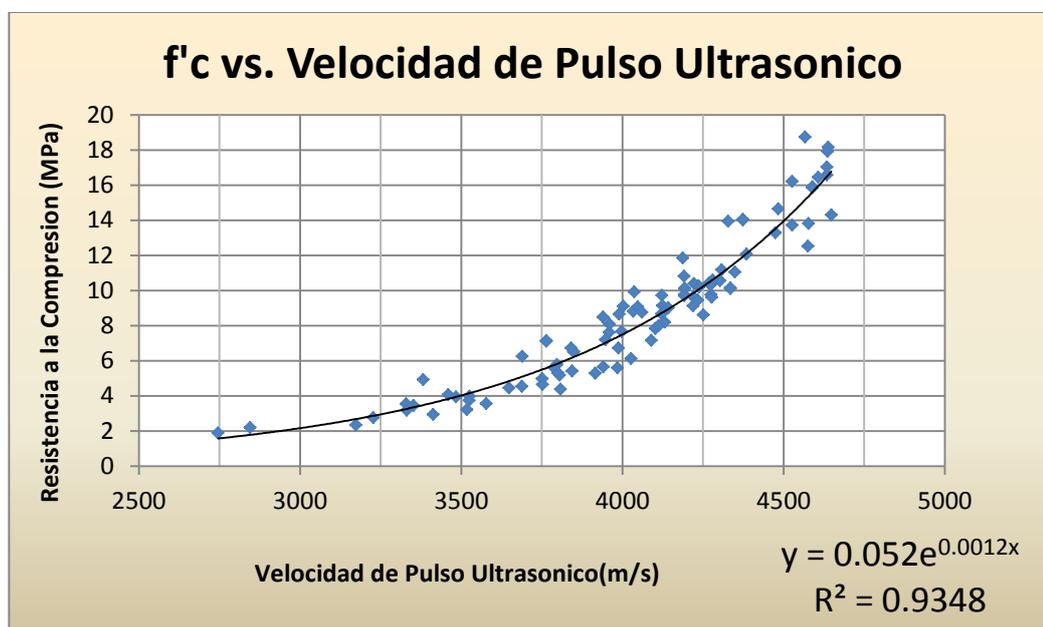


Ilustración 6. 20 Gráfica f'c vs Velocidad Pulso Ultrasonico.

El valor de correlación es muy bueno, se puede observar que para valores mayores a 3500 m/s presentan un mejor ajuste, lo cual es excelente, ya que valores establecidos en un rango de 3050 – 4570 m/s son considerados como buenos dentro del hormigón, así mismo se puede demostrar que a medida que aumenta la velocidad de pulso

Ultrasónico se obtienen mayores valores de resistencia debido a que se ha alcanzado una buena compactación, se ha conseguido disminuir en gran cantidad los vacíos logrando una mejor densidad permite que las ondas viajen rápidamente a través de los cilindros.

6.2.3. Correlación entre la Resistencia a la Tracción por Compresión Diametral vs. La Velocidad de Pulso Ultrasónico.

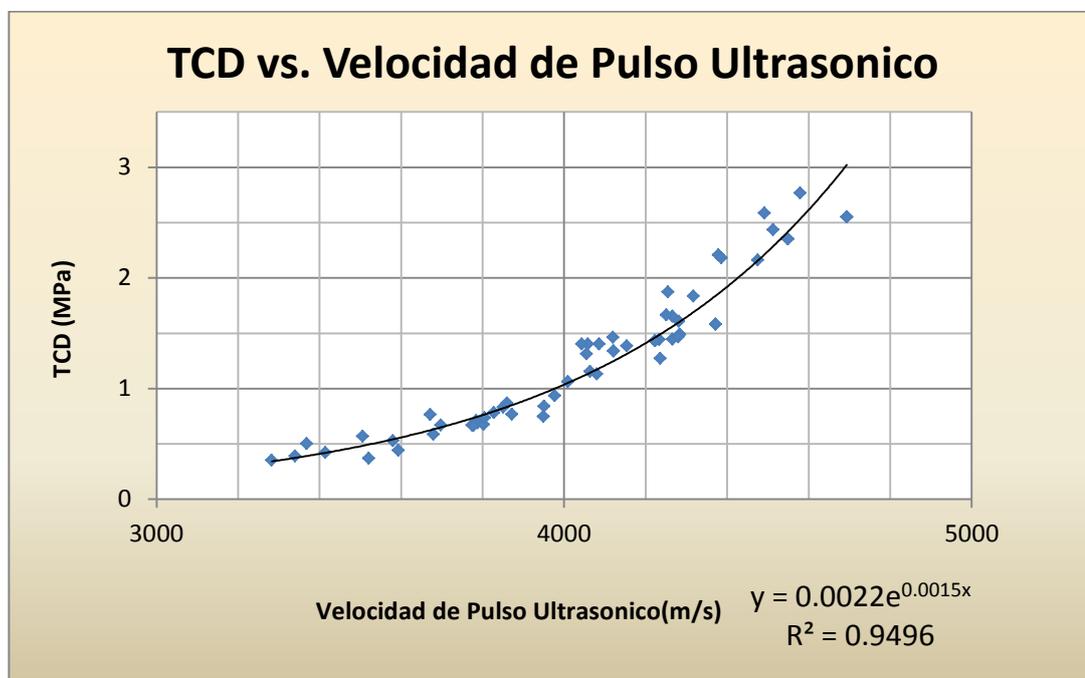


Ilustración 6. 21 Gráfica TCD vs Velocidad Pulso Ultrasónico.

Los resultados de esta correlación pueden ser considerados como excelentes ya que todos los valores de velocidad de pulso ultrasónico son mayores a 3100 m/s, lo que clasifican a las muestras como

Hormigón de buena calidad, al igual en los resultados para compresión simple se observa en esta grafica para valores mayores de velocidad de pulso ultrasónico el valor de TCD aumenta debido al principio de energía de Compactación alcanzada, menor cantidad de espacios vacíos, mayor velocidad y por ende aumentan las propiedades de dureza del hormigón.

6.2.4. Correlación entre la Densidad vs. Tiempo de Trabajabilidad.

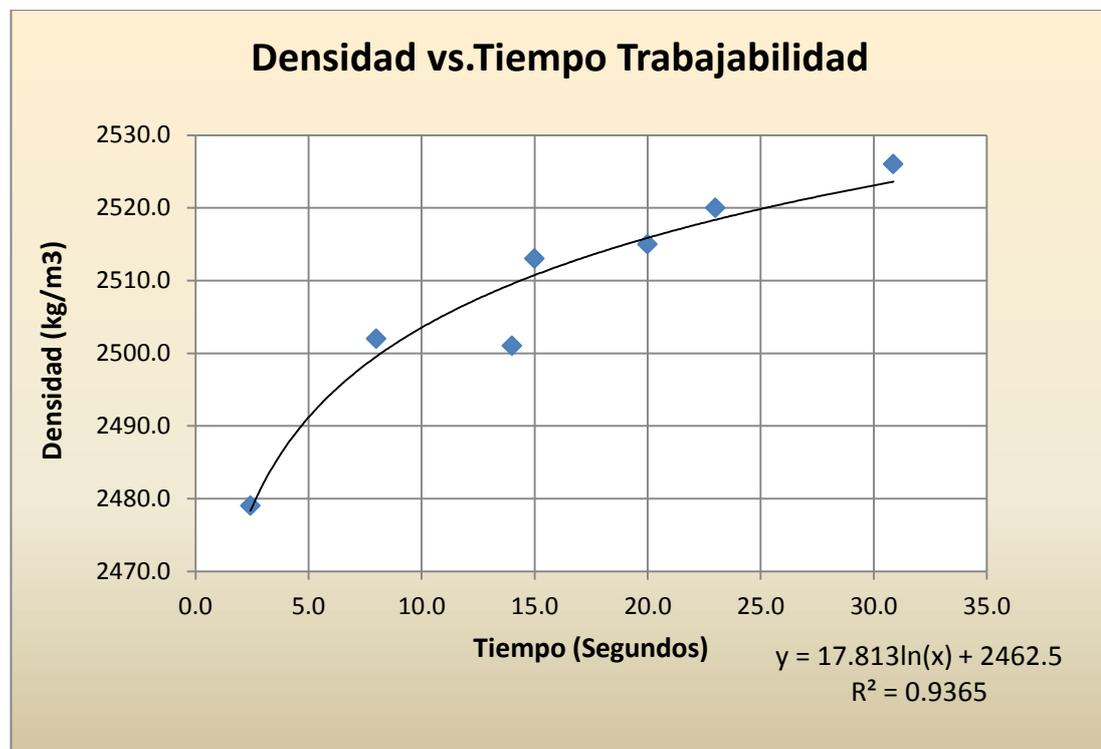


Ilustración 6. 22 Gráfica Densidad vs Tiempo Trabajabilidad.

Mientras mayor sea el tiempo de trabajabilidad mayor será la densidad ya que trabajabilidad se traduce como una mezcla con gran contenido de pasta que a la vez está relacionada con la disminución de espacios vacíos, convirtiendo al hormigón en una mezcla más densa.

6.3. EFICIENCIA VS. EDAD.

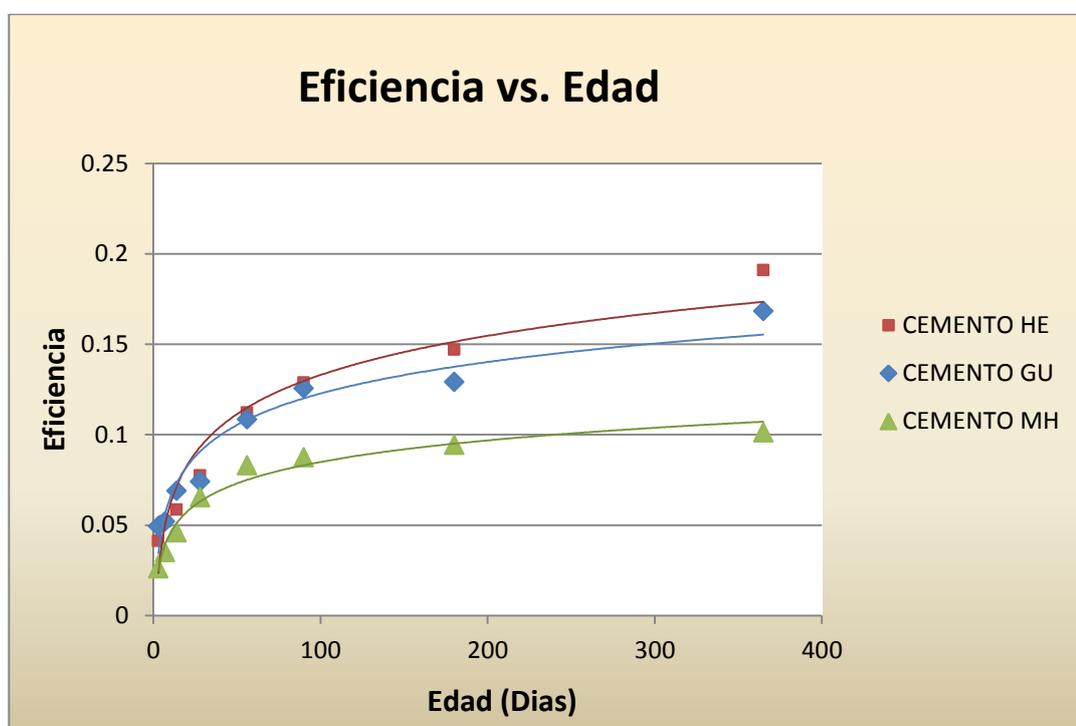


Ilustración 6. 23 Eficiencia vs Edad (75 kg de Cemento).

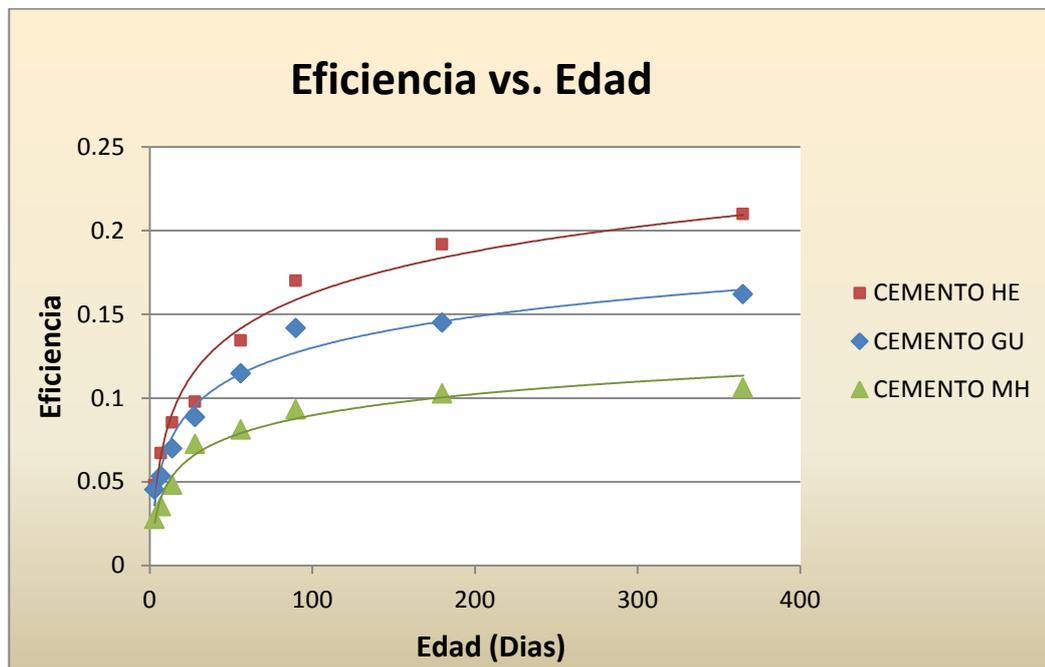


Ilustración 6. 24 Eficiencia vs Edad (95 kg de Cemento).

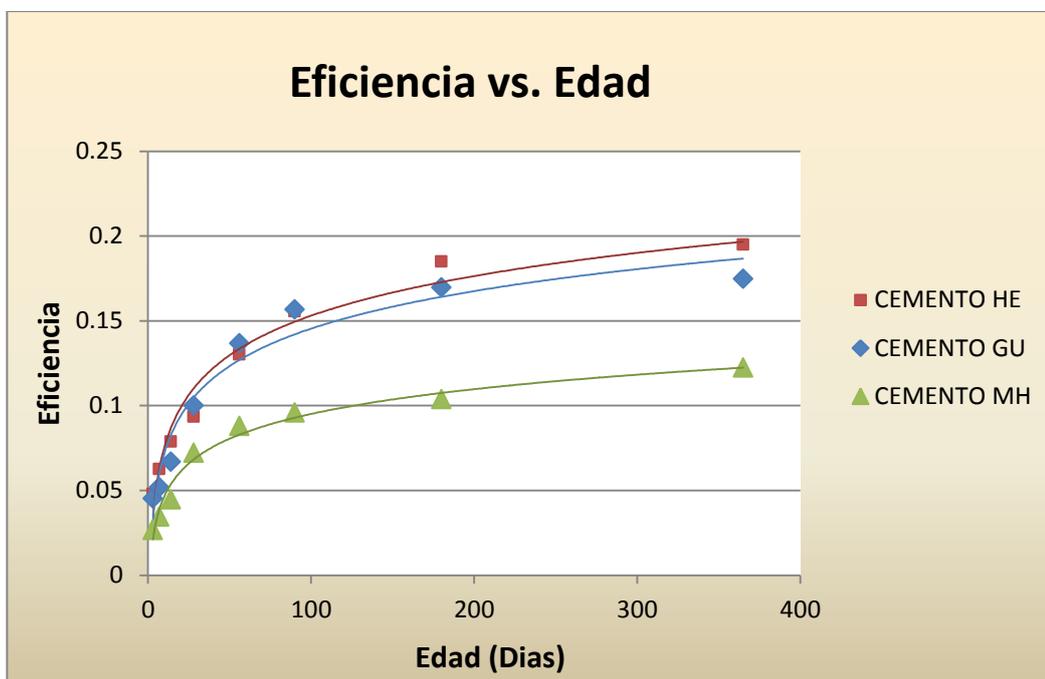


Ilustración 6. 25 Eficiencia vs Edad (105 kg de Cemento).

Es vital comparar la eficiencia de un determinado cemento en relación al tiempo. La eficiencia es definida como la razón entre la resistencia y la cantidad de cemento necesaria para alcanzar la misma, sus unidades están definidas en MPa / kg de cemento.

6.4. **FORMULA PARA ESTIMAR E_c EN FUNCION DEL f'_c .**

Como aportación los autores de la tesis realizaron una correlación entre el E_c y el f'_c de tal manera que se obtuviera una formula con la que se pueda estimar el E_c en función del f'_c , teniendo en cuenta que los datos utilizados en la correlación corresponden a resultados de probetas elaboradas con cemento compuestos (MH, GU y HE) en la que se utilizaron agregados que consisten en grava triturada, provenientes de restos de roca pre-existente de buena resistencia; entre otros, volcánicos como basaltos y andesitas, rocas ígneas intrusivas, donde predomina la Granodiorita, y roca sedimentaria metamorfisada como las cuarcitas. El Tamaño máximo nominal de agregado utilizado fue de 38mm. La ecuación dada se la obtuvo al encontrar la tendencia de los datos y confirmando que se aproxima mucho a los valores puntuales.

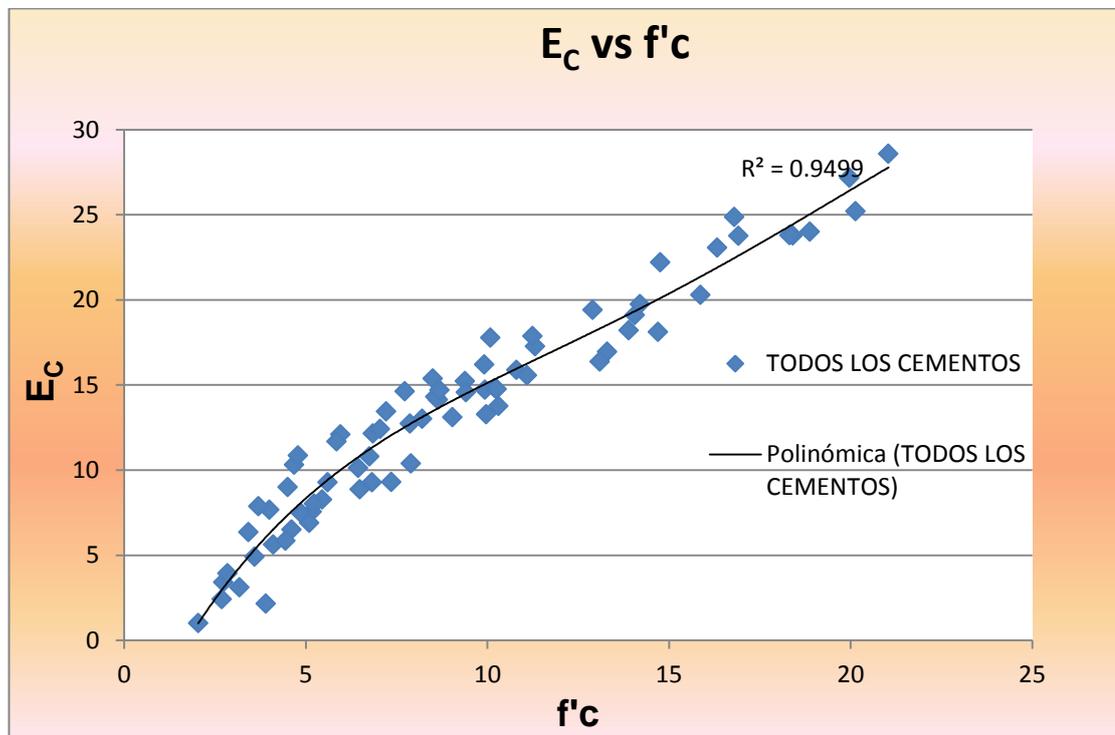


Ilustración 6. 26 Correlación E_c vs $f'c$.

$$E_c = 0.000003f'c^5 - 0.0004f'c^4 + 0.02f'c^3 - 0.41f'c^2 + 4.6f'c - 7.5$$

FORMULA 3. 5 Estimación E_c .

CAPITULO 7

7. FABRICACIÓN Y TRANSPORTE DEL HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO.

El ciclo de producción y transporte dependerán de que tan eficiente sea la colocación del hormigón en obra, si hay atrasos en la colocación será necesario ajustar el ciclo de producción o en los casos mas severos detenerlo. Un despacho rápido y continuo de HCR es importante, la capacidad máxima o pico de una planta se encuentra por encima de la media de la producción deseada, como medida general el promedio en velocidad de colocación no excede de aproximadamente 65% del valor pico cuando se utilizan vehículos de carga, y 75% cuando todos los sistemas de transporte son usados.

7.1. **FABRICACIÓN DEL HCR EN MASA.**

La fabricación de hormigón compactado con rodillo en masa se da en proyectos de gran escala, en donde las cantidades de materiales que se requieren superan las utilizadas en obras cotidianas. Se debe notar que dichas obras no son realizadas en lugares urbanos, por lo que en la mayor parte de ellas se requiere la movilización de equipos para fabricarlo, así como de los materiales, personal entre otros; por lo que la logística cumple una función fundamental, en el que muchos procesos se ven afectados.

Mezcladores para HCR necesitan de lograr dos funciones básicas: mezclar bien todos los materiales y proveer una capacidad suficiente para una alta velocidad de colocación.

Volúmenes típicos de colocación según ACI- 2011, sección 207.5R:

- Proyectos Pequeños 76 m³/hr
- Proyectos Medianos 190 – 380 m³/hr
- Proyectos Grandes 570-760 m³/hr

Los mezcladores deben operar con poco o con nada de retraso. Un programa de mantenimiento no debe ser descuidado y las reparaciones deben realizarse rápidamente.

Es mejor comenzar con altos contenidos de humedad y posteriormente reducirlo a la consistencia deseada en vez de comenzar con mezclas muy secas. Si la acumulación de material no es removido de la mezcladora diariamente, resultara en perdida en la efectividad de la misma.

Un control preciso y consistente de abastecimiento del cemento y agregados es particularmente importante para plantas de mezclado continuo.

7.1.1. Hormigón Fabricado en Central.

Se define como una central de fabricación de hormigón, al conjunto de instalaciones y equipos que, cumpliendo con las especificaciones comprende un proceso que consta de diferentes partes.



Ilustración 7. 1 Proceso de Fabricación del HCR.

En cada central de fabricación habrá una persona responsable, que estará presente durante el proceso de producción y que será distinta de la encargada del servicio de control de calidad.



7.1.2. Almacenamiento de Materias Primas.

El cemento y los áridos se almacenarán según las especificaciones necesarias del material. Las instalaciones para el almacenamiento de agua y/o aditivos, serán tales que eviten cualquier contaminación.

7.1.3. Instalación de Dosificación.

Las instalaciones de dosificación dispondrán de silos con compartimientos adecuados y separados para cada una de las fracciones granulométricas necesarias de árido. Cada compartimiento de los silos será diseñado y montado de forma que pueda descargar con eficacia, sin atascos y con una segregación mínima, sobre la tolva (1) de la báscula.



Ilustración 7. 3 Almacenamiento de Agua en Planta de HOLCIM.

(1) Dispositivo similar a un embudo de gran talla destinado al depósito y canalización de materiales granulares o pulverizados.



Ilustración 7.4 Almacenaje de Agregados Planta de HOLCIM.

Deberán existir los medios de control necesarios para conseguir que la alimentación de estos materiales a la tolva de la báscula pueda ser cortada con precisión cuando se llega a la cantidad deseada.

Las tolvas de las básculas deberán estar construidas de forma que puedan descargar completamente todo el material que se ha pesado. El operador deberá tener acceso fácil a todos los instrumentos de control. Se deberán mantener perfectamente limpios todos los puntos de apoyo y las articulaciones.

El medidor de agua deberá tener una precisión tal que no rebase la tolerancia de dosificación establecida en la dosificación.

Los dosificadores para aditivos estarán diseñados y marcados de tal forma que se pueda medir con claridad la cantidad de aditivo correspondiente a 50 kilogramos de cemento.



Ilustración 7. 5 Silos de Almacenamiento de Cemento y en la parte Inferior Silos de Aditivos.

7.1.4. Dosificación de Materias Primas.

Cemento.- El cemento se dosificará en peso, utilizando básculas y escalas distintas de las utilizadas para los áridos.

La cantidad que se dosifica es mayor al 30% de la capacidad total de la escala de la báscula, la tolerancia en peso de cemento será del $\pm 1\%$; caso contrario, la tolerancia en peso del cemento estará entre 0 y $+4\%$.

Agregados.- Los agregados se dosificarán en peso, sin olvidar las correcciones por humedad. Si se utilizan básculas distintas para

Cada fracción de agregado, la tolerancia en el peso total de cada fracción será de $\pm 2\%$.

La dosificación de áridos se realiza acumulada la tolerancia en el peso total de los áridos será de:

- a) $\pm 1 \%$ si el peso total sobrepasa el 30 % de la capacidad total de la escala de la báscula.
- b) $\pm 3\%$ si el peso total se encuentra entre el 15% y el 30% de la capacidad total de la escala de la báscula.
- c) $\pm 0,5\%$ de la capacidad total de la escala de la báscula, si el peso total se encuentra por debajo del 15% de dicha capacidad.

Agua.- El agua de amasado está constituida fundamentalmente por la que es directamente añadida a la amasada y por la procedente de la humedad de los áridos. El agua añadida directamente a la amasada se medirá por peso o volumen, con una tolerancia del $\pm 1 \%$.

En el caso de amasadoras móviles (camiones hormigonera) se medirá con exactitud cualquier cantidad de agua de lavado retenida en la cuba para su empleo en la siguiente amasada. El agua total se determinará con una tolerancia del $\pm 3\%$ de la cantidad total prefijada.

Agua total de un hormigón es la formada por el agua directamente añadida a la amasada, el agua aportada por la humedad de los áridos (tanto de absorción como el agua superficial), el agua que pudiera quedar en la amasadera móvil después de un lavado de la misma y el agua que pudieran aportar los aditivos.

Aditivos.- Los aditivos pulverulentos (2) deberán ser medidos en peso, y los aditivos en pasta o líquidos, en peso o en volumen. En ambos casos, la tolerancia será el $\pm 3\%$ del peso o volumen requeridos.

7.2. EQUIPOS DE MEZCLADO.

Los equipos de amasado para las mezclas de hormigón compactado con rodillo pueden estar constituidos por amasadoras fijas o móviles.

(2) Aditivos en polvo que mediante la adición de agua se vuelven líquidos.

Cuando el hormigón se amasa completamente en central y se transporta en amasadoras móviles, el volumen del hormigón transportado no deberá exceder del 80% del volumen total de tambor. Cuando el hormigón se amasa, o se termina de amasar, en amasadera móvil, el volumen no excederá de los dos tercios del volumen total del tambor.

Las amasadoras, tanto fijas como móviles, deberán ostentar, en un lugar destacado, una placa metálica en la que se especifique:

-*Amasadoras fijas*, la velocidad de amasado y la capacidad máxima del tambor, en términos de volumen de hormigón amasado

-*Amasadoras móviles*, el volumen total del tambor, su capacidad máxima en términos de volumen de hormigón amasado y las velocidades máximas y mínima de rotación.

Las amasadoras fijas deberán tener, además, un temporizador adecuado que no permita descargar la amasada hasta que no se haya cumplido el tiempo de amasado prescrito.

Las amasadoras fijas y las móviles deberán ser examinadas con la frecuencia necesaria para poder detectar residuos de hormigón o mortero endurecido, así como desperfectos o desgastes en las paletas o en superficie interior.

7.3. **AMASADO.**

El amasado del hormigón compactado con rodillo se realizará mediante uno de los siguientes procedimientos:

1. Totalmente en amasadera fija.
2. Iniciado en amasadera fija y terminado en amasadera móvil, antes de su transporte.
3. En amasadera móvil, antes de su transporte.

Aunque las técnicas del empleo de las instalaciones de amasado y equipos de suministro vienen condicionadas, en parte, por las características particulares de tales instalaciones, se pueden establecer las siguientes recomendaciones de carácter general:

- a) Cuando se utiliza una amasadora fija para el amasado total del hormigón, el tiempo de amasado se contará a partir del momento en que todos los materiales sólidos están en el tambor.
- b) Cuando se utiliza una amasadora fija para un amasado parcial del hormigón, el tiempo de amasado en ella no será mayor del requerido para mezclar los materiales.

c) Cuando el hormigón se amasa completamente en la mezcladora móvil, se requiere, normalmente, de 70 a 100 revoluciones a la velocidad de régimen para conseguir que se cumpla lo estipulado en el último párrafo de equipos de amasado.

d) Cuando se utilice una amasadora móvil para transportar hormigón, todas las vueltas durante el transporte se efectuarán a la velocidad de agitación y no a la de régimen.

7.4. HORMIGÓN FABRICADO EN PLANTAS MÓVILES.

Para la fabricación del HCR en Plantas Móviles o también llamado hormigón no fabricado en central se necesita de: Almacenamiento de materias primas, Instalaciones de dosificación y Equipo de amasado los cuales concuerdan con el fabricado en central.

Para el almacenamiento de materias primas, se tendrá en cuenta las especificaciones para el cemento y los agregados.

La dosificación de cemento se realizará en peso, pudiendo dosificarse los agregados por peso o volumen. No es recomendable el segundo procedimiento por las fuertes dispersiones que suele dar lugar.

El amasado se realizará con un período de batido, a la velocidad de régimen, no inferior a un minuto.

7.4.1. Instalación de Planta Móvil para la Fabricación del HCR.



Ilustración 7. 6 Planta Móvil HOLCIM.

Una gran distancia en el transporte del hormigón fresco es un factor de coste esencial. Especialmente para aplicaciones con tiempos de construcción muy cortos, o construcciones alejadas. Se opta por la instalación de plantas móviles que esta compuesta por varias partes que serán detalladas a continuación.

En la planta móvil la dosificadora es aquella que pesa el agregado, cuenta el agua y pesa el cemento; originalmente luego de esto se debe introducir el hormigón dentro del camión mixer el cual realizará el proceso de mezclado, pero estas mezclas se homogenizan, por lo que se usa un mezclador central que para el caso de esta presa es de origen alemán de doble eje horizontal, que produce toda clase de hormigón desde muy fluidos hasta muy secos.

La planta dosificadora es de origen americano la cual cuenta con un stock de agregados de cuatro compartimentos para los mismos, su uso depende del tipo de hormigón. Entre otros términos que se deben saber es el "Batch el cual es la cantidad de mezcla de hormigón que puede hacer la planta (el dosificador) en un solo batch 4.5 m³; es decir para producir los 8 m³ que puede transportar un mixer se necesitan 2 batchadas de 4,5 m³.

Para el transporte de todas estas partes se hace por medio terrestre con camiones los cuales se enganchan en uno topes llamados tortugas, se conecta el sistema de frenos hidráulicos y la electricidad para las luces, manteniendo las normas de seguridad en todo momento.

Una vez transportada la planta se debe encontrar un lugar apropiado para su instalación, se debe preparar el terreno, se hace una vista previa al sitio pidiendo de antemano un terreno compactado y lo mas plano posible que se pueda hallar en la zona.



Ilustración 7. 7 Base Usada en la Planta Móvil de HOLCIM.

Toda planta dosificadora al momento de comprarla trae consigo un plano para la instalación donde está indicado todas las especificaciones necesarias para este procedimiento, la planta se la suspende sobre una base para la cual se usa una grúa de 60 ton, la cual la eleva y monta sobre la base en un área de 3000m², aproximadamente toma 3 semanas instalarla y dejarla lista para su uso.

Otro elemento importante de la planta es el Apilador, el cual es el encargado de cómo indica su nombre de apilar el material que se necesita para la obra. El agregado llega en los camiones luego que el cargador lo pone en la tolva y distribuye el agregado en la parte superior que esta dividió en 4 partes para los diferentes agregados, este apilador es de forma radial tiene un chorro el

Cual se controla la distancia exacta para que el agregado caiga en el compartimiento que le corresponde.



Ilustración 7. 8 Compartimentos para la Ubicación de Agregados Planta.

Existen plantas que poseen un control electrónico para mover la banda de stacker (3) a una velocidad de banda de 1,8 m/s, igual posee topes que

(3) banda mecanizada inclinada para transporte de agregados.

Indican las distancias máximas a la cual debe girar para que no se vaya a pasar y el agregado caiga fuera de los compartimentos llamados swicht eléctrico.

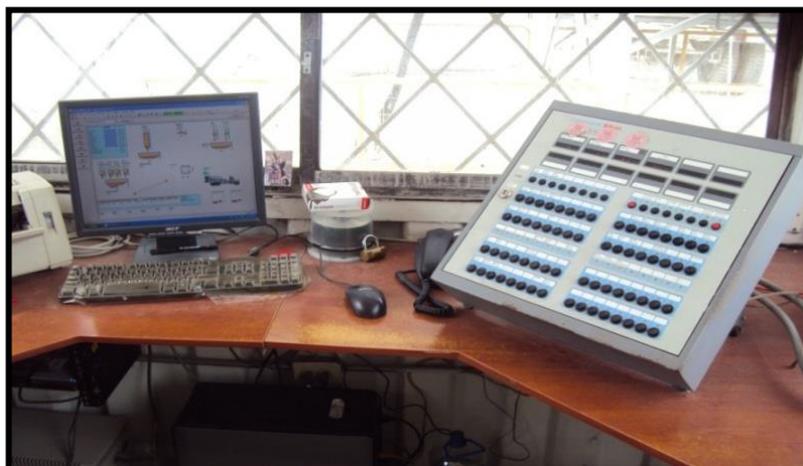


Ilustración 7. 9 Panel de Control Planta HOLCIM.

7.5. TRANSPORTE DEL HCR.

Para el transporte del hormigón se conseguirá que las masas lleguen al lugar de entrega en las condiciones estipuladas, sin experimentar variación sensible en las características que poseían recién amasadas.

El hormigón podrá ser transportado en camiones mixer, a la velocidad de agitación, o en equipos con o sin agitadores, siempre que tales equipos tengan superficies lisas y redondeadas y que sean capaces de mantener la homogeneidad del hormigón durante el transporte y descarga en el caso de hormigón convencional, para el caso de HCR

Deben minimizar el riesgo de segregación y el transporte se hace en volquetas, hay que evitar que la masa aumente su temperatura o dejar una loma de la misma. Su consistencia seca hace que posea más equipamientos de transporte tales como cintas transportadoras y vehículos de carga. El tipo de transporte también es influenciado por el tamaño máximo de los agregados.

7.5.1. Tipos de Transporte.

Transporte por Lotes

Transporte por lotes o intermitente puede ser realizado con los siguientes equipamientos:

- Camiones basculantes.
- Dumpcrete.
- Fuera de rutas.
- Camión con carrocería para hormigones.
- Vagones con descarga inferior (Bottom Dump)
- Scrapers
- Camiones hormigoneros (no)

Hay que considerar, además de la capacidad la velocidad para realizar un ciclo y el volumen que debe ser aplicado, no se puede dejar de lado el costo unitario del equipamiento, accesos,

Condiciones de colocación, preparación y mantenimiento de los accesos y equipamientos.



Ilustración 7. 10 Camión Transportando Material, Tomado de la Presentación: HCR Evolución y Nuevos Horizontes - Ing. Miguel A. Golik,.



Ilustración 7. 11 Limpieza de Camiones para Evitar Contaminación, Tomado de la Presentación: HCR Evolución y Nuevos Horizontes - Ing. Miguel A. Golik.

Transporte Continuo

Se realiza especialmente por cintas transportadoras, que se muestra muy eficiente. Deben ser protegidas del sol, vientos y de la lluvia. Cuando el sistema de correas es utilizado para transportar también hormigones convencionales, hay que tomar algunos cuidados especiales para evitar la contaminación de las áreas que están siendo hormigonadas. Este sistema de correas debe ser proyectado para acompañar la rápida subida de la presa, mediante guinchos con lanza.



**Ilustración 7. 12 Cinta Transportadora, Tomado de la Presentación:
HCR Evolución y Nuevos Horizontes - Ing. Miguel A. Golik.**



Ilustración 7. 13 Llegada del Hormigón por Medio de Cinta Transportadora, Tomado de la Presentación: HCR Evolución y Nuevos Horizontes - Ing. Miguel A. Golik.

7.6. MAQUINARIAS Y EQUIPOS PARA EL TRANSPORTE DEL HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO DE LA PLANTA A LA OBRA.



Ilustración 7. 14 Maquinarias y Equipos.

En el HCR, el hormigón se transporta en camiones tolva, se esparce con tractores y se compacta con rodillos vibratorios. El avance de la faena lo determina la planta dosificadora y mezcladora, y no el transporte, el esparcido y la compactación. La cantidad de moldes se reduce a un tercio, simplificándose de manera importante y disminuyendo los costos.

Las mezclas preparadas de hormigón se transportarán en camiones mezcladores y mantendrán su calidad y uniformidad durante el transporte, por lo que su conducción hasta el sitio de vaciado debe ser lo más eficaz y rápida posible, previniendo la segregación o pérdida de ingredientes.

Para presas de gran tamaño se ha generalizado, tanto para el hormigón tradicional y el HCR, el transporte es con cintas transportadoras. En ese caso, en el tradicional resulta crítica la compactación y los trabajos en los moldes, y además se requiere la refrigeración de la masa, una faena costosa y lenta.

7.6.1. Camiones Tolva.

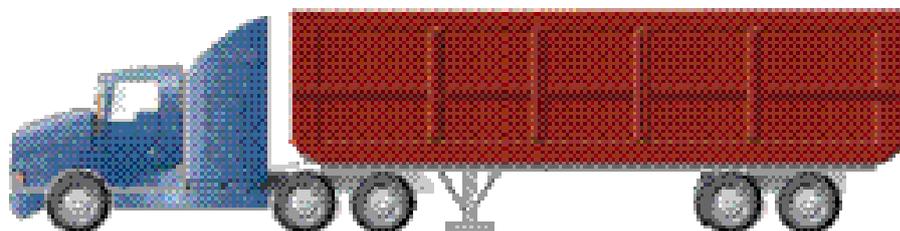


Ilustración 7. 15 Camión Tolva.

Antes de iniciar las maniobras de carga y descarga se deberá verificar el frenado e inmovilización del camión. No se sobrepasará la capacidad de carga máxima del vehículo. Al transportar materiales, escombros, residuos, entre otros, se deberá mantener la carrocería cubierta, manteniendo una distancia mínima de 10 centímetros entre la superficie de la carga y la cubierta.

Todo el estudio preliminar deberá estar hecho con anterioridad para la vía de circulación de los vehículos. Para prevenir la contaminación del transporte, será necesario usar rociadores de agua para humedecer las ruedas de los vehículos antes que ingresen al área de extensión. Para minimizar efectos adversos sobre la superficie, el quipo de transporte no deberá concentrar su circulación sobre la capa de elevación. Cuando el HCR es esparcido en grandes pilas, los agregados grandes tienden a rodar al exterior de la pila y crean protuberancias. Una regla general es limitar la altura de la pila a 1.5 metros máximo para evitar problemas de segregación, formación de protuberancias o crestas con los agregados.

7.6.2. Cintas Transportadoras.

Es evidente que lo primero que debe conocerse al proyectar una Cinta Transportadora, son las características del material a transportar, puesto que la cinta seleccionada debe cumplir con los

Requisitos confiables de vida útil para el tipo de material a transportado.



Ilustración 7. 16 Cintas Transportadas Planta HOLCIM.

El Transporte se realiza por medio de bandas transportadoras continuas de alta velocidad, desde la planta de hormigón directamente hacia la masa de HCR en el lugar de colocación en la presa. No trabaja bien con mezcla con contenidos bajos de material cementicio, mezclas secas, agregados de gran Tamaño o gran cantidad de finos, ya que tienden a producir segregaciones en la descarga.

Es importante que a lo largo de la superficie de las bandas transportadoras no haya material de HCR o de otro tipo que interfiera en la superficie de la misma, esto ocasiona una contaminación del área, la cual requerirá de una limpieza adicional entre las capas, ya que estos sistemas son diseñados para vaciado rápido.

Los anchos de banda deben estar limpios al retornar la banda, esto requiere frecuentemente atención en cuanto a los ajustes y desgastes. Propiamente diseñada la carga y descarga en las tolvas se previene la segregación al ser transferido el HCR a los puntos esenciales. El tiempo de exposición sobre las bandas deberá ser corto, 5 minutos siendo un tiempo deseable, pero lo normal son 10 minutos.

7.6.3. Descripción General de las Cintas Transportadoras.

Cinta transportadora o banda.- La función principal de la banda es soportar directamente el material a transportar y desplazarlo desde el punto de carga hasta el de descarga. Se sabe que conforme aumenta la longitud, también crece el costo de la banda respecto del total.



Ilustración 7. 17 Sección Transversal de la Cinta Transportadora Planta Móvil HOLCIM.

Rodillos y Soportes.- Los rodillos son uno de los componentes principales de una cinta transportadora, y de su calidad depende en gran medida el buen funcionamiento de la misma.



Ilustración 7. 18 Rodillos / parte de la Cinta Transportadora Planta Móvil HOLCIM.

Las funciones a cumplir son principalmente:

1. Soportar la banda y el material
2. Contribuir al centrado de la banda.
3. Ayudar a la limpieza de la banda.

Tambores.- Los tambores están constituidos por un eje de acero, siendo el material del envolvente acero suave y los discos, ya sea de acero suave o acero moldeado.

Tensores De Banda.- Los Dispositivos de tensado cumplen las siguientes funciones:

- Lograr el adecuado contacto entre la banda y el tambor motriz.
- Evitar derrames de material en las proximidades de los puntos de carga.
- Compensar las variaciones de longitud producidas en la banda.
- Mantener la tensión adecuada en el ramal de retorno durante el arranque.

Bastidores.- Los bastidores son el componente más sencillo de las cintas, y su función es soportar las cargas del material, banda, rodillos y las posibles cubiertas de protección contra el viento.

Tolvas de Carga y Descarga.- La carga y descarga de las cintas son dos operaciones a las cuales no se les concede la debida importancia, pese

A que de ellas depende el que el material a transportar inicie adecuadamente su recorrido a través de la instalación.

7.6.4. Tractores.

Los equipos de tipo tractor se utilizan ampliamente en la construcción. Los tractores sirven como unidad motrices primarias para una gran variedad de equipos para movimiento de tierra. Se caracterizan principalmente por su buena capacidad adherencia al terreno.



Ilustración 7. 19 Tractor, Tomado de www.virural.com.ec.

CAPITULO 8

8. PROCESO CONSTRUCTIVO DE PRESAS ELABORADAS CON HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO (HCR).

Las presas elaboradas de Hormigón Compactado con Rodillo nacen como un nuevo tipo de presas que combina la seguridad de las presas de hormigón convencional junto con la economía, disminución en los tiempos de colocación, extendido y acabado. En la construcción de presas deben emplearse materiales cuyas propiedades intrínsecas, su puesta en obra y la evaluación de sus características sean susceptibles de control.

8.1. Presa de Gravedad.

Son aquellas presas en las cuales el peso del material con las que son construidas resiste el empuje del agua.

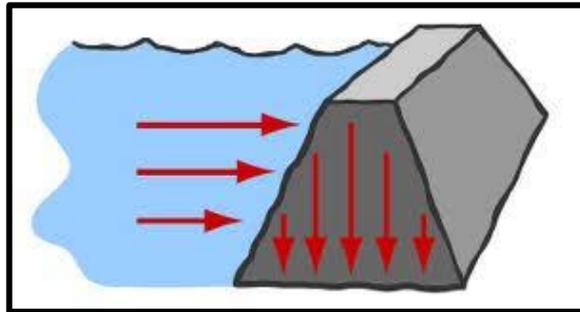


Ilustración 8. 1 Presa de Gravedad, Tomado de www.skyscraperaty.com.

8.2. Proceso Constructivo Presa de HCR - Método de Capa Extendida.

Consiste básicamente en un ciclo de 4 pasos:

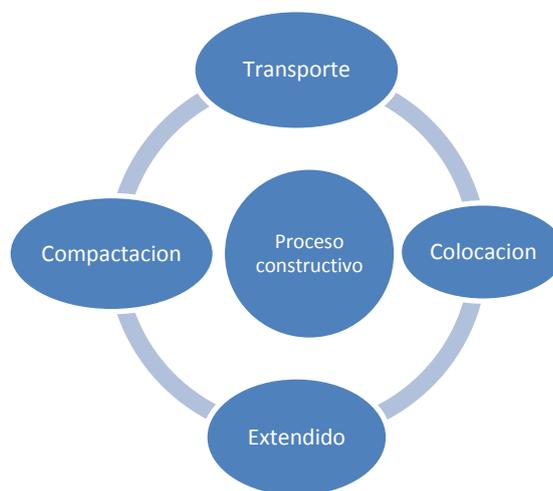


Ilustración 8. 2 Proceso Constructivo de Presas de HCR, Método de Capa Extendida.

8.2.1. Transporte y Colocación.

Para las actividades de construcción se debe empezar primero con las pistas de acceso a las diferentes partes de la obra, instalación de la planta de agregados y planta de hormigón, tratamiento de consolidación para la cimentación de la presa etc.

El tiempo transcurrido desde el inicio del mezclado y compactación final deberá llevarse a cabo dentro de 45 minutos, este tiempo puede ser extendido para climas fríos y deberá reducirse en ambientes calurosos, baja humedad, condiciones de viento y manipulación múltiple que pueda disminuir la trabajabilidad y reducir el tiempo permitido.

El HCR es generalmente transportado por:

- Vehículos de Carga
- Sistemas de bandas o Cintas transportadoras
- Combinación de ambos Sistemas

Los medios de transporte fueron descritos en el capítulo 7.



Ilustración 8. 3 Colocación del HCR, Tomado de la Presentación: HCR Evolución y Nuevos Horizontes - Ing. Miguel A. Golik.

8.2.2. Colocación y Extensión.

Una técnica preferida para la colocación de HCR en presas es ir avanzando cada capa de un lado a otro de los contrafuertes o empotramientos de la presa. Un equipo de reserva deberá estar disponible en el caso de una avería. Todas las operaciones deben tener una secuencia, como el acceso y enrutamiento para los equipos, sistemas de soporte de aire y agua.

Debe darse una atención cuidadosa para asegurar que el remezclado está ocurriendo y que el dozer (Excavadora) no esté simplemente enterrando material segregado. Las excavadoras usan cuchillas en forma de U para limitar la segregación que puede producirse por extensión del HCR. Una dozer típicamente extiende el HCR en capas

De un espesor de 30 cm \pm 5cm, poca elevación que le permite manejar el material sin compactar.

El hormigón es esparcido hasta una extensión de 15 metros medidas desde la cara de avance, similar a la técnica japonesa, en donde las excavadoras nivelan las pilas y las esparcen en capas con espesores de 150mm hasta alcanzar una elevación final de 610mm.

Las excavadoras deben operar sobre HCR fresco que no ha sido compactado, porque si opera sobre un hormigón ya compactado la superficie sufriría daños, el operador deberá limitar el movimiento de reversa y hacia delante. Sin embargo, daños en la superficie que ha sido recompactada después que la mezcla se ha secado, desarrolla planos de compactación con poco o ninguna resistencia.



Ilustración 8. 4 Proceso de Colocación y Extensión del HCR, Tomado de la Presentación: HCR Evolución y Nuevos Horizontes - Ing. Miguel A. Golik.

Equipos de extensión (motoniveladoras) deberán dejar una superficie plana o un plano adecuado antes que los rodillos compacten la capa. Antes de

Extender el hormigón fresco, se realiza una limpieza de la superficie existente con aire a presión y luego se aplica una lamina de máximo 10mm de espesor de mortero de pega sobre la superficie endurecida. El espesor más común de la capa compactada es de 300mm.

Otro factor influenciante para levantar espesores de capa, es el tiempo máximo de exposición antes de cubrirla con la capa siguiente. Cada proyecto debe estudiarse para optimizar los beneficios de variar los espesores a medida que se van levantando, capas gruesas indican tiempos de exposición largos pero tienen menores capas de juntas y menor potencial de filtración, capas finas resultan en un mayor potencial de formación de juntas, pero le permite a las juntas cubrirlas antes, resultando en una unión mejorada.



Ilustración 8. 5 Crawler Dozer 650 J, Tomado de www.deere.com.



Ilustración 8. 6 Dozer Utilizado en HCR, Tomado de www.hqresimler.com.

Una excavadora pequeña (similar al modelo Caterpillar D-3) es necesario para iniciar la cimentación y para condiciones estrictas, la capacidad de este modelo es de 230m³/hr.



Ilustración 8. 7 Caterpillar D-3, Tomado de www.encarsglobe.com.

8.2.3. Minimizando la Segregación.

Se logra con un adecuado almacenamiento y manipulación de los agregados, pasando por la mezcla, descarga en la mezcladora, transporte y colocación. La segregación no tiende a ser un problema grave cuando el hormigón es transportado de la planta a la obra mediante un sistema de bandas transportadoras lo puesto a otras maneras de transportar estos materiales ya que la segregación suele ocurrir cuando mezclas relativamente secas son apiladas de algunas formas.

Las mezclas de HCR deben primero ser colocadas sobre hormigón fresco recién esparcido sin compactar y luego esparcirla la capa posterior sobre superficie dura o semiduras con bulldozer. Esta operación de extendido nos garantizara un remezclado del material con lo cual se minimizará, formación de fisuras en la superficie y de ondulamiento de la capa.

El HCR nunca deberá arrojarse directamente sobre una junta de construcción dura o semidura al menos cuando se use el método de colocación por medio de bandas transportadoras o cuando se comience con una nueva capa hasta que exista suficiente área de trabajo para operar con el bulldozer el HCR sin compactar.

8.3. MAQUINARIA Y EQUIPO EMPLEADO EN EL PROCESO CONSTRUCTIVO DE PRESAS ELABORADAS CON HCR.

8.3.1. Rodillos Vibradores.

Rodillos vibradores grandes, autopropulsados son diseñados por dos diferentes propósitos: compactación de suelo granular y roca, y compactación de pavimento con mezclas asfálticas. El tipo de compactación y el espesor de la capa influyen las características de diseño y operación de los rodillos vibradores.

El diseño de rodillos para compactar grandes volúmenes de suelo y roca en capas delgadas deberá tener una amplitud en el rango de 1.5 a 2 mm. Las frecuencias adecuadas corresponden a 25 – 30 Hz (1500 – 1800 vibraciones/min). Para la compactación de asfalto, la amplitud óptima es 0.4 – 0.8 mm y una frecuencia adecuada en el rango de 33-50 Hz (2000- 3000 vibraciones/min). Rodillos de Alta amplitud y baja frecuencia son ideales para mezclas de HCR con baja trabajabilidad y espesores de capas delgadas. Rodillos de baja amplitud y frecuencia alta son los mejores para mezclas de HCR con mejor trabajabilidad (mejor medida de consistencia Vebe) y espesores de capas más finas.



Ilustración 8. 8 Rodillo Vibratorio de Tambor Simple, Tomado de www.weiku.com.



Ilustración 8. 9 Rodillo Vibratorio de Doble Tambor, Tomado de www.cat.com.

8.3.2. Velocidad de Rodillos.

El Incremento en la velocidad del rodillo requiere mayor número de pasadas para igualar su compactación. La máxima velocidad de un rodillo para su operación y compactación es aproximadamente 3.2km/hr.

8.3.3. Compactadoras Pequeñas.

Equipos de compactación pequeños, incluyendo tampers(Apisonadores), platos vibratorios que son requeridos para complementar a los rodillos vibratorios de mayor tamaño. Tampers poderosos son capaces de Producir fuerzas de golpe de al menos 8.5 KN, esto resulta en una profunda compactación que es conseguida con el plato vibratorio, normalmente es efectiva solo para aproximadamente 230mm. Platos vibratorios deben tener una masa mínima 75 kg y pueden moverse a lo largo, en dirección recta.

Platos vibratorios (bailarina) pueden ser adecuados para capas fina de 150 a 225 mm y producen un acabado liso.

Pequeñas walk – behind vibrating(Compactador pequeño) tienen una fuerza dinámica mínima de 2.6N/mm . Rodillos de tambores pequeños tienen mayor energía de compactación que los platos vibratorios, para

Conseguir una densidad equivalente a la producida por los rodillos será necesario reducir el espesor de capas.



Ilustración 8. 10 Compactador Simple - Monocilindrico, Tomado de www.viarural.com.ec.



Ilustración 8. 11 Compactador - Apisonador, Tomado de www.interempresas.net.



Ilustración 8. 12 Placa Vibradora, Tomado de la Presentación: HCR Evolución y Nuevos Horizontes - Ing. Miguel A. Golik.



Ilustración 8. 13 Compactación con Equipos Menores, Tomado de la Presentación: HCR Evolución y Nuevos Horizontes - Ing. Miguel A. Golik.

8.4. COMPACTACIÓN.

Depende básicamente de la selección del rodillo, pasadas mínimas y espesores de capa.

El compactador típico es de 10 toneladas con rodillo doble o simple y con una fuerza dinámica de 8kg/mm de ancho de tambor. El mecanismo de vibración automáticamente se apaga cuando el rodillo se detiene. Vibración continua en cualquier lugar causara desplazamiento del material por debajo del rodillo y formación de arrugas en los bordes expuestos.



Ilustración 8. 14 Placa para Darle Irregularidad a las Capas Verticales, Tomado de la Presentación: HCR Evolución y Nuevos Horizontes - Ing. Miguel A. Golik.



Ilustración 8. 15 Colocación de Mortero de Pega, Tomado de la Presentación: HCR Evolución y Nuevos Horizontes - Ing. Miguel A. Golik.

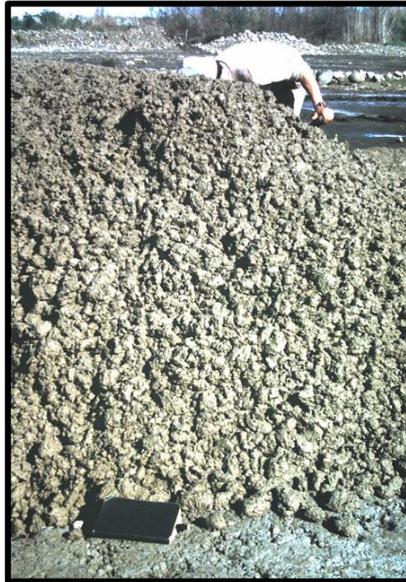


Ilustración 8. 16 Consistencia y Compactación del HCR, Tomado de la Presentación: Errores, Aciertos, Contrariedades, Conquistas y Necesidades de Mantener la Calidad- Ing. Francisco Rodríguez.



Ilustración 8. 17 Humectación de Superficie, Tomado de la Presentación: Errores, Aciertos, Contrariedades, Conquistas y Necesidades de Mantener la Calidad- Ing. Francisco Rodríguez.

8.4.1. Pasadas Mínimas con el Rodillo Vibrante y Espesores de Capa.

El mínimo número de pasadas para conseguir una compactación adecuada con rodillo vibrante depende primordialmente de la trabajabilidad de la mezcla de HCR y de su espesor de capa. La experiencia ha demostrado que el máximo espesor de capa se registrará por lo que tan fresca se encuentra la mezcla en el momento de su colocación, por gradación, y la efectividad del **Dozer** mientras el material es extendido, más no por el número de pasadas del rodillo. Como regla general el espesor de la capa a compactar de cualquier mezcla de HCR deberá ser de al menos 3 veces el diámetro del tamaño máximo nominal del agregado.

Para mezclas secas se puede comenzar con el Rodillo en modo de vibración, los ajustes de frecuencia y amplitud dependen de la trabajabilidad de la mezcla. La compactación efectiva ocurre con una frecuencia alta generalmente del orden de 1800 a 3200 Vibraciones/min y con una baja amplitud en el orden de 0.4 a 0.8 mm. Típicamente de 4 a 6 pasadas con rodillos vibradores de doble tambor de 10 Toneladas son necesarias para alcanzar la densidad deseada en capas de espesores del rango de 150 a 300mm con densidades aproximadamente 98% de lo conseguido con rodillos grandes, Proporcionado una pendiente de 1% hacia aguas abajo para el drenaje.

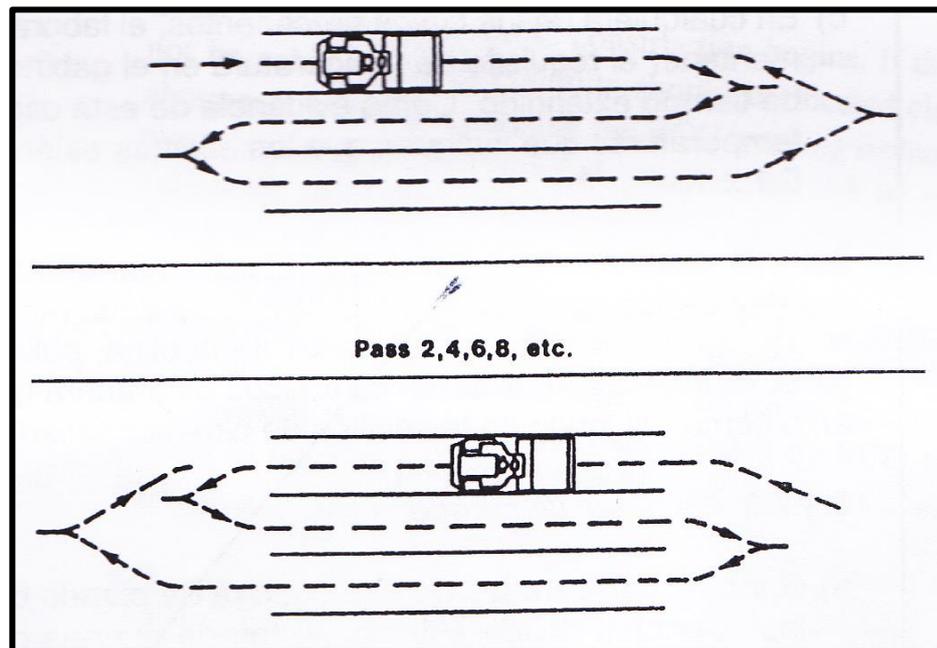


Ilustración 8. 18 Mecanismo de Pasas del Rodillo, Tomado de ACI 2011-207.5R.

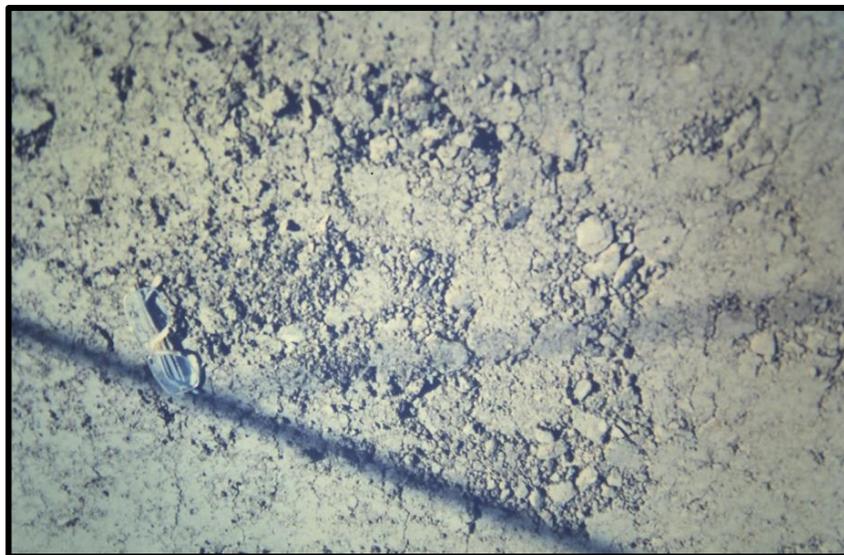
La presa debe subir de nivel de 0.6 a 1 metro por día, dependiendo de la planta de hormigón.



Ilustración 8. 19 Toma de Temperatura, Tomado de la Presentación: Errores, Aciertos, Contrariedades, Conquistas y Necesidades de Mantener la Calidad- Ing. Francisco Rodríguez.



**Ilustración 8. 20 Marcas de Equipos sobre Hormigón Endurecido,
Tomado de la Presentación: HCR Evolución y Nuevos Horizontes - Ing.
Miguel A. Golik.**



**Ilustración 8. 21 Típico acabado Superficial de HCR de Consistencia
Seca, Tomado de la Presentación: HCR Evolución y Nuevos Horizontes
- Ing. Miguel A. Golik.**



Ilustración 8. 22 Formación de Fisura por Contracción y Secado, Tomado de la Presentación: HCR Evolución y Nuevos Horizontes - Ing. Miguel A. Golik.

- $e = 2 \cdot a \cdot [Q + E/2] L/V \cdot n \cdot N \cdot 1/BL$
- **Donde:**
 - e = energía de compactación del rodillo
 - a = amplitud del tambor
 - Q = carga axial del tambor vibratorio
 - E = fuerza de excitación
 - V = velocidad de translación
 - L = largo del rodillo
 - n = frecuencia
 - N = número de pasadas del rodillo
 - B = ancho de compactación

Ilustración 8. 23 Energía de Compactación, Tomado de la Presentación: HCR Evolución y Nuevos Horizontes - Ing. Miguel A. Golik.

8.5. JUNTAS DE ELEVACIÓN.

Juntas horizontales son inevitables en masas de HCR debido al método constructivo empleado. Para una buena resistencia en

Estabilidad, resistencia al corte y estanqueidad se requieren de superficies limpias y rugosas para garantizar una buena adherencia.

8.5.1. Avance de juntas Horizontales de Elevación.

Algunas pruebas han demostrado que realizar una limpieza con un chorro de arena de 24 a 72 horas después de extender el hormigón puede reducir la conexión entre capas. Cuando la capa superior de HCR no es cubierta a tiempo con hormigón adicional de tal manera que no se alcanza la configuración inicial, en consecuencia es inevitable la formación de junta fría.

Una junta fría puede ser generalmente caracterizada por una madurez conjunta, la cual es resultado de la Temperatura Medida en la Superficie (AST) y del Tiempo de Exposición (TE). Madurez de la junta es expresada en temperatura – hora.

Maduración de junta = $[(AST \times 1.8) + 32] \times TE$, establecida 260 a 815 °C-hr. Una junta que ha sido expuesta menos de 6 horas antes de ser cubierta por la capa siguiente tendrá un adecuado esfuerzo al cortante pero no tendrá resistencia a la estanqueidad al menos que se limpie y se cubra con una mezcla con alto contenido de material cementicio, el límite de maduración dependerá de la mezcla y requerimientos de cada proyecto.

8.5.2. Tratamiento de Junta.

Las juntas de elevación deben mantenerse continuas y protegidas de la humedad, desecación o congelamiento al momento de extender la siguiente capa y para el curado final de la superficie. La superficie deberá ser limpiada, estar cerca de una condición saturada superficialmente seca (SSS) para comenzar a extender la capa posterior. Ensayos y la experiencia han demostrado que la mezcla alcanza la condición SSS cuando cambia su tonalidad de oscuro a claro y es mucho más fácil limpiar la superficie con un chorro de aire a presión sin reducir la calidad de la junta, incluso con esta técnica se ha conseguido incremento en los esfuerzos.

Si la superficie ha sido terminada luego de 1 o 2 días de tal manera que el hormigón ya se ha endurecido, será necesario limpiar la misma con un chorro de agua a presión, en este caso aire a presión no es adecuado, se podría presentar contaminación y una lechada sería necesaria, limpieza con agua solo puede ser usada cuando el hormigón se haya endurecido.

Si en la construcción la junta tiene un valor de madurez entre 260 – 815 °C –hr y si se ha mantenido limpia y húmeda a lo largo de su exposición, el tratamiento de junta no será necesario, si la superficie

Ha sido contaminada con suciedad, barro u otro material dañino, se tendrá que remover.

Si la superficie excede un nivel de madurez de 550°C –hr o se seca muy rápido requerirá de una limpieza y de una completa o parcial capa de mezcla con alto contenido de pasta o mortero para la colocación del HCR.

La capa de mortero deberá ser capaz de cubrir las irregularidades, el espesor del mortero será generalmente de 6mm, espesores mayores pueden afectar la compactación. Generalmente cuando se usa mortero en todas las capas es para garantizar una mejor interface en las juntas a lo largo de la presa, mejora la capacidad de corte, tracción en las capas y provee una protección adicional contra la filtración.

El mortero de pega no se recomienda de alta resistencia ya que esto involucra mayor contenido de cemento con lo cual habrá más por fisuramiento, por contracción y secado, el mortero deberá ser elevado de igual manera que el mortero para bloques siguiendo las normas NTE INEN 2551, la proporción a usar puede ser de 3 a 1.

8.5.3. Juntas de Construcción.

Son una parte importante en el diseño de muchas presas. El control de infiltraciones incluye muchos métodos, pero se considera importante el este estudio de construcción de juntas debido a que induce a discontinuidad en la presa. La realización de juntas de construcción ocasiona disminución significativa en la velocidad de producción lo cual reduce los beneficios que se obtienen de una rápida colocación del HCR.

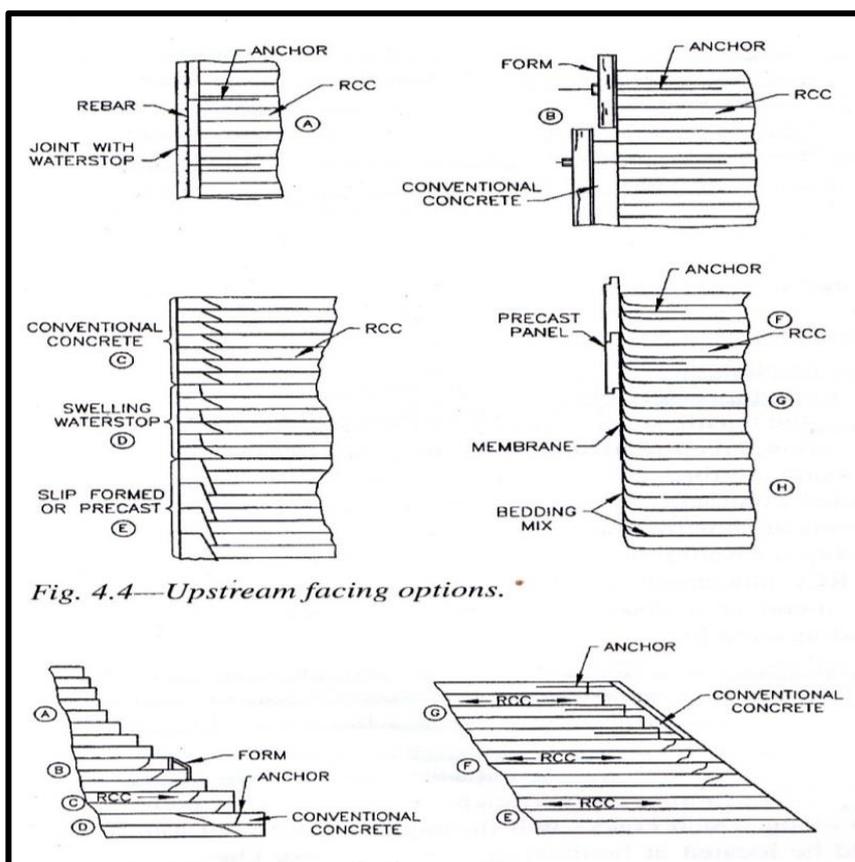


Fig. 4.4—Upstream facing options.

Ilustración 8. 24 Formación de Capas, Tomado de ACI 2011-207.5R.

CAPITULO 9

9. CONTROL DE CALIDAD DEL HORMIGON COMPACTADO CON RODILLO.

El control de calidad es una actividad necesaria en toda obra de ingeniería principalmente si el proyecto es de gran magnitud como en una presa donde se manejan grandes volúmenes de hormigón, debe estar presente que en todas las etapas, desde el diseño, planificación, y en las fases iniciales de la construcción del proyecto es importante tener un control.

En gran parte de las obras, los requisitos de control de calidad se especifican en los documentos del contrato. La preparación de esos documentos debe ser coordinada con los diseñadores del proyecto para que los requisitos de control de calidad se apliquen correctamente.

9.1 ACTIVIDADES PREVIAS A LA COLOCACIÓN DE HCR.

Las tasas de colocación de HCR pueden ser significativamente mayores que el hormigón convencional. Cualquier problema que demore la producción y colocación de HCR esencialmente, retrasa todo el cronograma previsto para la realización de la obra.

Los retrasos de colocación más comunes son debido a los problemas causados por:

- Fundación, preparación y limpieza.
- Conjunto de limpieza.
- El clima caliente o frío.
- Avería del equipo.
- Materiales insuficientes.
- El clima.

9.1.1. Preliminares.

Un elemento clave en la resolución de problemas potenciales es que todos los participantes comprendan los requisitos del proyecto y los procedimientos.

Los aspectos básicos que se deben considerar con anticipación son:

Personal de Trabajo.- Debe estar capacitado y disponible para las operaciones de producción previstos. Todo el personal debe saber aplicar criterios de aceptabilidad. Muchos proyectos con HCR consisten en las operaciones de colocación casi continuas y con la cantidad de personal suficiente para mantener todo el turno sin exceso de trabajo.

Instalaciones y Equipamientos.- Las instalaciones y equipos de prueba apropiadas, para el tamaño y el volumen de producción del proyecto deben estar disponibles antes de iniciar la obra.

Comunicaciones.- El ingeniero y el personal de control de calidad deben reunirse con el contratista para revisar y discutir los requisitos, y procedimientos para la producción de material de HCR, mezclado, colocación, pruebas, inspección y seguridad en el lugar de trabajo.

9.1.2. Control de calidad durante la fabricación del HCR.

El ensayo del hormigón se realiza en sus dos estados; fresco para determinar alteraciones durante su fabricación y endurecido para verificar sus propiedades de resistencia y durabilidad. Una vez iniciado el proceso de elaboración de una mezcla, sobre el mismo camión de transporte, se procede a la toma de una muestra en el laboratorio. Esta muestra es sometida a un control inmediato de su contenido de humedad, colocando una porción de la mezcla dentro de un recipiente

Vebe, la que ejecutada a vibración (20's) permite determinar el 'canon time" que consiste en el tiempo para que el mortero integrante de la misma cubra una porción del vaso recipiente. El recipiente de ensayo presenta dos niveles marcados, que establecen un rango vinculado al contenido de humedad (está fijado entre 8's y 13's) dentro del cual se encuentran los porcentajes de humedad necesarios para la colocación de las mezclas.

El personal mínimo necesario para el momento en que la planta ya está habilitada es de 3 personas las cuales son: Jefe de planta, Operador de la plata y operador del cargador hay casos en que dependiendo de la magnitud un ayudante de planta.

Que el rango del 'canon time" se encuentre en niveles cercanos al límite superior o inferior, depende de la condiciones climáticas reinantes al momento de la conformación de las capas.

Con la muestra de HCR tomada a la salida de la planta se confeccionan probetas en 150x300mm que se compactan en 3 capas con un pisón-martillo eléctrico (Martillo Hilti modelo TE 805) normalizado para este fin, con 20 pulgadas de acción en cada capa.

9.1.3. Determinación de la Densidad de Campo / Compactación.

Es común realizar la prueba de campo de densidad para determinar o verificar los requisitos razonables de densidad para construcción y para la comparación con las propiedades de laboratorio utilizados para la mezcla de HCR (diseño).

Las secciones de prueba adicionales de densidad se pueden hacer para establecer el rendimiento máximo de densidad de la mezcla usada en la producción de HCR.

Un ejemplo de una sección de control de densidad máxima, tal como se realizó para la presa de Stillwater superior, se da en la siguiente Ilustración 9.1.

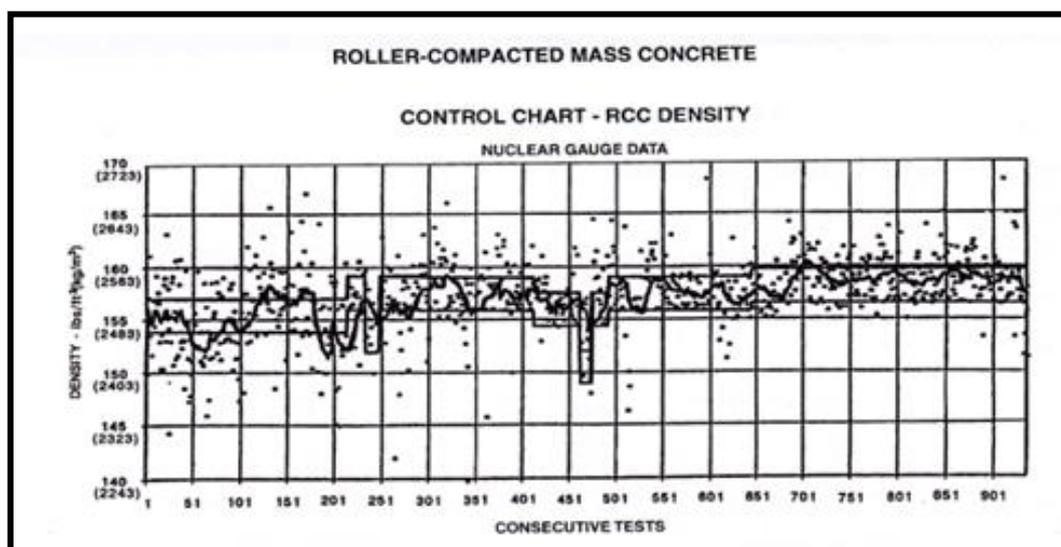


Ilustración 9.1 Grafico de Control para Resultados de Pruebas de Densidad Húmeda Consecutiva, Tomado de ACI 2011-207.5R.

El personal de inspección debe revisar el equipo de compactación para el cumplimiento de los requisitos de especificación antes del inicio de los trabajos, cualquier inconsistencia deberá ser comunicada al fabricante del equipo.

9.2. ACTIVIDADES DURANTE LA COLOCACIÓN DE HCR.

Control de calidad durante la colocación de HCR implica dos operaciones:



Ilustración 9. 2 Operaciones del Control de Calidad.

El objetivo del control de calidad es identificar los problemas antes de que ocurran o que sean detectados lo más temprano posible en el proceso, para que puedan ser corregidos.

Las pruebas se deben realizar, informar, y revisar rápidamente. Si las actividades de ensayo o inspección causan retrasos significativos en cualquier etapa de la producción HCR, todas las construcción partes constituyentes a la del proyecto pueden verse afectadas o canceladas.

Tabla 9. 1 Tabla con Ensayos de Control de Calidad (ejemplo), Tomado de ACI 2011-207.5R.

Pruebas de Control de Calidad			
Material	Ensayo	Norma (1)	Frecuencia (2)
Cemento	Propiedades Físicas/Químicas	ASTM C 150 o equivalente	Certificación del fabricante o precalificados
Puzolana	Propiedades Físicas/Químicas	ASTM C 618 o equivalente	Certificación del fabricante o precalificados
Aditivos	-	ASTM C 494	Certificación del fabricante
		ASTM C 260	
HCR	Gravedad Especifica - Absorción	ASTM C 127	1 / Mes
		ASTM C128	
	Gradación	ASTM C 117	1 / Tanda o 1 / Día
		ASTM C136	
	Contenido de Humedad	ASTM C 566	Antes de cada Tanda o si es requerido
		ASTM C 70	
	Piso / Partículas largas	-	1/ Mes o 10,000 yd ³ (7500 m ³)
	Plasticidad de finos	-	1/ Mes o 10,000 yd ³ (7500 m ³)
	Consistencia y Densidad	ASTM C 1170	2 / Tanda o si es requerido
	Densidad en situ	ASTM C 1040	1/hr o cada 250 yd ³ (200 m ³)
	Humedad en situ	ASTM C 1040	1/hr o cada 250 yd ³ (200 m ³)
	Humedad de secado en horno	ASTM C 566	1/Tanda o cada 1000 yd ³ (750 m ³)
	Proporciones de mezcla -HCR variabilidad de mezcla	ASTM C 172,C 1078, ASTM C 1079,especial	1/Semana o cada 5000 yd ³ (4000 m ³)
	Temperatura	ASTM C 1064	1/2 hr o cada 500 yd ³ (400 m ³)
	Resistencia a la Compresión (3)	ASTM C 1176	1/día o cada 5000 yd ³ (4000 m ³)
Resistencia a la Tracción (3)	ASTM C 496	1/día o cada 5000 yd ³ (4000 m ³)	
Modulo de Elasticidad (3)	ASTM C 469	1/día o cada 5000 yd ³ (4000 m ³)	

(1) Otros estándares apropiados de la industria puede ser utilizado.

(2) La Frecuencia mostrada es un ejemplo típico de los proyectos más pequeños y / o pruebas de agencia a fondo. En proyectos mayores y aquellos con diseños menos rigurosos, las pruebas menos frecuente puede ser apropiada.

(3) Algunos proyectos utilizan el análisis de confiar en el control durante la construcción para lograr la calidad requerida, por lo que pocos cilindros y tomar muestras después de la verificación de las propiedades del material in situ.

9.2.1. **Ensayo de Materiales.**

Todos los materiales del HCR deben ser evaluados para comprobar que cumplen con los requisitos de las especificaciones en el diseño del proyecto antes de su uso en el trabajo.

9.2.2. **Cemento y Puzolana.**

Cemento y puzolana son normalmente aceptadas en base a la certificación del fabricante. Las pruebas también se pueden realizar en muestras aleatoriamente durante la construcción de grandes proyectos bajo su programa de garantía de calidad establecido.

9.2.3. **Aditivos.**

Aditivos son normalmente aceptados en base a la certificación del fabricante.

9.2.4. **Agregados.**

El contenido de humedad y clasificación de agregados afecta significativamente a las propiedades en estado fresco y endurecido de HCR. La clasificación de arena y agregado grueso afecta la trabajabilidad, y la capacidad de compactar eficazmente o consolidar HCR. Los análisis de tamices se realizan durante el procesamiento inicial y el almacenamiento de agregados.

La variación en los inventarios de humedad resultará en mayor o menor trabajabilidad del HCR. Un aumento o disminución en la humedad de unas pocas décimas de 1% puede cambiar las características de compactación de HCR.

Todos los ensayos que se realizan en lo agregados para control de calidad deben estar acordes con los resultados obtenidos durante la etapa de caracterización de los mismos.

9.3. EVALUACIÓN DE MEZCLAS DE HCR.

La evaluación de las proporciones de mezcla HCR tiene dos aspectos principales.

- Materiales en la mezcla con las proporciones deseadas.
- Trabajabilidad del HCR y la uniformidad (o variabilidad) de las proporciones de la mezcla después de que sale de la

Mezcladora o después de que ha sido colocado y compactado.

Un elemento esencial del control de calidad es el monitoreo de los pesos o ponderaciones dosificación por lotes durante la producción HCR.

9.3.1. Tipo Batch-Registros de la Planta y la Calibración.

Modernas plantas de tipo discontinuo con mezclador central son relativamente fáciles de calibrar y operar. La carga combinada,

La mezcla, la descarga y el tiempo de retorno determina la tasa de producción máxima. Las proporciones de mezcla se introducen desde los controles manuales o equipo.

9.3.2. Registros Continuos de la Planta de Mezcla y Calibración.

Plantas continuas de mezcla son relativamente fáciles de calibrar y operar. Al igual que con las plantas de tipo discontinuo, una cinta transportadora de desvío se recomienda en una muestra de HCR en la planta sin detener la producción. También, como con las plantas de tipo discontinuo, la planta de dosificación continua debe ser calibrada como mínimo, promedio, y se espera tasas máximas de producción.

Durante la producción, puede ser necesario volver a calibrar la planta después de un cierre o si algún cambio inusual en la mezcla que se observó.

9.3.3. Mezcla de Ensayo Variabilidad.

Estas pruebas también se utilizan para determinar qué tan bien y uniformemente se realiza la mezcla de HCR después de que se ha entregado y se ha extendido en la zona de colocación según “**ASTM C 172, anexo A1 de la norma ASTM C 94**”, el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos mediante el Método CRD C-55 ha utilizado en

Forma modificada para realizar pruebas de uniformidad de HCR fresco, y establecer procedimientos aceptables de mezclado en el campo.

9.4. Ensayos del HCR.

Una variedad de pruebas de HCR de control de calidad han sido desarrolladas para adaptarse a la amplia gama de consistencias, proporciones de mezclas, y la clasificación por agregados posibles con HCR. Algunas pruebas son una adaptación de los procedimientos convencionales de hormigón, no hay ningún conjunto de pruebas que se aplican a todas las mezclas y las operaciones de colocación de HCR.

9.4.1. Pruebas de Consistencias.

El aparato Vebe o similar se utiliza para medir la consistencia de la mezcla de HCR. Cuando se utiliza para los tipos HCR más húmedos, los tiempos típicos de Vebe son de 10 a 30 segundos.

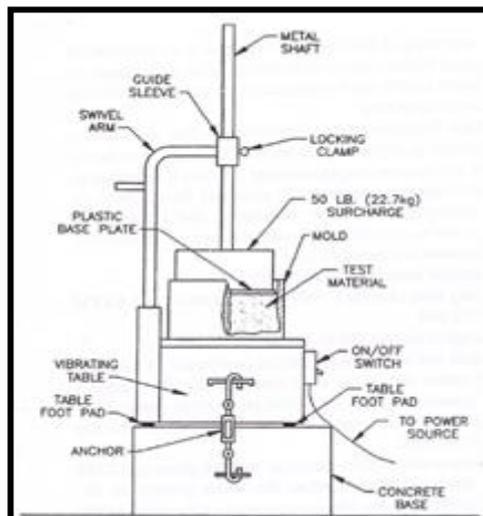


Ilustración 9.3 Aparato Vebe (ASTM C 1170), Tomado de ACI 2011-207.5R.

La muestra se hace vibrar hasta que se consolida bajo carga. La consistencia Vebe es el tiempo que toma para consolidar completa de la muestra como se indica mediante un anillo de mortero alrededor del anillo de la recarga ilustración 9.3.



Ilustración 9.4 Aparato Vebe-Coherencia de la Prueba con el Anillo de Mortero en la Muestra Consolidada, Tomado de ACI 2011-207.5R.

9.4.2. **Densidad y Prueba de Vacíos.**

La densidad máxima alcanzable prácticamente de HCR se mide a partir de muestras frescas obtenidas en la planta de mezcla o de la colocación. Las muestras luego se consolidan o se compactan en un laboratorio de campo utilizando el procedimiento Vebe con el método de compactación aplicado en la prueba de prediseño y diseño.

La prueba de la densidad se utiliza como un método para medir el grado de compactación o aire contenido. La densidad húmeda en sitio del HCR se determina indirectamente con un calibrador de densidad nuclear, cono de arena y método de globo, estos dos últimos no son adecuados por la dificultad y tiempo requerido para el

Método, dos tipos de densímetros nucleares son disponibles comercialmente: el de sonda simple y el de sonda doble.

Indiferentemente cual sea el densímetro a utilizar el ensayo toma alrededor de 5 a 15 minutos, dependiendo del número de posiciones que se desee ensayar.

Ambos densímetros tienen limitaciones en cuanto por su diseño y geometría. El densímetro de sonda simple puede realizar una lectura a una profundidad de 300mm tomando el promedio de las densidades

De la capa desde la parte inferior donde llega la sonda hasta la superficie

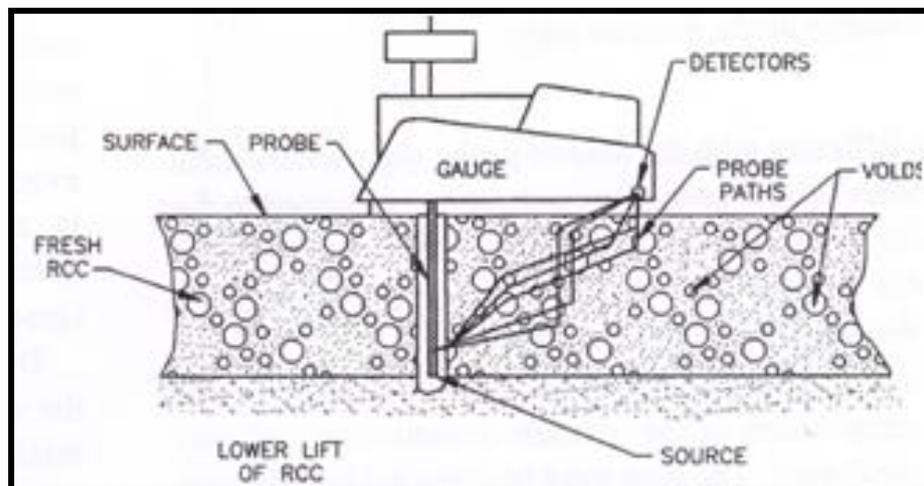


Ilustración 9. 5 Densímetro nuclear, Tomado de ACI 2011-207.5R.

La densidad medida por densímetros nucleares se ve afectado por la composición química de los constituyentes de hormigón y puede no ser la densidad verdadera. El medidor debe ser corregido por medio del error de Composición química, que se obtiene mediante la determinación de la densidad verdadera del HCR fresco compactado a diferentes densidades en un contenedor rígido calibrado de acuerdo con ASTM C 1040 o con otra norma aceptable, y la comparación de que la densidad indicada por el medidor.

La prueba de densidad se deberá realizar con el equipo propuesto lo antes posible, teniendo en cuenta la seguridad para no interferir con otras actividades de colocación.

9.4.3. Pruebas de Contenido de Agua y Humedad.

El contenido de humedad o agua es importante por varias razones:

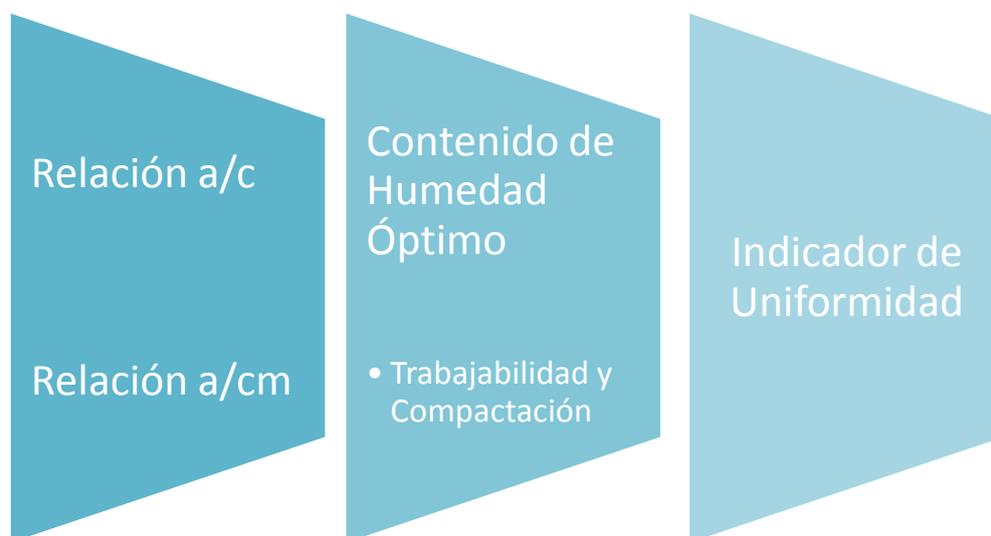


Ilustración 9. 6 Grafico de Razones del Contenido de Humedad.

Algunos de los métodos de prueba de humedad son:

La calidad del agua debe cumplir con los mismos requerimientos establecidos para hormigón convencional. Como regla se puede decir que son aptas para realizar el mezclado y curado del hormigón las aguas potables. Aguas que no sean potables se las consideran bajo el término “agua dudosa” por lo que deberán cumplir con las siguientes condiciones para ser consideradas como aptas.

1- La resistencia a la compresión simple a los 7 días en cubos de mortero elaborados con agua dudosa no deberán ser menor que el 90% de la resistencia conseguida por cubos elaborado con agua potable, este ensayo está basado bajo la norma INEN 488

(Cemento Hidráulico, Determinación de la Resistencia a la Compresión de Mortero en Cubos de 50mm de Arista), Norma ASTM C109, AASHTO T106.

2- El tiempo de fraguado inicial no debe adelantarse en más de 60 minutos ni retardarse en más de 90 minutos, respecto del tiempo que se obtiene con el agua aceptada. Este ensayo está basado bajo la norma INEN 158 (Cemento Hidráulico, Determinación del Tiempo de Fraguado Método de Vicat), Norma ASTM C191, AASHTO T131.

3- Otra manera de aceptación de agua dudosa es mediante valores límites obtenidos de resultados de un análisis químico. En la normativa vigente a nivel mundial, para el proyecto y ejecución de obras de hormigón en masa y armado, se especifica rechazar todas las aguas que contengan hidratos de carbono, un PH menor a 5 o que no cumpla con los límites indicados a continuación:

Tabla 9. 2 Calidad de Aceptación del Agua, Tomado de Norma NTE INEN 1 855-1 : 2001.

Concentración en Agua de Mezcla	Limites (Máximos)
Cloruros como Cl	
Para Hormigón Pretensado	500 mg/l
Para Hormigón Armado o con elementos metálicos embebidos	1000 mg/l
Sulfatos como SO₄	3000 mg/l
Álcalis , como (Na₂O + 0,658K₂O)	600 mg/l
Total de sólidos (por masa)	50000 mg/l

9.4.4. Temperatura.



Ilustración 9. 7 Dispositivo para Medir la Temperatura en el HCR Fresco, Tomado de la Presentación HCR Evolución y Nuevos Horizontes - Ing. Miguel A. Golik.

La temperatura del HCR depende de la temperatura con la cual llegan los materiales principales a la planta y el promedio de las condiciones ambientales. Para el caso de presas, la temperatura es un problema latente

Durante la fabricación del hormigón debido a la gran cantidad que se debe producir en la que se deben controlar la hidratación del cemento, pero en el caso de HCR por el poco contenido de cemento utilizando la generación de calor de hidratación es muy baja.

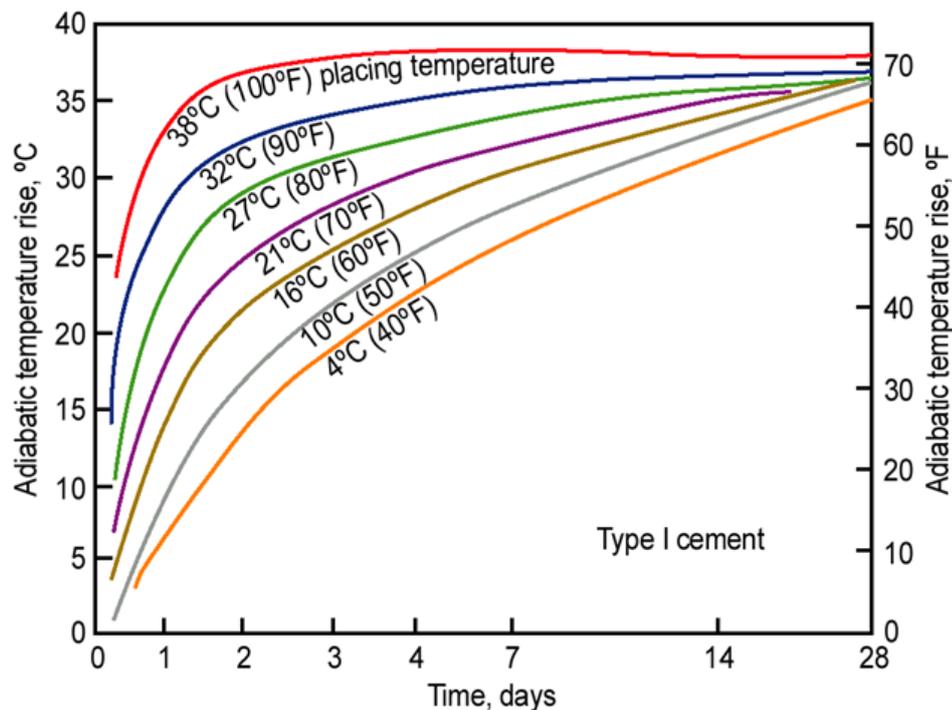


Ilustración 9. 8 Gráfico de las Temperaturas en Producción de Grandes Masas, Tomado de The Portland Cement Association.

Las medidas de control de la temperatura se llevan a cabo para evitar las fisuras en las superficies del HCR para el cual se debe mantener una temperatura adecuado durante todo el proceso.

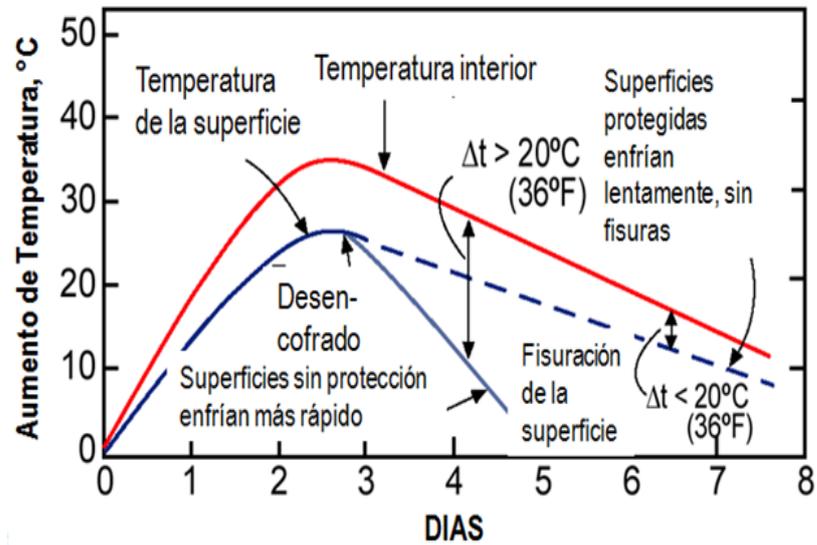


Ilustración 9. 9 Gráfico que Indica la Máxima Diferencia de Temperatura, Tomado de The Portland Cement Association.

9.4.5. Especímenes de Ensayo.

Se utilizan cilindros de 150 milímetros de diámetro por 300 milímetros de alto, deberá efectuarse utilizando procedimientos adecuados para la consistencia de la mezcla, el tamaño máximo de los agregados, y el número de muestras que se hizo antes la mezcla comienza a secarse.



Ilustración 9. 10 Cilindros de HCR para Realizar Pruebas.

9.4.6. Prueba de Resistencia.

Debido a la rápida tasa de producción HCR y el hecho de que la mayoría de los proyectos utilizan las edades de diseño de 90 días a 1 año, las pruebas de resistencia HCR tienen un uso limitado como herramienta de control de calidad.

9.4.7. Gráficos de Control.

Los gráficos de control son uno de los métodos más eficaces de seguimiento, visualización e interpretación de los datos de prueba de calidad de control, y su uso debe ser requerido por las especificaciones del proyecto. Los gráficos de control deben identificar las tendencias representativas.

9.5. ACTIVIDADES DESPUÉS DE LA COLOCACIÓN DEL HCR.

El control de calidad después de la colocación debe incluir inspecciones periódicas para asegurarse de que el HCR está siendo curado continuamente humedecido y protegido contra daños.

9.5.1. Curado de HCR.

Registros de control de calidad deben mantenerse documentados, lo que incluye el tiempo y el grado de Curado.

Se deben tomar medidas para corregir las deficiencias cuando sean observadas. El curado se puede realizar mediante un curador químico, con el roció de una emulsión asfáltica, con una capa plástica o mediante el método tradicional con roció agua. La superficie debe ser mantenida en las mejores condiciones o por lo menos que permanezca con la humedad óptima. En proyectos grandes de HCR el curado del hormigón durante la construcción ha sido logrado mediante camiones rociadores y para proyectos de todos los tamaños con mangueras de mano. Los camiones deben ser equipados con rociadores de boquillas finas lo que proporciona una niebla de agua que no lava o erosiona la superficie.

9.5.2. Protección del HCR.

Personal de control de calidad debe asegurar que el contratista ha protegido la superficie del HCR de climas fríos, secos o precipitación inesperada. El HCR deberá ser cubierto rápidamente con lonas de plástico o aislante para reducir la evaporación o protegerlo de la lluvia y el polvo. Si la lluvia es inminente o preliminar, los inspectores deben asegurarse de que el contratista termine la compactación del HCR sin compactar y cubrir inmediatamente la superficie del HCR para evitar daños. La superficie debe ser protegida de temperaturas extremas hasta que consiga la resistencia suficiente. La construcción de HCR

Debe detenerse cuando las lluvias excedan 2 – 3 mm/hr “**ACI 2011 sección 207.5R**”.

9.5.3. Juntas.

Las juntas de contracción a través de la masa de HCR son formadas ya sea por placa reforzada de grieta inducida durante el extendido del hormigón o mediante la inserción del plato en el hormigón no compactado.

Estas instalaciones presentan la siguiente secuencia:

- a) Extendido del HCR en la zona donde se realizara la junta
- b) Insertar verticalmente la placa para la formación de la junta mediante un esfuerzo externo para mantener la placa vertical
- c) Extender HCR en la parte opuesta a la placa mediante la mano de obra entorno a la misma.

CAPITULO 10

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Luego de haber efectuado la parte analítica e investigativa como lo son la elaboración de ensayos, análisis de resultados, realización de correlaciones y correcciones en los diseños, se procede a establecer cada una de las conclusiones con la finalidad de interpretar los resultados que se han obtenido y así mismo, elaborar las recomendaciones que servirán para la ejecución de un futuro proyecto relacionado con HCR.

10.1. CONCLUSIONES.

1. Mezclas de Hormigón Compactado con Rodillo elaboradas con cemento HE presentan mayores valores en cuanto a su resistencia debido al contenido de puzolana incorporado en el cemento, sus propiedades de resistencia a Compresión Simple, a Tracción por Compresión Diametral y Módulo de Elasticidad Secante resultaron ser mayores al de otras mezclas elaboradas con cemento GU y MH. Sin embargo cilindros fabricados con MH muestran mayor ductilidad, lo cual es importante para presas de gravedad, ya que el diseño se encuentra regido principalmente por durabilidad antes que por resistencia. Se podrían utilizar las dosificaciones de GU con 95 kg de cemento o de MH con 105 kg de cemento debido que ambas cumplen con la resistencia especificada a los 90 días y tienen una mayor ductilidad.
2. Para una correcta obtención de las propiedades mecánicas del HCR es necesario entender que durante el proceso de elaboración de probeta se debe comenzar primero por humedecer los moldes, luego llenarlos en 3 capas de igual volumen y aplicar una energía de compactación suficiente en cada una de ellas, teniendo en cuenta que se debe acabar la superficie de la ultima capa con una placa de madera de tal manera que se eliminen todas sus irregularidades.

3. La caracterización de agregados es primordial para la fabricación del hormigón compactado con rodillo debido a que son los elementos principales que conforman al mismo y que le darán las propiedades requeridas para el proyecto. Los materiales pétreos que se escogieron para la Presa Manduriacu poseen características admisibles, además cumplen con todas las especificaciones y rangos de aceptabilidad, comprobadas a través de ensayos de laboratorio. Estos ensayos fueron ejecutados en los laboratorios de las instalaciones del centro técnico del hormigón de la empresa Holcim siguiendo las normas ASTM.
4. La formación de juntas en el proceso constructivo es inevitable, por tal motivo es necesario realizar de la mejor manera posible el tratamiento de juntas, por lo que el tiempo permisible no debe exceder los 45 minutos, comprendido desde el inicio del mezclado hasta la compactación final, pudiéndose extender este tiempo para climas fríos y reducirse en climas caluroso.
5. Para un rodillo vibratorio de 10 toneladas el número mínimo de pasadas se encuentra en el rango de 4 – 6, lo que garantizara una correcta compactación y densidad. Rodillos con alta amplitud y baja frecuencia son ideales para mezclas de HCR con baja trabajabilidad y delgados espesores de capas, en cambio Rodillos de baja amplitud y frecuencia alta son los mejores para mezclas con mejor trabajabilidad y espesores de capas más fino.

6. Existe una tendencia lineal entre la resistencia a la compresión simple con la resistencia a tracción por compresión diametral para los hormigones elaborados. Para edades tempranas los valores de resistencia en el hormigón aumentan drásticamente pero a medida que estas edades son mayores se puede observar una tendencia asintótica es decir que el incremento tiende a ser pequeño y se hace constante.
7. Para probetas con valores de resistencia altos, se determinó que la velocidad de pulso ultrasónico también lo era, lo que demuestra que a menor contenido de aire existente, menor espacios vacíos con lo que la matriz interna del hormigón es más densa proporcionándole una mejor resistencia mecánica.
8. Cuando la mezcla de HCR sea elaborada deberá verificarse su consistencia y trabajabilidad mediante el aparato Vebe siguiendo la norma ASTM C 1170.
9. Se instalan plantas móviles cerca de la zona de construcción de presas para evitar que al transportar el hormigón este se vea afectado por la temperatura y el movimiento lo cual conlleva a una segregación. Los materiales que cumplieron los requisitos del diseño son llevados a la planta para que la producción de hormigón pueda ser realizada.
10. El control de calidad es una parte fundamental durante la construcción de una Presa para producción de energía. Este control empieza

Desde la selección misma de la fuente de materiales, hasta la etapa final que es la aplicación del HCR en obra. Generalmente este control se divide en tres etapas principales que son: Antes de la fabricación, durante la fabricación y durante la aplicación del hormigón. Donde en cada una de las etapas descritas se aplican pruebas a los materiales, para verificar el cumplimiento con los resultados de la caracterización y diseño de mezclas, luego se toman muestras de hormigón fresco para determinar densidades y elaborar probetas que permitan evaluar el desarrollo de la resistencia y otras propiedades mecánicas, de tal manera que se tenga un control constante y se permita garantizar la calidad en la obra.

11. Los criterios de aceptación de los materiales están regidos bajo diferentes normas ,así lo son para caracterizar los agregados, se deben seguir las normas ASTM C33 - 03, C 136 – 06, C117 – 04, C127 -07, C128 – 07a, C131 – 06. Para la calidad del agua se deben seguir las normas ASTM C 109, C191 y lo límites expuestos en la tabla 4.1. , en cuanto al cemento se deben seguir las normas ASTM C150, C1157.

10.2. RECOMENDACIONES.

1. Para realizar diseño de dosificaciones de HCR es preferible partir de una dosificación existente, realizar pruebas preliminares para determinar el contenido de humedad óptimo y de esta manera aplicar los ajustes necesarios para obtener el diseño de la dosificación.
2. Realizar un ensayo de prueba para determinar el número de pasadas necesaria por el rodillo antes de empezar el proceso constructivo de una presa elaborada con HCR para asegurar un porcentaje de compactación idóneo y de esta manera no tener problemas de sobre o sub compactación.
3. Cuando se realice la primera mezcla en la planta móvil de hormigón es recomendable partir de una mezcla húmeda para luego ir ajustando su humedad, ya que si se parte con una mezcla seca esta es propensa a perder drásticamente su humedad, llegando demasiado seca a obra, generando segregación, dificultando su colocación y extensión debido a la pérdida de su trabajabilidad, lo que originara perdida en la resistencia del hormigón y en su densidad.
4. Una vez compactada una capa de HCR se puede pasar el rodillo pero en modo estático ya que en modo vibratorio causaría un daño en la superficie y una sobre compactación de la misma.

5. Para espacios reducidos será necesario el uso de compactadoras pequeñas como placa vibradora, apisonador y compactador simple para asegurar la calidad del HCR en estado terminado.
6. Los ensayos deben ser realizados cumpliendo todas las especificaciones técnicas necesarias, sean estos materiales, equipos y mano de obra. El personal debe contar con toda la capacitación disponible para que los datos obtenidos sean los más precisos y su análisis nos lleve a mejorar el desarrollo del proyecto.
7. Se debe llevar a cabo los controles de los camiones, limpieza y mantenimiento para evitar contaminación entre capas de HCR. La instalación debe ser organizada y llevada a cabo de manera que la fabricación del hormigón sea continua, sin interrupciones que afecten la obra.

BIBLIOGRAFIA.

- Ing. Cristian Marcelo Valarezo Tandazo, Ing. Walter Danilo Lozano Lucero. 2012 . Estudio de Materiales para Determinación de Mezclas de Hormigón Compactado con Rodillo.
- Ing. Hugo León Arena Lozano. Presentación: Caracterización de Agregados.
- Piedras Naturales. 2010 . www.slidehare.net
- María Isabel Chiriboga Fernández y José Luis Pillasagua Carrera. Rendimiento de Equipo Pesado en la Explotación de una Cantera de Cielo Abierto Caso Práctico Cantera Borcons.
- Informe Proyecto Manduriacu. 2012 . www.energia.gob.ec
- Ing. Francisco Rodríguez. Presentación: Errores, Aciertos, Contrariedades, Conquistas y Necesidades de Mantener la Calidad.
- Maquinaria – Construcción. www.viarural.com
- Bernardo Martínez. 2010. Tecnología y Conceptos en Concreto Compactado con Rodillo.
- Ph.D. Luz Elene Santaella Valencia. Comentarios sobre el Concreto Compactado con Rodillo. Facultad de Ingeniería de la Universidad Militar Nueva Granada.
- Ph.D. Luz Elena Santaella Valencia, Msc. Luz Yolanda Morales. Conceptos Básicos en Presa.

- Ing. Juan Arias Formoso, Ing. Ignacio Arguedas G. Diseño y Construcción de la Presa en Concreto Compactado con Rodillo (RCC) del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís.
- Francisco Romero, Antonio Sandoval . Noviembre 2009 . La Presa de la Breña II.
- Luis Uribe. Características del Diseño y Construcción de la Presa Ralco en Chile.
- Revista Cemento Año 5, N° 23 . Presa de HCR en el Aprovechamiento del Rio Bio Bio.
- Código ACI Internacional Sección 207.5R-99 . 2011 . Roller-Compacted Mass Concrete.
- INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACION (INEN) Normas técnicas ecuatorianas NTE INEN hormigón, áridos y morteros. - 2011.
- SCHRADER Dr. ERNEST SpecGrad.doc [Informe]. - Guayaquil (Centro técnico del Hormigón), 2010.
- ASTM C 33 – 03 Standard Specifications for Concrete Aggregates.
- ASTM C 136 – 06 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.
- ASTM C 117 – 04 Standard Test Method for Materials Finer than 75- μm (N. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing.
- ASTM C 127 – 07 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregates.

- ASTM C 128 – 07a Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregates.
- ASTM C 131 – 06 Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.
- ASTM C 39 – 01 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- ASTM C617 - 98(2003) Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens.
- ASTM C496 / C496M - 04e1 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- ASTM C 469 – 94 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson`s Ratio of Concrete in Compression.