

**Universidad de Costa Rica**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Escuela de Ingeniería Civil**

**Curvas características de resistencia a compresión simple en concreto  
usando distintos tipos de cementos modificados**

**Trabajo Final de Graduación**

Para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

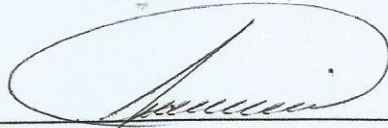
**Jorge Andrés Delgado Castro**

Directora de Proyecto de Graduación:

**Flor Muñoz Umaña, M.Ing., I.C.**

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

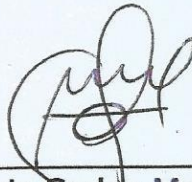
## Miembros del Comité Asesor y sustentante



Directora: Ing. Flor de María Muñoz Umaña. M.Ing., I.C.



Asesor: Ing. Einer Rodríguez Rojas. PMP. MAP.



Asesor: Ing. Luis Carlos Meseguer Quesada. MAE.



Estudiante: Jorge Andrés Delgado Castro

**Fecha:** 2018, Junio, 26

El suscrito, Jorge Andrés Delgado Castro, cédula 1-1556-0218, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné B32237, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación **Curvas características de resistencia a compresión simple en concreto usando distintos tipos de cementos modificados comercializados en Costa Rica**, bajo la Dirección de la Ingeniería Flor de María Muñoz Umaña, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.



**Nota:** De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada del 3 de mayo del 2010): "no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales". Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

## **Agradecimiento**

En primera instancia me gustaría agradecer a mi familia, quién me apoyó de manera incondicional durante todos mis estudios, confiando en mi capacidad, guiándome con sus consejos y permitiéndome culminar con una de mis metas.

A la Ing. Flor Muñoz Umaña, directora del proyecto, por darme la oportunidad de desarrollar el proyecto bajo su guía, ofreciendo su orientación y conocimientos a lo largo del proyecto, así como su excelente trato al atender cada una de las inquietudes que se tuvieron. Al Ing. Einer Rodríguez Rojas, quién bajo un trato cordial en todo momento se mantuvo al tanto del desarrollo del trabajo, facilitando significativamente la ejecución de los diferentes ensayos y cuyo aporte permitió alcanzar satisfactoriamente los objetivos del trabajo. Y al Ing. Luis Carlos Meseguer Quesada, por su asesoramiento y apoyo durante todo el proceso.

Gracias al personal técnico del LanammeUCR, especialmente a Avisai Álvarez, María Fernanda Orozco, Cristian Martínez y Marcos Sandoval; quienes por medio de sus consejos, colaboración, disposición y seguimiento permitieron completar de manera expedita todos los ensayos realizados. Gracias por su atención y amabilidad durante mi estadía en las instalaciones del LanammeUCR.

Deseo también agradecer al estudiante Luis Felipe Hernández Mora, quién se mantuvo paso a paso con cada una de las actividades del proyecto, ofreciéndome su ayuda desinteresada, trato amable, apoyo y consejo. Ha sido, sin duda alguna, un privilegio el haber realizado nuestros proyectos de graduación de manera simultánea.

Finalmente agradezco Al Ing. Andrés Haug, de Agregados Guápiles, y a la Ing. Jessica Arley Benamburg, de Agregados Cerro Minas; quienes además de facilitar el material necesario para el desarrollo del proyecto, tuvieron la disposición de donarlo para la realización de esta investigación.

# Índice

<b>Capítulo 1. Introducción</b> .....	1
1.1 Justificación.....	1
1.1.1 El problema específico .....	1
1.1.2 Importancia.....	2
1.2 Antecedentes teóricos y prácticos del problema .....	3
1.3 Objetivos .....	7
1.3.1 Objetivo general .....	7
1.3.2 Objetivos específicos .....	7
1.4 Hipótesis.....	7
1.5 Delimitación del problema.....	8
1.5.1 Alcance .....	8
1.5.2 Limitaciones .....	10
1.6 Metodología .....	12
El procedimiento seguido para el análisis estadístico fue el siguiente: .....	24
<b>Capítulo 2. Marco teórico</b> .....	27
2.1 Fundamentos del concreto .....	27
2.1.1 Cemento .....	27
2.1.2 Agregado .....	37
2.1.3 Agua.....	46
2.1.4 Materiales cementantes suplementarios .....	48
2.1.5 Aditivos.....	50
2.2 Factores que inciden en la calidad del concreto .....	50
2.2.1 Concreto fresco .....	51
2.2.2 Concreto endurecido .....	56
2.3 Fundamentos de estadística .....	61

2.3.1	Parámetros y estadísticos.....	62
2.3.2	Probabilidad y distribuciones .....	63
2.3.3	Pruebas de hipótesis .....	66
2.3.4	Correlación y regresión .....	71
2.3.5	Evaluación de resultados de pruebas de resistencia en el concreto .....	73
<b>Capítulo 3. Presentación y análisis de resultados .....</b>		<b>75</b>
3.1	Caracterización de materiales.....	75
3.1.1	Agregados.....	75
3.1.2	Cementos.....	83
3.2	Análisis estadístico .....	90
3.2.1	Prueba de normalidad .....	90
3.2.2	Evaluación resultados de resistencia .....	92
3.2.3	Prueba ANOVA.....	92
3.2.4	Prueba Tukey .....	96
3.3	Resistencia a la compresión en concretos elaborados.....	102
3.3.1	Resistencia a la compresión en cemento hidráulico modificado mixto clase A con escoria de alto horno y caliza de clase de resistencia 28: MM/A (E-C) – 28.....	103
3.3.2	Resistencia a la compresión en cemento hidráulico modificado mixto clase B con puzolana y caliza de clase de resistencia 28: MM/B (P-C) – 28 .....	109
3.3.3	Resistencia a la compresión en cemento hidráulico modificado con puzolana clase A de alta resistencia inicial: MP A – AR .....	115
3.3.4	Comparación entre mezclas de concreto elaboradas .....	120
3.4	Análisis de resultados .....	133
<b>Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones.....</b>		<b>145</b>
4.1	Conclusiones .....	145
4.2	Recomendaciones .....	148
<b>Referencias bibliográficas.....</b>		<b>151</b>

<b>Apéndices y anexos</b> .....	157
Apéndice A. Descripción del trabajo experimental .....	157
Ensayos de caracterización agregados .....	157
Ensayos de caracterización cementos .....	174
Diseño de mezcla .....	188
Ensayos de caracterización mezclas de concreto.....	193
Apéndice B. Resultados experimentales .....	211
Ensayos agregado fino de río.....	211
Ensayos agregado grueso de río .....	224
Ensayos agregado fino de tajo.....	237
Ensayos agregado grueso de tajo .....	250
Ensayos Cemento MM/A (E-C) – 28.....	263
Ensayos Cemento MM/B (P-C) – 28 .....	269
Ensayos Cemento MP A – AR.....	275
Ensayos Mezcla N° 1: Cemento MM/A (E-C) – 28 con agregado de río .....	281
Ensayos Mezcla N° 2: Cemento MM/A (E-C) – 28 con agregado de tajo .....	284
Ensayos Mezcla N° 3: Cemento MM/B (P-C) – 28 con agregado de río .....	287
Ensayos Mezcla N° 4: Cemento MM/B (P-C) – 28 con agregado de tajo .....	290
Ensayos Mezcla N° 5: Cemento MP AR – A con agregado de río.....	293
Ensayos Mezcla N° 6: Cemento MP AR – A con agregado de tajo .....	296
Apéndice C. Diseño de mezcla .....	299
Mezclas de concreto con agregado de río.....	299
Mezcla de concreto con agregado de tajo .....	300
Apéndice D. Equivalencias normas ASTM - INTECO.....	301

# Índice de figuras

## Capítulo 1. Introducción

Figura 1.1 Etapa I del esquema seguido para desarrollar el proyecto .....	13
Figura 1.2 Primera sección de la Etapa II del esquema seguido para desarrollar el proyecto	14
Figura 1.3 Segunda sección de la Etapa II del esquema seguido para desarrollar el proyecto .....	15
Figura 1.4 Etapa III del esquema seguido para desarrollar el proyecto .....	16
Figura 1.5 Etapa IV del esquema seguido para desarrollar el proyecto .....	16

## Capítulo 2. Marco teórico

Figura 2.1 Ejemplo de muestra de cemento utilizado en el proyecto.....	29
Figura 2.2 Aguja de Vicat utilizada para determinación del tiempo de fraguado .....	31
Figura 2.3 Ejemplo de agregados utilizados en el proyecto.....	39
Figura 2.4 Ejemplo de concreto fresco elaborado en el proyecto .....	51
Figura 2.5 Ejemplo de concreto endurecido elaborado en el proyecto .....	56
Figura 2.6 Desarrollo de resistencia del concreto para diferentes condiciones de curado .....	58
Figura 2.7 Representación gráfica de distribución normal.....	65

## Capítulo 3. Presentación y análisis de resultados

Figura 3.1 Curva granulométrica para el agregado fino de río.....	76
Figura 3.2 Curva granulométrica para el agregado fino de tajo corregido.....	78
Figura 3.3 Curva granulométrica para el agregado grueso de río .....	79
Figura 3.4 Curva granulométrica para el agregado grueso de tajo.....	81
Figura 3.5 Curva de desarrollo de resistencia para el cemento MM/A (E-C) – 28.....	84
Figura 3.6 Curva de desarrollo de resistencia para el cemento MM/B (P-C) – 28 .....	86
Figura 3.7 Curva de desarrollo de resistencia para el cemento MP A – AR.....	88
Figura 3.8 Comparativo de curvas de desarrollo para cementos en estudio .....	89
Figura 3.9 Curva de desarrollo de resistencia para concreto elaborado con cemento MM/A (E-C) - 28 y agregado de río .....	104
Figura 3.10 Curva de desarrollo de resistencia para concreto elaborado con cemento MM/A (E-C) - 28 y agregado de tajo .....	107



Figura 3.11 Curva de desarrollo de resistencia para concreto elaborado con cemento MM/B (P-C) - 28 y agregado de río .....	110
Figura 3.12 Curva de desarrollo de resistencia para concreto elaborado con cemento MM/B (P-C) - 28 y agregado de tajo .....	113
Figura 3.13 Curva de desarrollo de resistencia para concreto elaborado con cemento MP A – AR y agregado de río .....	116
Figura 3.14 Curva de desarrollo de resistencia para concreto elaborado con cemento MP A – AR y agregado de tajo.....	119
Figura 3.15 Comportamiento del desarrollo de resistencia de mezclas con cemento MM/A (E-C) – 28 .....	121
Figura 3.16 Desarrollo de la resistencia con respecto a los resultados a 28 días para cemento MM/A (E-C) - 28 .....	122
Figura 3.17 Comportamiento del desarrollo de resistencia para cemento MM/B (P-C) – 28	123
Figura 3.18 Desarrollo de la resistencia con respecto a los resultados a 28 días para cemento MM/B (P-C) - 28 .....	124
Figura 3.19 Comportamiento del desarrollo de resistencia para cemento MP A - AR.....	125
Figura 3.20 Desarrollo de la resistencia con respecto a los resultados a 28 días para cemento MP A - AR .....	126
Figura 3.21 Comportamiento del desarrollo de resistencia para concreto con agregado de río .....	127
Figura 3.22 Desarrollo de la resistencia con respecto a los resultados a 28 días para concreto con agregado de río.....	128
Figura 3.23 Comportamiento del desarrollo de resistencia para concreto con agregado de tajo .....	129
Figura 3.24 Desarrollo de la resistencia con respecto a los resultados a 28 días para concreto con agregado de tajo .....	130
Figura 3.25 Comportamiento del desarrollo de resistencia para mezclas de concreto elaboradas.....	131
Figura 3.26 Desarrollo de la resistencia con respecto a los resultados a 28 días para mezclas de concreto elaboradas .....	132

## **Apéndice A. Descripción del trabajo experimental**

Figura A.1 Almacenamiento de agregados en laboratorio .....	157
Figura A.2 Equipo utilizado para reducción de muestras de agregados .....	158
Figura A.3 Nivelación de superficie de muestras ensayo de densidad masiva (agregado fino a la izquierda, agregado grueso a la derecha) .....	160
Figura A.4 Ensayo de impurezas orgánicas en agregado fino .....	161
Figura A.5 Lavado de material más fino que la malla No. 200 (agregado fino a la izquierda, agregado grueso a la derecha).....	162
Figura A.6 Condición saturada superficie seca en agregado grueso .....	164
Figura A.7 Picnómetro conteniendo muestra de agregado fino en condición saturada .....	167
Figura A.8 Máquina de Los Ángeles utilizada en el desarrollo del proyecto .....	169
Figura A.9 Tamizadora utilizada para análisis granulométrico de agregado fino .....	171
Figura A.10 Partículas no fracturadas (izquierda) y partículas fracturadas (derecha) .....	173
Figura A.11 Agitador mecánico utilizado para corrección de agregado de tajo .....	174
Figura A.12 Almacenamiento de cemento en laboratorio .....	175
Figura A.13 Tubo de muestra de cemento .....	175
Figura A.14 Orden de compactación en moldeo de especímenes cúbicos de mortero .....	178
Figura A.15 Aplicación de carga hasta falla en cubo de mortero.....	180
Figura A.16 Consistencia normal en cemento ensayado .....	182
Figura A.17 Equipo empleado para ensayo de densidad del cemento .....	183
Figura A.18 Acabado en superficie de cemento ensayado que alcanzó la fragua final .....	186
Figura A.19 Muestra de cemento antes (izquierda) y después (derecha) de ensayo de finura .....	187
Figura A.20 Medición pH de cemento ensayado .....	188
Figura A.21 Ejemplo de cilindros de concreto cubiertos después de moldeo para una mezcla de concreto elaborada.....	195
Figura A.22 Medición pH del agua .....	195
Figura A.23 Ejemplo de espécimen acabado en ensayo de densidad del concreto fresco ...	198
Figura A.24 Ejemplo de prueba de revenimiento para una mezcla de concreto elaborada ..	200
Figura A.25 Ejemplo medición del contenido de aire para una mezcla de concreto elaborada .....	202
Figura A.26 Ejemplo de medición de temperatura para mezcla de concreto elaborada .....	202

Figura A.27 Máquina pulidora de cilindros utilizada en el desarrollo del proyecto .....	203
Figura A.28 Ejemplo de retenedor y almohadilla de neopreno utilizados .....	204
Figura A.29 Ejemplo de alineación de cilindro de concreto en máquina de ensayo a la compresión .....	206
Figura A.30 Esquema de patrones típicos de fractura en cilindros de concreto.....	207
Figura A.31 Sierra estacionaria utilizada en el desarrollo del proyecto.....	209
Figura A.32 Ejemplo de ensayo en ejecución de corte rotativo en espécimen de concreto .	210

# Índice de cuadros

## Capítulo 1. Introducción

Cuadro 1.1 Tipos de cemento que se comercializan en Costa Rica .....	1
Cuadro 1.2 Elementos constituyentes de las mezclas de concreto utilizados en la investigación .....	9
Cuadro 1.3 Ensayos practicados en capacitación para desarrollo del proyecto .....	18

## Capítulo 2. Marco Teórico

Cuadro 2.1 Requisitos físicos y químicos para cementos comercializados en Costa Rica .....	36
Cuadro 2.2 Requisitos de resistencia a la compresión según clase de resistencia conforme al método ASTM C109 para cementos comercializados en Costa Rica .....	37
Cuadro 2.3 Clasificación del agregado fino según el módulo de finura .....	40
Cuadro 2.4 Decisiones en pruebas de hipótesis .....	67
Cuadro 2.5 Normas de control para mezclas de concreto .....	74

## Capítulo 3. Presentación y análisis de resultados

Cuadro 3.1 Análisis granulométrico agregado fino de río procedente de Guápiles .....	75
Cuadro 3.2 Descripción y parámetros del agregado fino de río .....	76
Cuadro 3.3 Análisis granulométrico agregado fino de tajo procedente de Cerro Minas, sin corrección .....	77
Cuadro 3.4 Análisis granulométrico agregado fino de tajo procedente de Cerro Minas, con corrección .....	77
Cuadro 3.5 Descripción y parámetros del agregado fino de tajo .....	78
Cuadro 3.6 Análisis granulométrico agregado grueso de río con especificaciones ASTM C33 para un tamaño nominal de 19 mm a 4.75 mm .....	79
Cuadro 3.7 Descripción y parámetros del agregado grueso de río .....	80
Cuadro 3.8 Análisis granulométrico agregado grueso de tajo con especificaciones ASTM C33 para un tamaño nominal de 12.5 mm a 4.75 mm .....	81
Cuadro 3.9 Descripción y parámetros del agregado grueso de tajo .....	82
Cuadro 3.10 Propiedades cemento MM/A (E-C) - 28 .....	83
Cuadro 3.11 Resistencia a la compresión y parámetros cemento MM/A (E-C) - 28 .....	83
Cuadro 3.12 Propiedades cemento MM/B (P-C) - 28 .....	85

Cuadro 3.13 Resistencia a la compresión y parámetros cemento MM/B (P-C) - 28 .....	85
Cuadro 3.14 Propiedades cemento MP A - AR.....	87
Cuadro 3.15 Resistencia a la compresión y parámetros cemento MP A - AR .....	87
Cuadro 3.16 Comparativo de desarrollo de resistencia para los tres tipos de cementos ensayados.....	89
Cuadro 3.17 Clasificación de mezclas de concretos elaboradas .....	90
Cuadro 3.18 Resultados prueba de normalidad Kolmogorov - Smirnov para las mezclas de concreto elaboradas.....	91
Cuadro 3.19 Resultados evaluación de estándares de control según norma ACI 214R-02 para las mezclas de concreto elaboradas .....	92
Cuadro 3.20 Resultados análisis ANOVA a 3 días.....	93
Cuadro 3.21 Resultados análisis ANOVA a 7 días.....	94
Cuadro 3.22 Resultados análisis ANOVA a 14 días .....	95
Cuadro 3.23 Resultados análisis ANOVA a 28 días .....	95
Cuadro 3.24 Resultados análisis ANOVA a 56 días .....	96
Cuadro 3.25 Resultados prueba de Tukey para promedios de resistencia a 3 días.....	97
Cuadro 3.26 Resultados prueba de Tukey para promedios de resistencia ganada a 3 días ...	97
Cuadro 3.27 Resultados prueba de Tukey para promedios de resistencia a 7 días.....	98
Cuadro 3.28 Resultados prueba de Tukey para promedios de resistencia ganada a 7 días ...	99
Cuadro 3.29 Resultados prueba de Tukey para promedios de resistencia a 28 días.....	100
Cuadro 3.30 Resultados prueba de Tukey para promedios de resistencia a 56 días.....	101
Cuadro 3.31 Resultados prueba de Tukey para promedios de resistencia ganada a 56 días	102
Cuadro 3.32 Propiedades mezcla de concreto elaborada con cemento MM/A (E-C) – 28 y agregado de río.....	103
Cuadro 3.33 Resistencia a la compresión promedio de los cilindros de concreto elaborados con cemento MM/A (E-C) - 28 y agregado de río.....	104
Cuadro 3.34 Comparación entre la resistencia a la compresión promedio y su proyección para mezcla de concreto elaborada con cemento MM/A (E-C) - 28 y agregado de río .....	105
Cuadro 3.35 Propiedades mezcla de concreto elaborada con cemento MM/A (E-C) – 28 y agregado de tajo .....	106
Cuadro 3.36 Resistencia a la compresión promedio de los cilindros de concreto elaborados con cemento MM/A (E-C) - 28 y agregado de tajo .....	107

Cuadro 3.37 Comparación entre la resistencia a la compresión promedio y su proyección para mezcla de concreto elaborada con cemento MM/A (E-C) - 28 y agregado de tajo .....	108
Cuadro 3.38 Propiedades mezcla de concreto elaborada con cemento MM/B (P-C) – 28 y agregado de río .....	109
Cuadro 3.39 Resistencia a la compresión promedio de los cilindros de concreto elaborados con cemento MM/B (P-C) - 28 y agregado de río.....	110
Cuadro 3.40 Comparación entre la resistencia a la compresión promedio y su proyección para mezcla de concreto elaborada con cemento MM/B (P-C) - 28 y agregado de río .....	111
Cuadro 3.41 Propiedades mezcla de concreto elaborada con cemento MM/B (P-C) – 28 y agregado de tajo .....	112
Cuadro 3.42 Resistencia a la compresión promedio de los cilindros de concreto elaborados con cemento MM/B (P-C) - 28 y agregado de tajo .....	113
Cuadro 3.43 Comparación entre la resistencia a la compresión promedio y su proyección para mezcla de concreto elaborada con cemento MM/B (P-C) - 28 y agregado de tajo .....	114
Cuadro 3.44 Propiedades mezcla de concreto elaborada con cemento MP A – AR y agregado de río .....	115
Cuadro 3.45 Resistencia a la compresión promedio de los cilindros de concreto elaborados con cemento MP A – AR y agregado de río .....	116
Cuadro 3.46 Comparación entre la resistencia a la compresión promedio y su proyección para mezcla de concreto elaborada con cemento MP A – AR y agregado de río .....	117
Cuadro 3.47 Propiedades mezcla de concreto elaborada con cemento MP A – AR y agregado de tajo.....	118
Cuadro 3.48 Resistencia a la compresión promedio de los cilindros de concreto elaborados con cemento MP A – AR y agregado de tajo .....	119
Cuadro 3.49 Comparación entre la resistencia a la compresión promedio y su proyección para mezcla de concreto elaborada con cemento MP A – AR y agregado de tajo.....	120

## **Apéndice A. Descripción del trabajo experimental**

Cuadro A.1 Graduaciones de muestras para prueba de abrasión de agregado grueso en Máquina de los Ángeles.....	168
Cuadro A.2 Carga abrasiva a utilizar por tipo de graduación para prueba de abrasión de agregado grueso en Máquina de los Ángeles .....	169

Cuadro A.3 Tolerancia permisible por edad de falla en especímenes cúbicos de mortero ...	179
Cuadro A.4 Proporciones por peso seco (masa) de mezcla de concreto con agregado de río .....	192
Cuadro A.5 Cantidad de material requerido por batida de concreto con agregado de río....	193
Cuadro A.6 Tolerancia permisible por edad de falla en especímenes cilíndricos de concreto	205

Delgado Castro, Jorge Andrés

Curvas características de resistencia a compresión simple en concreto usando distintos tipos de cementos modificados

Proyecto Final de Graduación – Ingeniería Civil – San José, C.R.

J. A. Delgado C., 2018

xiv, 156, [155]h, ils.col. – 62 refs.

## **RESUMEN**

Con la promulgación del reglamento RTCR 479:2015 *Materiales de Construcción. Cementos Hidráulicos. Especificaciones*, se amplió la gama de cementos que se podían comercializar en Costa Rica. De este modo, con el nuevo reglamento se establecen tipos de cemento diferentes a los que se comercializaban en el país hasta entonces, por lo que se hace necesario verificar el cumplimiento de las especificaciones y el estudio de su comportamiento cuando se combinan con agregados comercializados en el país, así como generar curvas de desarrollo de resistencia estándar que sirvan de guía a los diseñadores y constructores como herramienta para proyectar la resistencia esperada del concreto a partir de una resistencia conocida a edades más tempranas.

Se utilizaron los cementos MM/A (E-C) – 28, MM/B (P-C) – 28 y MP A – AR, y tanto la caracterización de estos cementos como la de los agregados de río y tajo, se realizó siguiendo normas del Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO) y sus homólogas de la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM). La determinación de la resistencia a la compresión se efectuó por medio de especímenes cilíndricos de 150 mm x 300 mm, siendo fallados a 3 días, 7 días, 28 días y 56 días; siguiendo un diseño de mezcla determinado a partir del ACI 211. A los datos generados se les realizó un análisis estadístico para establecer relaciones y respaldar estadísticamente los resultados obtenidos.

Con este trabajo se logró obtener las curvas de resistencia a la compresión en función del tiempo para cada clase de cemento en combinación con un tipo de agregado de río y con un tipo de agregado de tajo. Además, se pudo constatar que: el cemento comercializado en Costa Rica con un grado de adición de escoria de alto horno es capaz de presentar una ganancia de resistencia significativa en el concreto cuando se continúa con el curado después de los 28 días; las mayores resistencias a la compresión en el concreto se generan al utilizar agregado de río; y generalmente la resistencia del concreto no varía significativamente al emplearse el mismo tipo de cemento para distintos agregados. J.A.D.C.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, CEMENTO MODIFICADO, AGREGADO, CONCRETO

Ing. Flor Muñoz Umaña, M.Ing

Escuela de Ingeniería Civil



# Capítulo 1. Introducción

## 1.1 Justificación

### 1.1.1 El problema específico

En Costa Rica uno de los materiales más utilizados para la construcción de todo tipo de estructura es el concreto debido a sus características de resistencia, versatilidad, durabilidad y economía, siendo el cemento Portland uno de sus principales componentes. El cemento Portland es un producto que al combinarse con agua forma una pasta capaz de ganar resistencia conforme pasa el tiempo como resultado de las reacciones de hidratación que ocurren entre los componentes del cemento y el agua.

En el año 2015 el Presidente de la República de Costa Rica y los Ministros de Economía, Industria y Comercio (MEIC) y de Salud, presentaron vía Decreto Ejecutivo 39414- MEIC-S, el Reglamento RTCR 479:2015 *Materiales de Construcción. Cementos Hidráulicos. Especificaciones*, derogándose el reglamento anterior (RTCR 383:2004). Con esto se abrió el camino a una mayor importación de cementos en Costa Rica (Herrera, 2015). Lo anterior buscando reducir los obstáculos técnicos del comercio internacional del cemento, según afirmó el MEIC en un comunicado al anunciar los cambios (Villatoro, 2015).

Con el nuevo reglamento se establecen tipos de cemento diferentes a los que se comercializaban en el país hasta entonces. De manera general, estos cementos son los que se indican en el Cuadro 1.1.

**Cuadro 1.1** Tipos de cemento que se comercializan en Costa Rica

<b>Tipo</b>	<b>Denominación general</b>
<b>I</b>	Cemento Portland Ordinario (CPO)
<b>ME</b>	Cemento Hidráulico Modificado con Escoria de Alto Horno
<b>MF</b>	Cemento Hidráulico Modificado con Humo de Sílice
<b>MP</b>	Cemento Hidráulico Modificado con Puzolana, Ceniza volante o Esquisto
<b>MC</b>	Cemento Hidráulico Modificado con Caliza
<b>MM</b>	Cemento Hidráulico Modificado Mixto

**Fuente:** Delgado, a partir de RTCR 479:2015

Carvajal (2016) destaca que en Costa Rica no existen trabajos de dominio público sobre el desarrollo de la resistencia en función del tiempo para los diferentes tipos de cementos comercializados, aunque se supone que las empresas fabricantes cuentan con esta información y otras características de sus productos como parte de los procesos de control de calidad internos de cada compañía.

A lo anterior cabe agregar que, en el país se carece de curvas de desarrollo de resistencia para concretos elaborados con estos cementos y agregados comercializados en el país, por lo que hay un vacío importante para los diseñadores y los constructores quienes se ven limitados a extrapolar, de la manera más fiel posible, la resistencia esperada a fechas de diseño usando como base una resistencia a edad temprana, por ejemplo, proyectar la resistencia del concreto a 28 días a partir de una resistencia conocida a 3 días.

Por lo expuesto anteriormente, en el presente trabajo se realizaron ensayos en laboratorio con base en normas de referencia, para obtener el comportamiento de la resistencia a compresión simple en el tiempo para tres tipos de cementos comercializados en Costa Rica cuando se combinan con agregados de tajo y de río.

### **1.1.2 Importancia**

González & Monge (2011), en el documento denominado *Recomendaciones para obtener resultados confiables de resistencia de cilindros de concreto* indican que: "Mundialmente es conocido que en el concreto es uno de los materiales más utilizados para la construcción de obras civiles y Costa Rica no es la excepción" (p.1). Como se mencionó en la **sección anterior** (el problema específico), el cemento es uno de los materiales fundamentales para la elaboración de concreto, ya que es gracias a este que se dan el fraguado y endurecimiento de la mezcla a través de su reacción con el agua para dar lugar a la denominada roca artificial o concreto hidráulico.

Según destaca Chinchilla (2016), en Costa Rica no existen curvas de desarrollo de resistencia contra edad para los distintos tipos de cemento comercializados en Costa Rica, por lo que el Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto (ICCYC) respalda la idea de llevar a cabo

este tipo de investigación, ya que es de interés nacional contar con información real según las condiciones presentes en el país.

Siendo el cemento un material de tan alta relevancia para la construcción de obras civiles, la inserción de nuevos cementos conduce a la necesidad de verificar el cumplimiento de las especificaciones y el estudio de su comportamiento cuando se combinan con agregados comercializados en el país. Por tanto, con este trabajo se aportan curvas características de desarrollo de la resistencia en función del tiempo para concretos elaborados con cementos y agregados comercializados actualmente en Costa Rica, de manera que sirvan de guía a los diseñadores y constructores como herramienta para proyectar la resistencia esperada del concreto a partir de una resistencia conocida a edades más tempranas.

## **1.2 Antecedentes teóricos y prácticos del problema**

Carvajal (2016) destaca que: "En Costa Rica no existen trabajos de dominio público que revelen la resistencia compresiva del cemento de uso general en función de los días de curado. Sin embargo, es de suponer que las empresas fabricantes del producto registran los datos acerca de esta y otras propiedades del cemento mediante procesos de control de calidad" (p.5). Esto condujo a desarrollar su investigación, en la cual determinó la tendencia en el desarrollo de resistencia a la compresión a través del tiempo de curado de los 3 cementos de uso general comercializados en San José, Costa Rica, en ese momento. Carvajal realizó un proceso de muestreo de cementos considerando los depósitos más representativos de los principales cantones de San José, y determinó la resistencia a la compresión mediante el ensayo ASTM C-109: *Método de Ensayo. Determinación de la resistencia a la compresión de mortero de cemento hidráulico usando especímenes cúbicos de 50 mm (2 pulg) de lado* para diferentes edades de curado (1 día, 3 días, 7 días, 14 días, 28 días, 56 días y 112 días). Con esta investigación, Carvajal (2016) demuestra que altos porcentajes de adición en los cementos de uso general ocasionan una disminución de su densidad y de su resistencia a la compresión (inclusive obteniéndose valores menores a los requisitos mínimos según la norma INTE C147), y que el comportamiento de la resistencia a la compresión de los 3 cementos de uso general se pueden predecir mediante ecuaciones logarítmicas.

Chinchilla (2016) realizó un estudio sobre el comportamiento de la resistencia a la compresión del mortero hidráulico a edades de 7 días, 14 días, 28 días, 56 días y 90 días, utilizando cemento costarricense de tipo UG (dos marcas), UG-AR (dos marcas) y MP (una marca) con dos tipos de agregado fino (río y tajo). Para los ensayos empleó una dosificación de mortero hidráulico 1:3 con un flujo entre 105 y 115, bajo la norma ASTM C-109. Así Chinchilla (2016) logró obtener las curvas de desarrollo de resistencia para 5 cementos costarricenses tipo UG, UG-AR y MP, demostrando que las arenas de tajo presentan mayores porcentajes de incremento de la resistencia a edades tempranas en comparación con la arena río, la cual contradictoriamente tiene mayores porcentajes de incremento de resistencia en edades avanzadas; los morteros más densamente compactos presentan mayores resistencias que los morteros húmedos, y que los tres tipos de cementos utilizados para la investigación presentan un desarrollo de la resistencia muy similar (diferencias entre 1 % y 6 %).

Kizilkanat, Oktay, Kabay & Tufekci (2015) realizaron en Turquía un estudio experimental para estimar el efecto de la piedra pómez y la ceniza volante en algunas de las propiedades de morteros elaborados con cemento portland. Mediante diferentes mezclas de mortero, remplazando 15 %, 25 % y 35 % en masa el cemento portland con piedra pómez o ceniza volante (1 mezcla patrón, 3 con distinto porcentaje de sustitución de polvo de piedra pómez y 3 con diferentes porcentaje de sustitución de ceniza volante), determinan el desarrollo de resistencia a la compresión para cada una de las mezclas utilizando el procedimiento descrito en la norma ASTM C-109 con pruebas a los 2 días, 7 días, 28 días, 90 días y 180 días. De esta manera obtuvieron como resultado que la resistencia a la compresión disminuye a edades tempranas en la medida que se aumenta el porcentaje de sustitución del cemento portland con polvo de piedra pómez y ceniza volante. Sin embargo lograron demostrar que para edades cercanas a los 180 días las mezclas con menor porcentaje de sustitución de polvo de piedra pómez lograron sobrepasar la resistencia a la compresión del mortero fabricado con cemento Portland sin sustitución.

Adicionalmente, Thongsanitgarn, Wongkeo & Chaipanich (2014) realizaron un estudio en Tailandia para describir la influencia que tiene la adición de ceniza volante y cal sobre la resistencia a la compresión del cemento Portland. Utilizando el procedimiento explicado en la

norma ASTM C-109, con morteros de cemento Portland con y sin sustitución (30 % en masa del cemento), empleando cubos de mortero fabricados en proporciones de 1:3 con arena Ottawa, obtuvieron las curvas de resistencia compresiva en función del tiempo (pruebas a 1 día, 7 días, 14 días y 28 días con 3 especímenes para cada edad). Como resultado de la investigación lograron demostrar que la presencia de caliza genera una ganancia de resistencia más acelerada en comparación con una sustitución de ceniza volante, por lo que se evidenció que la caliza puede ofrecer una mejor resistencia a la compresión en cementos con sustituciones a edades tempranas; y que los cementos con sustituciones de ceniza volante y cal desarrollan una resistencia compresiva menor que aquella que desarrollan los cementos Portland sin sustitución para todas las edades de estudio.

Elizondo (2013) analizó el comportamiento de la resistencia de concreto en función de la relación agua-cemento para dos tipos de cementos nacionales (UG y MP-AR). Utilizó como marco metodológico las normas ASTM para la caracterización de los materiales, elaboración de la mezcla y fabricación de los cilindros, realizando ensayos a los 7 días, 28 días y 56 días; trabajando con arena y polvo de piedra para los agregados finos y una mezcla de 40 % de quartilla y 60 % de cuarta para el agregado grueso. De los resultados obtenidos consiguió demostrar que los cementos actuales fraguan más lento debido al aumento en el contenido de puzolanas con las que se fabrican, por lo que se mejora la resistencia al mediano y largo plazo; así como que la relación agua-cemento para la fabricación de mezclas de concreto es el elemento más determinante en la resistencia última del concreto endurecido. Este trabajo es el que más relación tiene con el proyecto realizado dado, que a diferencia de los trabajos enunciados en esta sección, Elizondo es el único cuyo desarrollo experimental se llevó a cabo en especímenes de concreto (no de morteros).

Tangchirapat, Jaturapitakkul & Kiattikomol (2009) efectuaron una investigación en Tailandia sobre la influencia de la ceniza de combustible de aceite de palma en el desarrollo de resistencia del cemento, reemplazando esta última al cemento Portland como material puzolánico. Para el proceso de investigación utilizaron cubos de 50 mm, con cemento Portland Tipo I y arena de río en proporciones 1:2.75 con un flujo entre 105 y 115; registrando datos a los 7 días, 28 días, 60 días y 90 días a 13 mezclas de mortero, variando los tamaños de las partículas de ceniza y los porcentajes de sustitución del cemento (entre

10 % a 40 % de la masa del cemento Portland). Así, Tangchirapat, Jaturapitakkul & Kiattikomol demostraron que la sustitución representa un requerimiento mayor de agua para la obtención de una consistencia normal, a menor porcentaje de sustitución mayor la resistencia compresiva del mortero para las diferentes edades de estudio, entre menor fuese el tamaño de las partículas de ceniza de combustible de aceite de palma mayor era la resistencia compresiva de los especímenes y que, para el menor porcentaje de sustitución con los menores tamaños de las partículas se obtienen mayores resistencias compresivas a los 60 días de curado comparando con los valores obtenidos para las muestras con morteros de cemento Portland sin sustitución.

Gómez (2005) evaluó para diferentes tipos de cementos la influencia de las características de cuatro agregados provenientes de tajo en Costa Rica sobre la resistencia a la compresión de un concreto de más  $350^1 \text{ kg/cm}^2$ . Los procedimientos en laboratorio se hicieron con uso de las normas ASTM para determinar las características físicas y mecánicas de los agregados gruesos (granulometría, gravedad específica, densidad relativa, cantidad de partículas friables y resistencia al desgaste abrasivo); aplicando la metodología ACI-211 con cada tipo de piedra para un diseño teórico de un concreto de  $360 \text{ kg/cm}^2$  y elaborando para cada caso 30 cilindros de 30 cm x 15 cm fallándose a 3 días, 7 días, 28 días y 56 días. Así Gómez (2005) demostró que los concretos elaborados con agregados de mayor porcentaje de abrasión presentan una falla más destructiva y plana, atravesando por igual el agregado grueso y la pasta, y que la ganancia de resistencia es más lenta, por lo que no se alcanza la resistencia requerida a los 28 días, pero sí cumplen con la resistencia deseada a los 56 días. Este trabajo estuvo más enfocado a relacionar la resistencia del concreto en función de la abrasión del tipo de agregado utilizado.

Con base en la revisión bibliográfica preliminar realizada, los documentos anteriores constituyeron una referencia de utilidad para el presente trabajo, ya que desarrollan de una manera u otra la temática de estudio mostrando los resultados obtenidos en la determinación del desarrollo de resistencia en función del tiempo para distintos tipos de cementos modificando su composición o la constitución de la mezcla.

---

<sup>1</sup>1 kg/cm<sup>2</sup> equivale a 0.098 MPa

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Determinar el comportamiento de la resistencia a compresión simple del concreto hidráulico, en función del tiempo de curado, a partir de especímenes cilíndricos, cuando se utilizan cementos modificados comercializados en el país en combinación con agregados nacionales de dos distintas procedencias.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- a) Caracterizar, por medio de ensayos en laboratorio, los materiales a emplearse en la elaboración de las mezclas de concreto y la fabricación de los cilindros.
- b) Realizar ensayos de resistencia a la compresión a cuatro diferentes edades de curado para distintos tipos de cementos comercializados en Costa Rica.
- c) Desarrollar la curva de resistencia a la compresión en función del tiempo para distintos tipos de cementos comercializados en Costa Rica, en combinación con agregados provenientes de dos tipos de fuentes, río y tajo.
- d) Realizar un análisis estadístico para los grupos de datos generados, con el propósito de establecer relaciones entre los resultados obtenidos, y mostrar la significancia de los resultados obtenidos como parámetro de valoración de la validez de las curvas de desarrollo estándar que se generen.

## **1.4 Hipótesis**

El desarrollo de la resistencia compresiva para las diferentes edades de curado no difiere significativamente, a 95 % de confiabilidad, entre las combinaciones de cemento y agregados que se utilicen para las mezclas de concreto que se fabricarán.

## **1.5 Delimitación del problema**

### **1.5.1 Alcance**

El presente trabajo consistió en la determinación de las curvas características de resistencia a la compresión simple en función del tiempo para tres tipos de cementos comercializados en Costa Rica: modificado mixto clase A con escoria de alto horno-caliza de resistencia 28 MPa a 28 días (MM/A (E-C) – 28), modificado mixto clase B con puzolana-caliza de resistencia 28 MPa a 28 días (MM/B (P-C) – 28) y modificado con puzolana clase A de alta resistencia inicial (MP A – AR). Se registró la capacidad a compresión a las edades de 3 días, 7 días, 28 días y 56 días con especímenes cilíndricos de 150 mm x 300 mm elaborados para cada tipo de cemento en estudio combinando, según sea el caso, con agregados fino y grueso de origen nacional provenientes de tajo y río.

El agregado fino se caracterizó de acuerdo a las siguientes pruebas: análisis granulométrico (ASTM C-136), densidad masiva (ASTM C-29), densidad relativa (ASTM C-128) e impurezas orgánicas (ASTM C-40).

El agregado grueso se caracterizó de acuerdo a las siguientes pruebas: análisis granulométrico (ASTM C-136), densidad masiva (ASTM C-29), densidad relativa (ASTM C-127) y abrasión en Máquina Los Ángeles (ASTM C-131). Adicionalmente, se realizó el ensayo ASTM D5821 *Método de prueba estándar para determinar el porcentaje de partículas fracturadas en el agregado* para el agregado grueso, y se incluyó también el cálculo del módulo de finura en la arena y piedra.

Con respecto al cemento, se realizaron los ensayos de consistencia (ASTM C-187), tiempo de fraguado (ASTM C-191), densidad (ASTM C-188), finura por tamiz N° 325 ASTM (ASTM C-430) y resistencia a la compresión en mortero (ASTM C-109). Asimismo se definió un método para medir la alcalinidad (pH) del cemento y se hizo la respectiva determinación de esta característica para cada uno de los cementos en estudio.

Para la fabricación de los especímenes se trabajó con una relación agua-cemento de aproximadamente 0.57, utilizando agua potable (se determinó su respectivo pH), un



revenimiento de 120 mm  $\pm$  20 mm, pulido de cilindros o almohadillas de neopreno para el refrentado, un tamaño máximo nominal de piedra de 16 mm y no se utilizó ningún aditivo.

Para todas las edades se elaboraron 8 cilindros curados con agua en cámara húmeda, para un total de 192 cilindros. Lo anterior para contar con un registro adecuado de 30 ensayos consecutivos con materiales y condiciones similares a las esperadas, y de esta manera aplicar el criterio de ACI 318 en el cálculo de la resistencia promedio requerida a la compresión (con una resistencia especificada en planos de 24 MPa). En el Cuadro 1.2 se muestran los elementos constituyentes de las mezclas de concreto.

**Cuadro 1.2** Elementos constituyentes de las mezclas de concreto utilizados en la investigación

<b>Mezcla de Concreto</b>	<b>Cemento</b>	<b>Agregado fino</b>	<b>Agregado grueso</b>
Nº 1	MM/A (E-C)-28 <sup>2</sup>	Arena de río	Piedra de río
Nº 2	MM/A (E-C)-28	Arena de tajo	Piedra de tajo
Nº 3	MM/B (P-C)-28	Arena de río	Piedra de río
Nº 4	MM/B (P-C)-28	Arena de tajo	Piedra de tajo
Nº 5	MP A-AR	Arena de río	Piedra de río
Nº 6	MP A-AR	Arena de tajo	Piedra de tajo

Con respecto a la resistencia de los concretos en análisis, se aplicó el mismo método de elaboración de mezcla de concreto, fabricación y falla de especímenes (ASTM C-39 y C-192) para todas las combinaciones de cementos y agregados presentadas en el Cuadro 1.2. Se incluyó el método de ensayo estándar para resistencia a la abrasión en superficies de concreto por el método de corte rotativo (ASTM C944). Se determinó la densidad del concreto fresco (ASTM C-138), el revenimiento (ASTM C-143), el contenido de aire (ASTM C-231), y la temperatura del concreto (ASTM C-1064) para cada batida.

El equipo que se utilizó correspondió al establecido en las diferentes normas de la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) empleadas y es el disponible en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad

<sup>2</sup> Cemento importado de China

de Costa Rica (LanammeUCR); siguiendo el desarrollo experimental según las diferentes normas ASTM aplicadas en Costa Rica.

### **1.5.2 Limitaciones**

Las limitaciones que se tuvieron durante el desarrollo del proyecto, así como sus soluciones, fueron las siguientes:

- No se contó con información previa sobre el desarrollo de resistencia a diferentes edades de curado que cumpla con las mismas condiciones con las que se desarrolló el proyecto (tipo de cemento y agregados), que hubiera sido útil como referencia, sin embargo, esto no interfirió con el desarrollo del proyecto.
- Debido a que se empleó agregado grueso con un tamaño máximo nominal de 16 mm, no se contó con especificaciones dadas por norma ya que la norma ASTM C 33: *Especificación estándar de agregados para concreto* no contempla una granulometría para este tamaño de agregado. Por tanto, se procedió a utilizar como granulometría ASTM de referencia la que mejor se aproximó a la distribución granulométrica que presentó el agregado, 19 mm para el agregado de río y 12.7 mm para el agregado de tajo. En adición, la granulometría obtenida se mantuvo constante, con un margen de variación determinado en laboratorio a partir de un estudio de variabilidad entre muestras que se realizó como parte de este proyecto.
- Las muestras que se tomaron para la caracterización de los cementos fueron extraídas de un conjunto de sacos diferentes de los que se usaron para la fabricación de los especímenes cilíndricos. Sería ideal el haber caracterizado el cemento contenido en la totalidad de los sacos; pero, precisamente el muestreo tiene el fin de garantizar que las características de la muestra son representativas del lote (total de sacos de cemento que se ocuparon, por tipo).
- Al solicitarse cemento tipo MM/A (E-C) – 28 (cemento chino) a diferentes comercios se indicó que no contaban con este material en sus respectivos depósitos, por lo que se decidió utilizar el cemento de este tipo almacenado en el laboratorio, el cual había sido adquirido un mes previo a la compra de los otros cementos utilizados en el proyecto. Este constituyó un cemento con un tiempo de fabricación y almacenamiento mayor a los otros cementos utilizados (cemento en parte usado y con sacos abiertos pero cubiertos con una bolsa plástica sellada, sin grumos). No obstante, los resultados obtenidos muestran que este factor no influyó para alcanzar la resistencia de diseño.

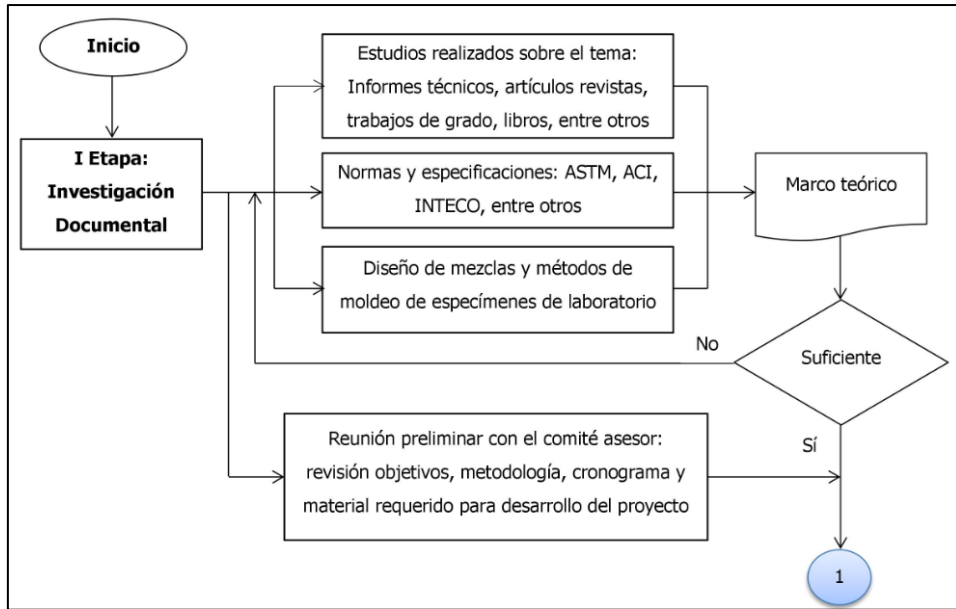
- No en todo momento se contó con la disponibilidad del equipo y personal, esto por demanda de equipo versus oferta, y por aspectos de horarios. Aunque se ocasionaron desviaciones con respecto al cronograma de trabajo propuesto, no se tuvo ningún retraso severo en el desarrollo del proyecto.
- La pericia del estudiante para la ejecución de los ensayos. Esto se solventó por medio de una capacitación del estudiante por parte de los técnicos del laboratorio de concretos y agregados del LanammeUCR, para ayudar a reducir la variabilidad de los resultados como consecuencia de esa falta de pericia.
- No se pudo controlar la humedad precisa de los agregados en el instante que se elaboraron las mezclas de concreto. Como medida provisional se midió la humedad de los agregados al momento que se les realizó el ensayo de densidad masiva para el diseño de mezcla, y para que las mezclas de concreto elaboradas presentaran una consistencia semejante se verificó que el revenimiento no se encontrara fuera de un rango de  $120 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ .
- Se debe considerar que al elaborar las mezclas de concreto, cada una presentó condiciones del tiempo diferente (viento, humedad y temperatura). Para tomar como referencia la información expuesta en el presente trabajo se tomó medida de la humedad relativa y la temperatura ambiente con las cuales se elaboraron cada una de las mezclas de concreto.
- Debido a las condiciones meteorológicas que experimentó el país el 5 y 6 de octubre del 2017 (paso de la tormenta tropical Nate) y el traslado del feriado del 12 de octubre al lunes 16 de octubre del 2017, para las mezclas de concreto con cemento MM/B (P-C) – 28 en su matriz se fallaron 8 cilindros a 14 días (con agregado de tajo) y 8 cilindros a 15 días (con agregado de río) en vez de a 3 días; para la mezcla de concreto con cemento MM/A (E-C) – 28 y agregado de río en su matriz se fallaron 8 cilindros a 8 días en vez de a 7 días; 3 cubos de mortero con cemento MM/B (P-C) – 28 se fallaron a 14 días en vez de a 3 días; y 3 cubos de mortero con cemento MM/A (E-C) – 28 se fallaron a 8 días en vez de a 7 días.
- Al momento de desarrollar el proyecto no se contó con un procedimiento normado para medir el pH del cemento. Para este fin, con la guía de un técnico del LanammeUCR, se definió un método para medir el pH del cemento.

- No fue posible mantener un único método de refrentado de los cilindros de concreto. Debido a una falla del sistema eléctrico de la máquina pulidora de cilindros de concreto, para los cilindros fallados después del 16 de noviembre del 2017 se utilizaron almohadillas de neopreno. Para todos los anteriores se utilizó la técnica de pulido.
- Las muestras de las primeras dos mezclas de concreto utilizadas para el ensayo de abrasión por el método de corte rotativo ASTM C944 se sometieron a una carga de 89.2 N, lo cual corresponde a una carga menor a la establecida en la norma de 98 N. A partir de esto se corrigió la carga del equipo, por lo que para las muestras restantes se empleó una carga de 98.4 N .
- Con respecto al análisis estadístico de los datos, debido a que los tamaños de las muestras son pequeños (8 cilindros por cada edad de falla), los resultados de la prueba de normalidad y el coeficiente de determinación en el modelo de regresión simple se deben interpretar con precaución, ya que las muestras no proveen un estimado muy preciso de las variables determinadas (los métodos recomiendan tamaño de muestras mayores).

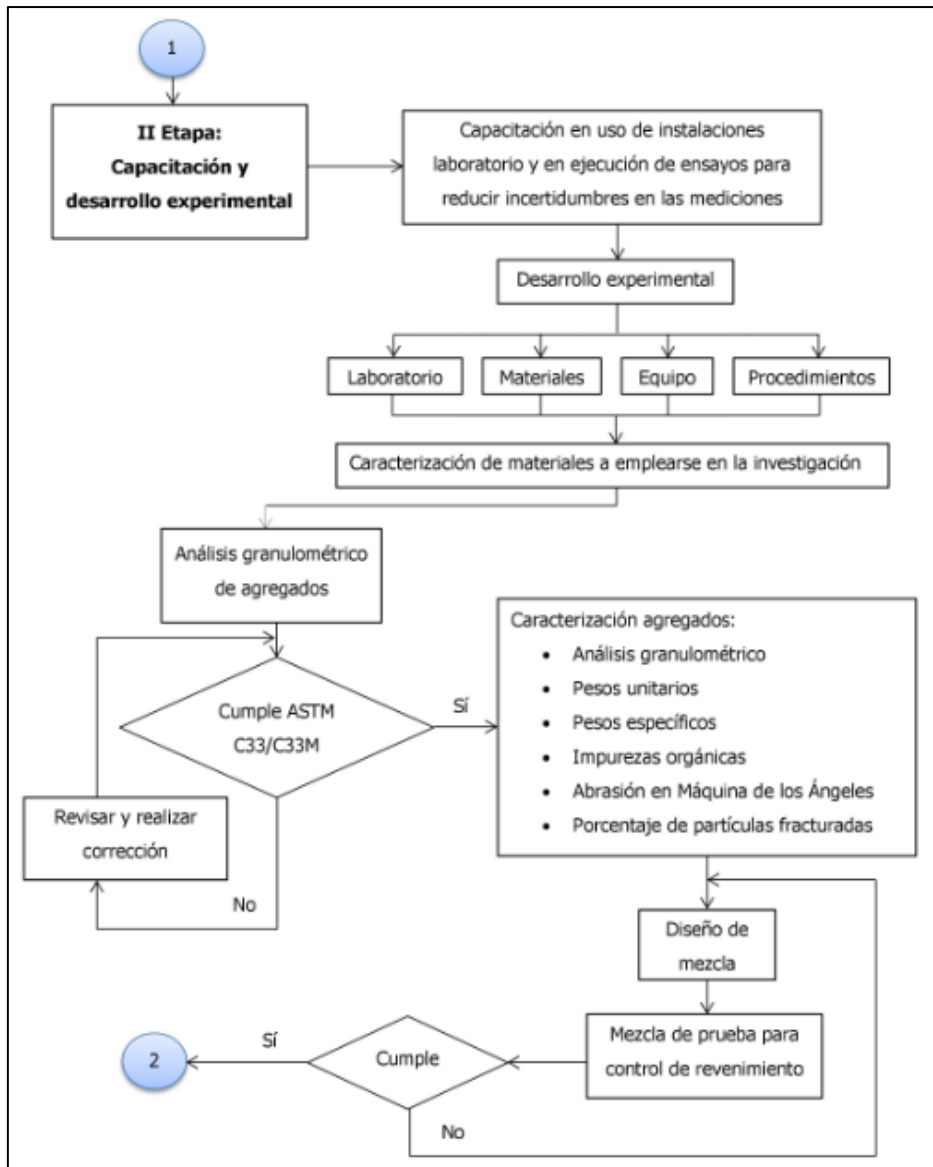
## 1.6 Metodología

La metodología empleada para el presente trabajo es de tipo teórica-experimental. El proyecto trató el estudio, verificación, comentario y conclusiones a partir de pruebas de laboratorio sobre el comportamiento de la resistencia a compresión simple del concreto en función del tiempo para diferentes tipos de cementos modificados (comercializados en el país) con agregados nacionales provenientes de río y tajo.

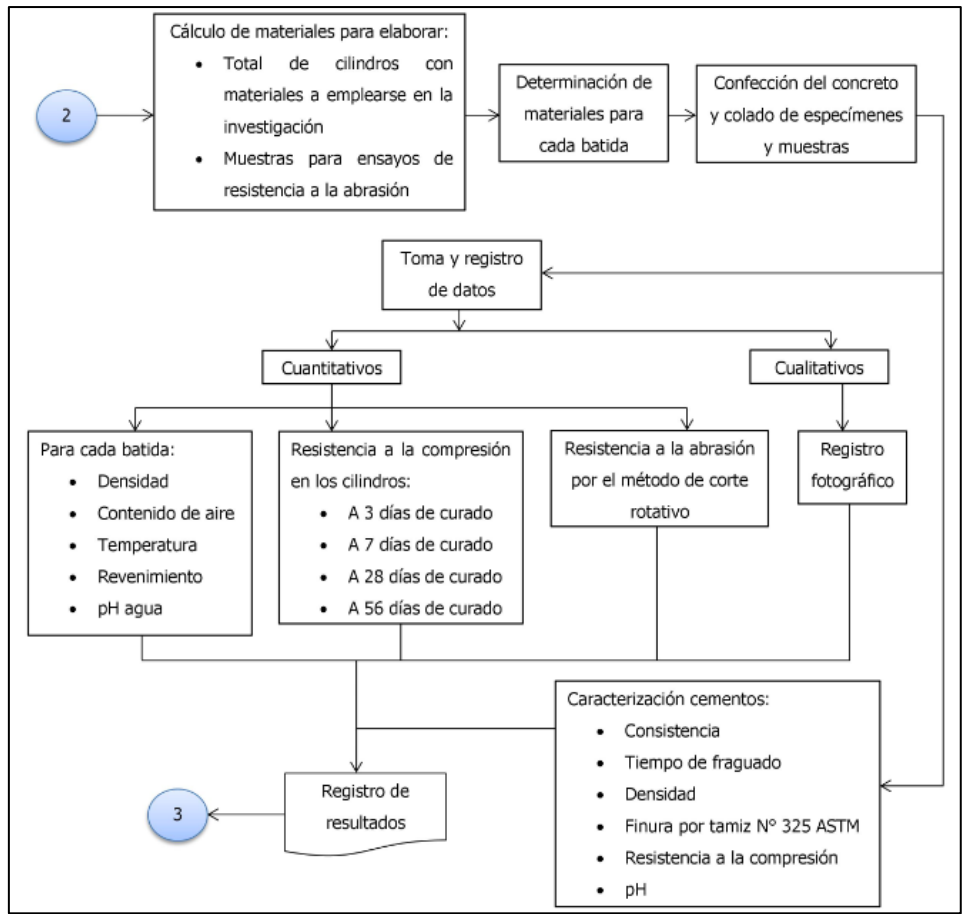
El esquema metodológico seguido para el desarrollo del proyecto se muestra en la **Figura 1.1**, **Figura 1.2**, **Figura 1.3**, **Figura 1.4** y **Figura 1.5**. En **Apéndice A**. Descripción del trabajo experimental se presenta el procedimiento específico de cada ensayo realizado en el desarrollo del proyecto, así como el procedimiento que se siguió para el análisis estadístico de los datos.



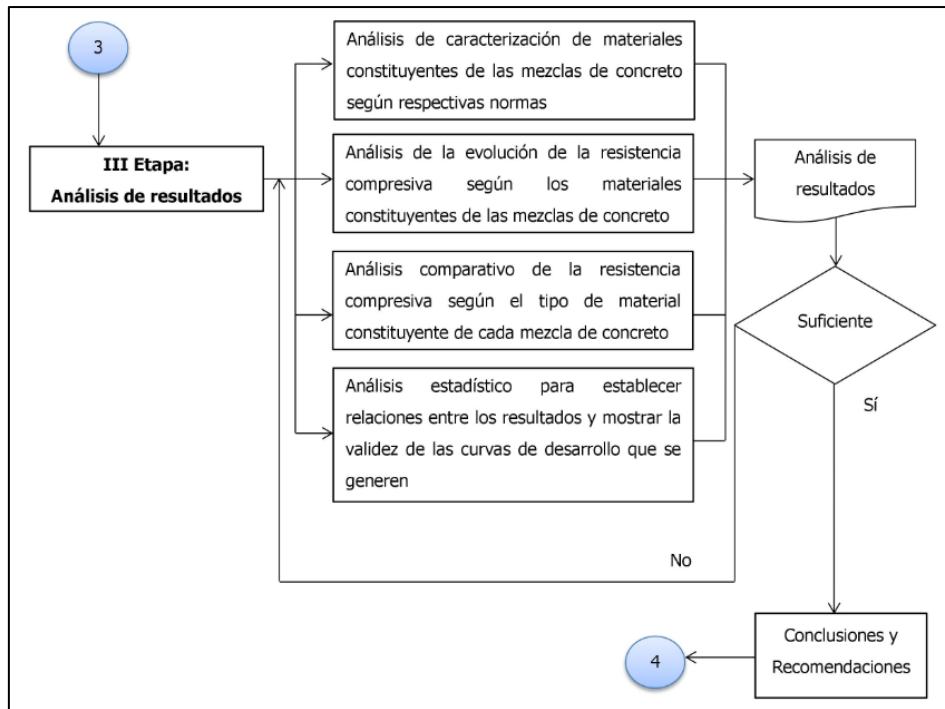
**Figura 1.1** Etapa I del esquema seguido para desarrollar el proyecto



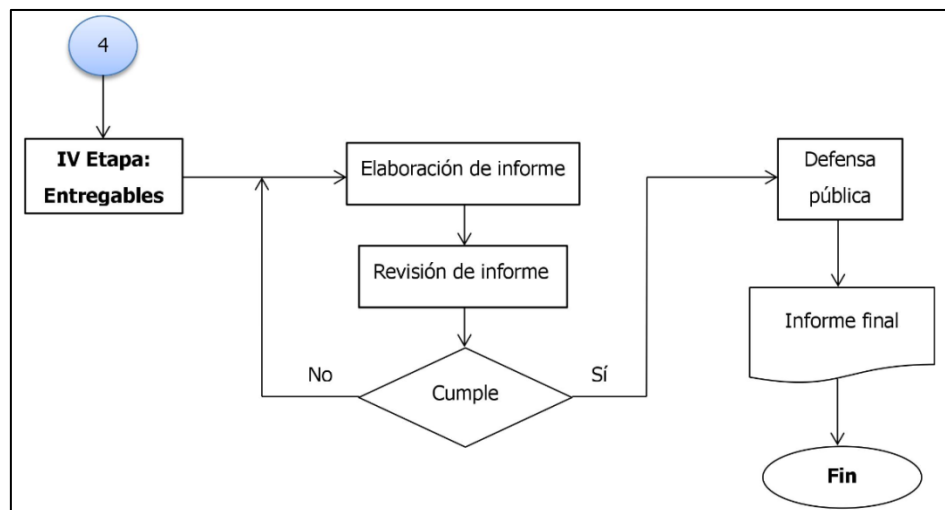
**Figura 1.2** Primera sección de la Etapa II del esquema seguido para desarrollar el proyecto



**Figura 1.3** Segunda sección de la Etapa II del esquema seguido para desarrollar el proyecto



**Figura 1.4** Etapa III del esquema seguido para desarrollar el proyecto



**Figura 1.5** Etapa IV del esquema seguido para desarrollar el proyecto

El proceso metodológico general se resume en las cuatro etapas que se describen a continuación:



## **I Etapa: Investigación documental**

Previo a la ejecución de los ensayos en laboratorio, se realizó una exhaustiva revisión documental que sirvió de base para la elaboración del marco teórico y para familiarizarse con el mayor detalle posible acerca de los ensayos a ejecutar. Las fuentes de información se obtuvieron por medio del Sistema de Bibliotecas, Documentación e Información (SIBDI) y sus respectivos repositorios; trabajos, documentos y normas suministrados por el personal académico de la Universidad de Costa Rica (UCR) y medios electrónicos (Internet); y comprendieron artículos de revistas, artículos de periódicos, libros, apuntes de clase, trabajos de grado, normas y especificaciones tanto nacionales como internacionales (ACI, ASTM, INTECO), así como comunicaciones personales.

El marco teórico elaborado cumplió como la principal fuente de consulta para el desarrollo del proyecto (guía del proyecto).

Paralelamente a la redacción del marco teórico, se calculó la cantidad de material necesaria para la realización de los ensayos de caracterización según la propuesta del proyecto y las normas de cada ensayo; y se determinó la cantidad de material requerido para la fabricación de las 6 mezclas de concreto con un diseño de mezcla aproximado, este a partir de características asumidas de los materiales según valores encontrados en el marco teórico redactado hasta el momento. Se concluyó que se requerirían 1 saca (1 metro cúbico) de cada agregado y 4 sacos de cementos por cada tipo de cemento.

## **II Etapa: Desarrollo experimental**

Antes de la ejecución de cualquier ensayo, se recibió una capacitación por parte de los técnicos del laboratorio de agregados con el fin de reducir los errores que se pudieran originar debido a la falta de pericia, y poder garantizar una alta probabilidad de exactitud en los resultados obtenidos experimentalmente. En el **Cuadro 1.3** se presentan los ensayos practicados en la capacitación previa.

**Cuadro 1.3** Ensayos practicados en capacitación para desarrollo del proyecto

<b>Material</b>	<b>Ensayo</b>	<b>Norma</b>
Agregados	Muestreo de agregados	ASTM D-75
	Reducción de muestras	ASTM C-702
	Materiales más finos que tamiz No. 200 por lavado	ASTM C-117
	Análisis granulométrico	ASTM C-136
	Densidad masiva	ASTM C-29
	Densidad relativa	ASTM C-127 ASTM C-128
	Impurezas orgánicas	ASTM C-40
	Abrasión en Máquina de los Ángeles	ASTM C-131
	Porcentaje de partículas fracturadas del agregado	ASTM D5821
Cemento	Muestreo de cemento	ASTM C-183
	Consistencia	ASTM C-187
	Densidad	ASTM C-188
	Tiempo de fraguado	ASTM C-191
	Finura por tamiz N°325 ASTM	ASTM C-430
	Resistencia a la compresión en mortero	ASTM C-109

Los principales equipos de los cuales se recibió una capacitación para ser utilizados durante el desarrollo del proyecto son los siguientes: máquinas de ensayo a la compresión (falla de cilindros de concreto y cubos de mortero), sierra estacionaria, máquina de Los Ángeles, prensa de taladro giratoria (prueba de corte rotativo), tamizadoras, batidoras, balanzas, hornos, cuarteadores, pH-metro.

Seguidamente se procedió con la búsqueda y selección de los materiales que se utilizarían durante el desarrollo del proyecto, así como la definición de los procedimientos, el equipo y el espacio de trabajo para cada una de las pruebas de laboratorio (incluyendo el lugar de almacenamiento de los materiales).

Como el proveedor del agregado de tajo solo podía suministrar agregado grueso de 16 mm, se optó por usar este tamaño tanto para el agregado de tajo como para el agregado de río, para poder comparar de manera apropiada los resultados obtenidos de los ensayos.

Previó a la recepción de los materiales, se definió el sitio de almacenamiento: unas cajuelas para el almacenamiento del agregado grueso de río a las que se les colocó tapas para proteger el agregado de cualquier contaminante, tarimas para colocar dos sacas de agregado de tajo (fino y grueso), y el cemento se guardó empaquetado en la bodega de cementos del LanammeUCR. A cada uno de los materiales se les asignó un número de muestra, en conformidad con la recepción del material. Todos los espacios indicados se limpiaron antes de la recepción de los materiales.

El agregado de tajo se recolectó directamente en la fuente, para lo cual se utilizó un camión en el que se transportaron dos montículos, uno de piedra y otro de arena procurando evitar que se mezclaran. Al llegar al laboratorio, el agregado fue colocado en las sacas previamente seleccionadas para este fin. Las sacas se ubicaron en una sección del laboratorio techada para evitar cambios abruptos de humedad y prevenir la contaminación. Estas sacas fueron suministradas por parte del LanammeUCR, y se rotularon para facilitar su identificación.

El cemento MM/A (E-C) – 28 (cemento chino) fue suministrado por el LanammeUCR, el cual había sido adquirido un mes antes de la compra de los cementos restantes, por lo que se revisó para constatar que no hubiera presencia de grumos. Los otros tipos de cementos fueron comprados y transportados al laboratorio. Una vez recibido el cemento, se le colocó una bolsa plástica a cada uno de los sacos y se sellaron con adhesivo, rotulando cada una de estas con una fecha de recepción, un número de muestra según los registros del laboratorio y el fin que se les daría. Finalmente se ubicó el cemento en la bodega destinada para este fin en el laboratorio, colocando el cemento sobre una tarima separada del piso unos 10 cm, estibando no más de 2 sacos por hilera y cuidando que los sacos estuvieran separados de la pared.

Se comenzó con los ensayos de los agregados, siendo el análisis granulométrico (ASTM C-136) el primer ensayo que se llevó a cabo. Se realizó una prueba preliminar de granulometría

al agregado fino de las fuentes para valorar su conformidad con las especificaciones de la norma de referencia (ASTM C33). De este análisis granulométrico se observó que únicamente el agregado fino de tajo requería de una corrección, por lo que se procedió a corregir todo el agregado fino de tajo almacenado (eliminando el material retenido en malla No. 8). Posteriormente, del material almacenado se extrajeron aleatoriamente ocho muestras a las cuales se les realizó la prueba de granulometría para conocer la desviación entre muestras y caracterizar el material.

En el caso del agregado grueso, se procedió de manera diferente por tratarse de piedra con un tamaño máximo nominal de 16 mm, el cual no es contemplado dentro de las especificaciones señaladas en la norma ASTM C33. Se hizo el ensayo de granulometría y se definió utilizar el agregado tal como se recibió de las fuentes debido a la falta de una norma para evaluarlo. Posteriormente en el análisis de resultados se decidió conveniente el evaluar los resultados del análisis granulométrico para este tipo de agregado con diferentes tamaños de agregado grueso especificados en la norma ASTM C33.

Ya con las granulometrías de trabajo definidas, se realizaron los ensayos de densidad masiva (ASTM C-29), densidad relativa (ASTM C-127 y ASTM C-128), impurezas orgánicas en agregado fino (ASTM C-40), abrasión en Máquina de Los Ángeles en agregado grueso (ASTM C-131) y porcentaje de partículas fracturas en el agregado grueso (ASTM D5821), tomándose tres muestras de cada agregado para cada ensayo indicado. Las muestras se tomaron del lote almacenado según lo establecido en la norma ASTM D-75: *Muestreo de agregados* y se redujeron según ASTM C-702: *Práctica estándar para la reducción de las muestras de agregado a tamaño de prueba*.

Obtenidas las características de los agregados, se realizó el diseño de mezcla según el método especificado en ACI 211.I-19. A partir de las dosificaciones calculadas, se fabricaron tres cilindros de una mezcla de concreto de prueba para verificar que se cumplía con el revenimiento de  $120 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$  especificado para el proyecto, así como practicar los ensayos de fabricación de cilindros de concreto en laboratorio (ASTM C-192), densidad del concreto fresco (ASTM C-138), revenimiento (ASTM C-143), contenido de aire (ASTM C-231) y temperatura del concreto (ASTM C-1064).

Se calculó la totalidad de material necesario por cada batida para la elaboración de 32 cilindros para cada una de las mezclas de concreto expuestas en el Cuadro 1.2, dejando un porcentaje adicional para la elaboración de un cilindro de 100 mm x 200 mm que fue utilizado en la obtención de tres muestras de concreto para el ensayo de resistencia a la abrasión por el método de corte rotativo (ASTM C-944). Se procedió a la elaboración de las mezclas y fabricación de los cilindros según ASTM C-192, determinando el pH del agua, la densidad del concreto fresco (ASTM C-138), el contenido de aire (ASTM C-231), revenimiento de la mezcla (ASTM C-143) y temperatura de la mezcla (ASTM C-1064) por batida. Para facilitar el cronograma de falla de los cilindros y cubos de mortero, se fabricaron los cubos de mortero, según la norma ASTM C-109, de cada uno de los cementos en las mismas fechas que se elaboraron las tres primeras mezclas de concreto.

Para cada batida de concreto, se dio una preparación previa del material, que consistió en colocar los agregados fino y grueso en bolsas de 20 kg y 30 kg respectivamente. El cemento fue distribuido en baldes conteniendo aproximadamente 18 kg del cemento a ser utilizado. Todo el material fue tapado hasta el momento de ser colocado en la batidora. Se utilizó agua potable, la disponible en el laboratorio.

El curado de los cilindros se hizo en cámara húmeda bajo condiciones ambientales controladas y se fallaron a edades de 3 días<sup>3</sup>, 7 días, 28 días y 56 días según ASTM C-39, puliendo las superficies de los cilindros para el refrentado; cabe advertir que los especímenes correspondientes a las mezclas de concreto conteniendo cemento MP A – AR, así como los cilindros fallados a los 28 y 56 días de las mezclas de concreto conteniendo agregado de tajo con cemento MM/B (P-C) – 28 y MM/A (E-C) – 28 se fallaron usando almohadillas de neopreno debido a un fallo en la máquina pulidora. Se continuó con la determinación de la resistencia a la abrasión para cada una de las muestras según ASTM C-944, cuando los especímenes fabricados para este ensayo habían cumplido una edad de 28 días, tomándose 3 pastillas del cilindro adicional de 100 mm x 200 mm fabricado en cada batida de concreto (las muestras se obtuvieron cortando el cilindro con una sierra estacionaria). Asimismo se fallaron

---

<sup>3</sup> Se debieron trasladar unas fechas de fallas de cilindros de concreto y cubos de mortero debido al paso de la tormenta tropical Nate el 5 y 6 de octubre del 2017, y el traslado del feriado del 12 de octubre al lunes 16 de octubre del 2017. Estos cambios se indican en la sección 1.5.2 sobre limitaciones en el desarrollo del proyecto.

los cubos de mortero a las mismas edades del concreto según lo indicado en la norma ASTM C-109, dejando sumergidos los cubos en agua con cal hasta la edad de falla respectiva. Como parte del registro de los resultados obtenidos se tomaron fotografías de todos los ensayos realizados para documentar el proceso llevado, comenzando con la caracterización de los materiales y finalizando con la última falla de cilindros.

Para la prueba de corte rotativo ASTM C-944, se usó para las primeras dos muestras de concreto utilizadas una carga de 89.2 N (menor a la especificada por norma), esto se corrigió, de manera que para las cuatro muestras restantes se empleó una carga de 98.4 N.

Respecto a la caracterización de los cementos en estudio, los ensayos de consistencia (ASTM C-187), tiempo de fraguado (ASTM C-191), densidad (ASTM C-188), finura por tamiz No. 325 ASTM (ASTM C-430) y medición del pH se iniciaron una vez se finalizó con la elaboración de las mezclas de concreto (se realizó la caracterización del cemento de manera paralela a la falla de los cilindros de concreto). Por cada tipo de cemento se realizaron 10 ensayos de cada tipo, excepto para el ensayo de medición del pH, para el cual se tomaron 3 muestras por cada cemento, tomándose las muestras de sacos seleccionados al azar del lote de sacos que se usaron para la fabricación de los especímenes cilíndricos de concreto. Se muestreó el cemento según la norma ASTM C-183.

Los cubos de mortero fabricados según ASTM C-109 se fallaron a la mismas edades de los cilindros de concreto (3 días, 7 días, 28 días y 56 días), para observar la correlación entre los cubos de mortero y los cilindros de concreto fabricados con los cementos en estudio.

Respecto al ensayo de medición de pH, al momento de desarrollar el proyecto, no se encontró norma alguna en la cual se indicara un procedimiento para la determinación de esta variable. Por este motivo, con la guía de uno de los técnicos del laboratorio de ligantes asfálticos del LanammeUCR, se determinó un procedimiento para medir la variable en cuestión. A partir de diferentes muestras se concluyó que lo ideal era emplear una suspensión en la cual el metanol se utilizaría como disolvente en la prueba de pH cemento, ya que este no reacciona con el cemento y presenta un leve decremento de la temperatura en la suspensión. El procedimiento consistió en introducir en un recipiente una cantidad de

cemento y metanol hasta que la medida de pH de la suspensión fuese estable, midiéndose el pH de la suspensión con un pH-metro.

Finalmente se registraron los resultados obtenidos de cada uno los ensayos, así como las variables y parámetros determinados (incluyendo gráficas). Se hace notar que, al contarse con el registro de 32 cilindros de ensayos consecutivos con materiales y condiciones similares, se calculó la desviación estándar y la resistencia promedio requerida a la compresión según ACI 318.

Para todos los ensayos se midió la temperatura ambiente y la humedad relativa.

### **III Etapa: Análisis de resultados**

Con base en los resultados obtenidos en la segunda etapa, se procedió a evaluar el comportamiento de desarrollo de resistencia a compresión simple en cada una de las mezclas de concreto elaboradas, prestando especial atención a la variación en el porcentaje de incremento de resistencia por edad de curado, características del agregado y del cemento empleado.

De igual manera se realizó un análisis comparativo sobre el incremento de estas resistencias según el tipo de mezcla de concreto, detallándose los cambios obtenidos debidos al tipo de cemento y la proveniencia del agregado en cada mezcla; así como un análisis del cumplimiento de los requisitos indicados en la norma ASTM C33 para el agregado y en la norma INTE C147 para los cementos utilizados en la elaboración de las mezclas.

Por último se realizó un análisis estadístico haciendo uso módulo de análisis estadístico del programa Microsoft Excel 2010 para mostrar la significancia de los resultados obtenidos como parámetro de valoración de la validez de las curvas de desarrollo estándar que se generaron con el proyecto, así como comparar los resultados que se obtuvieron entre cada muestra y verificar el grado de control que se llevó al elaborar las mezclas de concreto a partir de lo estipulado en la ACI 214R-02: *Evaluación de los resultados de las pruebas de resistencia del concreto*.

### El procedimiento seguido para el análisis estadístico fue el siguiente:

En primer término, se controlaron las siguientes variables al elaborar las mezclas de concreto:

- Potabilidad del agua ( $6.5 < \text{pH} < 7.5$ )
- Proporciones de los materiales constituyentes
- Consistencia de la mezcla (reventamiento de  $120 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ )
- Tipo de cemento (MM/A (E-C) – 28, MM/B (P-C) – 28, MP A – AR)
- Tipo de agregado (río o tajo)
- Edad de falla del concreto (3 días, 7 días, 28 días y 56 días)

A partir de las variables señaladas y controladas, se establecieron 6 grupos de datos principales con los cuales se identificaron los resultados de cada mezcla de concreto para desarrollar el análisis estadístico, siendo estos los tratamientos de cada mezcla de concreto, y correspondiendo a los promedios de resistencia a la compresión simple de los 8 especímenes fallados a una edad específica de una mezcla de concreto. A estos tratamientos se le aplicaron las pruebas de normalidad, análisis de varianza (ANOVA), comparación múltiple Tukey, intervalos de confianza, modelo regresión simple, y evaluación de los resultados de resistencia.

Adicionalmente se establecieron 6 tratamientos complementarios, los cuales corresponden al promedio de resistencia desarrollada en función de los resultados a los 28 días de todos los cilindros de la misma edad elaborados de una mezcla de concreto, a los cuales se les aplicó la prueba de análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de comparación múltiple Tukey.

### Prueba de normalidad

Utilizando la herramienta XLSTAT habilitada como complemento del programa Microsoft Excel 2010, para un  $\alpha=0.05$  y un tamaño de muestra de 8 especímenes por cada edad del concreto, para cada tratamiento se comprobó que los valores de resistencia a la compresión simple siguieran el comportamiento de una distribución normal por medio de la prueba Kolmogorov – Smirnov.



### Evaluación de resultados de resistencia

Para una edad de 28 días del concreto, para cada una de las mezclas elaboradas se calcularon el promedio (MPa), la desviación estándar (MPa) y el coeficiente de variación (%) utilizando las funciones de cálculo del programa Microsoft Excel 2010. A partir de la resistencia promedio a los 28 días (si esta era menor o mayor a 34.5 MPa) de cada uno de los tratamientos, se compararon las desviaciones estándar (MPa) de cada mezcla a la edad de 28 días con los estándares presentados en la norma ACI 214R-02.

### Análisis de varianza (ANOVA)

Para cada edad de falla, se realizó un análisis de varianza de un factor con varias muestras por grupo utilizando las herramientas para análisis estadístico habilitadas como complemento del programa Microsoft Excel 2010, para un  $\alpha=0.05$  y un tamaño de muestra de 8 especímenes por cada edad del concreto. Esta prueba se empleó para comparar los promedios de resistencia y los promedios de resistencia ganada en función de los resultados a los 28 días, y determinar si existe o no una diferencia significativa de estas variables entre cada una de las mezclas de concreto.

### Prueba de Tukey

Realizada la prueba de análisis de varianza, para identificar aquellos pares de medias que no presentaban una diferencia significativa en el desarrollo de resistencia y en la resistencia ganada en función de los resultados a los 28 días, se aplicó el criterio de Tukey. Para esto, utilizando los resultados del análisis ANOVA, se calcularon las variables de interés según las ecuaciones presentadas en el marco teórico para la prueba de Tukey y utilizando las funciones de cálculo del programa Microsoft Excel 2010.

### Intervalos de confianza

De acuerdo con los valores promedios de resistencia y la desviación estándar calculada para cada edad de falla de las mezclas de concreto elaboradas, usando la función "INTERVALO.CONFIANZA.T()" del programa Microsoft Excel 2010, para un  $\alpha=0.05$  y un tamaño de muestra de 8 especímenes por cada edad del concreto, se determinaron los intervalos de confianza de resistencia a la compresión para cada edad de falla según la distribución probabilística t de Student.

### Correlación y regresión

Utilizando la herramienta de graficación del programa Microsoft Excel 2010, evaluando diferentes modelos de regresión hasta seleccionar aquel que mejor se ajustó al comportamiento de los datos de desarrollo de resistencia en función del tiempo y que presentó el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) más cercano a 1; se establecieron ecuaciones matemáticas con las cuales describir el desarrollo de resistencia de cada mezcla de concreto en función de la edad de curado.

### **IV Etapa: Entregables**

Esta última etapa del proyecto consistió en la finalización y depuración del informe final. El informe contempla cada uno de los productos obtenidos de las etapas anteriores. De acuerdo con los objetivos planteados, los entregables, contenidos en este informe son:

- a) Resultados de la caracterización, por medio de ensayos en laboratorio, de los componentes de cada concreto.
- b) Curvas de desarrollo de resistencia a la compresión para concretos elaborados con distintos tipos de cementos que utilizan, según sea el caso, agregados de tajo o de río, para diferentes edades de curado.
- c) Curvas de porcentaje de desarrollo de resistencia en función del tiempo de curado para concretos elaborados con distintos tipos de cementos que utilizan, según sea el caso, agregados de tajo o de río, para diferentes edades de curado.
- d) Análisis estadístico para los grupos de datos generados, que muestran la significancia de los resultados obtenidos como parámetro de valoración de la validez de las curvas de desarrollo estándar obtenidas, y que permite dar respuesta a la hipótesis planteada.
- e) Conclusiones y recomendaciones sobre el tema que fue objeto de estudio.

## **Capítulo 2. Marco teórico**

En el presente capítulo se expone la teoría tomada como referencia para explicar el comportamiento de los datos recolectados durante el desarrollo del proyecto, se detallan valores aproximados u observados normalmente de las características medidas de los materiales en estudio y se señalan algunos de los métodos empleados para medir cada una de las características estudiadas.

### **2.1 Fundamentos del concreto**

El concreto se define como un material compuesto constituido por una matriz químicamente activa (cemento y agua) y materiales minerales granulares generalmente inertes (piedra y arena denominados como agregados), al cual se le puede incorporar aditivos para conferirle alguna característica especial (Muñoz, 2015).

Generalmente el volumen total del concreto se encuentra constituido por la pasta del concreto (materiales cementantes, agua y aire atrapado), que ocupa entre un 25 % y 40 % del volumen total de la mezcla, y los agregados que conforman aproximadamente del 60 % al 75 % del volumen total del concreto (Kosmatka et al., 2004). Estos materiales constituyentes deben poseer las propiedades adecuadas para asegurar la calidad del concreto y la adecuada unión entre sus componentes, por lo anterior en la siguiente sección se exponen las características que usualmente se estudian para describir sus propiedades físicas y mecánicas, y con ello determinar la calidad del concreto elaborado en el desarrollo de la investigación.

#### **2.1.1 Cemento**

Uno de los componentes principales de las mezclas de concreto es el cemento Portland, el cual es un cemento calcáreo constituido por calcio, sílice, aluminio y hierro. Estos pueden ser de dos tipos: hidráulicos (ganan resistencia y endurecen al reaccionar con el agua) y no hidráulicos (simplemente rigidizan) (Gómez, 2005).

Según Muñoz (1999) el cemento calcáreo se define como: "una mezcla constituida por materiales calcáreos y arcilla, los cuales combinados a altas temperaturas forman un producto llamado clinker, al que se le incorpora sulfato de calcio dihidratado como regulador de fraguado, para producir finalmente un cemento hidráulico."(p.3).

Kosmatka et al. (2004) expone que para la producción de este tipo de cemento las materias primas (calcita, caliza, esquisto, mineral de hierro, arcilla, mineral de aluminio, entre otros) se transportan de la cantera, se trituran, muelen y se dosifican de tal manera que la harina resultante tenga la composición deseada (durante la fabricación se hacen análisis químico de los materiales constituyentes del cemento). El cemento se fabrica por vía seca como por vía húmeda, donde en el proceso seco las operaciones de molienda y mezcla se efectúan con los materiales secos, ya en el proceso de vía humedad se mezclan con agua. Después del mezclado se alimenta la materia prima molida en la parte superior del horno, donde las temperaturas de 1400 °C a 1550 °C cambian químicamente el material crudo en clinker. Después se enfría el clinker y se pulveriza, adicionando una cantidad de yeso para controlar el tiempo de fraguado del cemento, y se mejoren las propiedades de contracción y desarrollo de resistencia. En el molino el clinker se muele tan fino que pueda pasar completamente un tamiz de 45 micrómetros.

Se debe destacar que la interpretación de las propiedades físicas del cemento resulta de gran importancia, ya que si bien los ensayos de las propiedades físicas de los cementos se deben utilizar para evaluar los cementos y no el concreto, se tiene que la ganancia de resistencia del concreto se ve afectada por la hidratación del cemento, la cual se relaciona con características del cemento como lo son la hidratación de sus componentes químicos principales, la velocidad de desarrollo, las sustituciones que se realizan con otros materiales (como puzolanas), la composición química, finura, adiciones y las condiciones de almacenaje; presentando un desarrollo de la resistencia compresiva de manera ascendente a través del tiempo (Carvajal, 2016). En la **Figura 2.1** se muestra un ejemplo del cemento utilizado para el desarrollo del proyecto.



**Figura 2.1** Ejemplo de muestra de cemento utilizado en el proyecto

### **Tamaño de las partículas y finura**

El cemento Portland consiste en partículas angulares individuales con una variedad de tamaños individuales, resultantes de la pulverización del clinker (Kosmatka et al., 2004). Se tiene que aproximadamente un 95 % de las partículas de cemento son menores que 45  $\mu\text{m}$  (0.045 mm), con un promedio de partículas de 15 micrómetros.

La finura de un cemento se entiende como la distribución total del tamaño de sus partículas, donde esta propiedad física afecta el calor liberado y la velocidad de hidratación (Kosmatka et al., 2004). La finura de un cemento resulta útil para determinar su comportamiento en la hidratación y reacción con el agua, ya que la mayor finura del cemento aumenta la velocidad o tasa de hidratación del cemento, acelerando el desarrollo de resistencia, aunque se debe considerar que una velocidad de hidratación muy rápida puede dar lugar a la formación de ligaduras inestables (Muñoz, 1999). Los efectos de la mayor finura sobre la resistencia de las pastas se manifiestan principalmente durante los primeros 7 días.

Para determinar la finura de un cemento se puede recurrir a los siguientes métodos:

- Método de la malla N° 325 (ASTM C430)
- Método del Turbidímetro de Wagner (ASTM C115)
- Método del Permeámetro de Blaine (ASTM C204)

Anteriormente se ha reportado que partículas con un tamaño superior a los 60 micrómetros no tienen un aporte en el desarrollo de resistencia del cemento, puesto que su finalidad va

más dirigida a un efecto de relleno en el cemento; y que las partículas con tamaños entre 3 y 30 micrómetros son las que mayor aporte dan a la resistencia a la compresión a edades tempranas (Celik, 2009).

### **Consistencia**

Se refiere a la habilidad de fluir de un mortero o a la movilidad relativa de la mezcla fresca de una pasta (Kosmatka et al., 2004). La consistencia normal de un cemento se logra cuando la aguja del aparato de Vicat penetra en  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  la pasta de cemento después de 30 segundos de liberarse el aguja (ASTM C187, 2016), condición para la cual se tiene que el porcentaje de agua por peso de cemento en un cemento Portland oscila entre un 22 % y 30 % (Muñoz, 1999). Adicionalmente se tiene que los morteros se mezclan para obtener una relación agua – cemento fija con la cual proporcionar una fluidez dentro de un rango de  $110 \pm 5 \%$ , determinándose esta en una mesa de caídas (ASTM C1437, 2015).

Los métodos de consistencia normal (ASTM C187) y fluidez (ASTM C1437) se emplean para regular la cantidad de agua en pastas y morteros respectivamente, y con ello comparar ingredientes distintos en la composición del cemento con la misma penetrabilidad o fluidez (Kosmatka et al., 2004).

### **Tiempo de fraguado**

Según Muñoz (1999) "Se entiende por fraguado o tiempo de asentamiento el paso del estado fluido al rígido de una pasta de cemento" (p.18). Se tiene que el tiempo de fraguado se determina empleando el aparato de Vicat (Figura 2.2), donde en la práctica (ASTM C191) se utilizan los términos fraguado inicial y fraguado final.



**Figura 2.2** Aguja de Vicat utilizada para determinación del tiempo de fraguado

Kosmatka et al. (2004) señalan que el objetivo del ensayo de tiempo de fraguado es determinar el tiempo que pasa desde la adición de agua en el cemento hasta cuando la pasta deja de tener fluidez y ser plástica (fraguado inicial) y del tiempo requerido para que la pasta adquiera un cierto grado de endurecimiento (fraguado final). El tiempo de fraguado se regula por el sulfato presente en el yeso u otras fuentes en el cemento, pero también se debe considerar que la finura, relación agua – cemento y cualquier aditivo empleado afectan al tiempo de fragua.

Para la práctica de determinación del tiempo de fragua el tiempo transcurrido entre el contacto inicial del cemento con el agua y la penetración de 25 mm de la aguja del aparato de Vicat es el tiempo de fraguado inicial, en tanto que el tiempo de fraguado final se determina una vez que la aguja del aparato de Vicat no deje una marca claramente visible sobre la superficie de la muestra ensayada (ASTM C191, 2013).

Según los requerimientos establecidos en el reglamento RTCR 479: 2015 y la norma INTE C147 que lo acompaña el tiempo de fragua inicial no debe ser menor a 45 minutos, en tanto que el tiempo de fraguado final no debe ser superior a los 420 minutos. Si bien, como anteriormente se indicó, los resultados de los ensayos en el cemento no se deben asociar con las características de las mezclas de concreto elaboradas con el cemento en estudio, se destaca que de los resultados obtenidos del ensayo de tiempo de fraguado del cemento se logra determinar un aproximado del tiempo de manipulación de la mezcla de concreto con el

tiempo de fraguado inicial, y la definición del posible tiempo que le tome a una estructura rigidizarse a partir del tiempo de fraguado final (Gonzales, 2004).

### **Densidad**

Es la masa por unidad de volumen de un cemento, donde la densidad relativa se asocia con la razón entre la densidad del cemento con la densidad de agua destilada a una temperatura de 4 °C (Kosmatka et al., 2004).

El cemento Portland de alto horno y el puzolánico tienen masas específicas que varían de 2.90 hasta 3.15 g/cm<sup>3</sup> (Kosmatka et al., 2004). El porcentaje de sustitución de puzolanas que se realizan por masa en los cementos modificados dan como resultados volúmenes mayores de material cementicio, afectando los valores de densidad del cemento; esto debido a que poseen una gravedad específica menor que la del cemento (Neville & Brooks, 2010).

La importancia de la densidad y la densidad relativa de un cemento recae en el cálculo de cantidades, diseño y control de mezclas de concretos (Gonzales, 2004), se debe considerar que esta característica no es una indicación de la calidad del cemento.

### **Resistencia a la compresión**

La resistencia a la compresión es aquella obtenida cuando se aplican cargas a compresión en especímenes cúbicos o cilíndricos de mortero dependiendo del método empleado (Kosmatka et al., 2004). Para validar que efectivamente la resistencia obtenida en el mortero corresponde precisamente al cemento en objeto de estudio se deben preparar y curar los especímenes de acuerdo con la prescripción de la norma (generalmente ASTM C109) y con el uso de arena estándar (Arena Ottawa).

La resistencia a la compresión en el cemento se ve influida por el tipo de cemento, o más precisamente, la composición y la finura del cemento (Kosmatka et al., 2004). Respecto al efecto de los componentes principales del cemento sobre la resistencia, se destaca la presencia de los silicatos (C<sub>3</sub>S y C<sub>2</sub>S), ya que estos en presencia del agua reaccionan para formar hidróxido de calcio (CH) y silicato de calcio hidratado (C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>H<sub>3</sub>), siendo este último el principal responsable de la resistencia del cemento hidráulico. Para edades tempranas el



silicato tricálcico ( $C_3S$ ) es el principal influyente en desarrollo de resistencia y en la fragua inicial, en tanto que al largo plazo el silicato bicálcico ( $C_2S$ ) es que mayor aporte da al desarrollo de la resistencia (Neville & Brooks, 2010).

La determinación de esta variable resulta primordial para asegurar que la resistencia mecánica mínima de un elemento elaborado con mortero cumpla con los requerimientos de la estructura. Posteriormente se mostrarán los requerimientos de resistencia a la compresión en cubos de mortero de 50 mm para los cementos hidráulicos comercializados en el país según el RTCR 479: 2015.

### **pH del cemento**

Es una propiedad que representa la concentración de iones de hidrogeno en átomos de gramo por litro, usada para expresar la acidez y la alcalinidad de una solución en una escala de 0 a 14, donde menos que 7 representa acidez y más que 7 alcalinidad (Kosmatka et al., 2004).

Andrade y Macías (1982) destacan que tradicionalmente la fase líquida del concreto presenta un pH de 12.5 debido a que su base se encuentra compuesta principalmente por  $Ca(OH)_3$ . Asimismo señalan que el pH del cemento se determina principalmente por el contenido de álcalis, lo cual en combinación con la relación agua – cemento son los principales factores que determinan el pH del concreto. Los autores indican que el pH del cemento hidráulico oscila entre 12.11 y 12.62, aumentando el valor de pH conforme mayor sea el contenido de álcalis ( $K_2O$  y  $Na_2O$ ) en los cementos.

Finalmente Andrade y Macías (1982) destacan que para cementos con pH superiores existe una mayor probabilidad que se dé la corrosión de las armaduras galvanizadas embebidas en mezclas de concreto elaboradas con el cemento en cuestión. Cabe destacar que este efecto se conoce como la carbonatación del concreto, en la cual se da una disminución del pH del concreto originando la oxidación de la armadura que resulta en una pequeña contracción de la pasta superficial del concreto (Kosmatka et al., 2004). Este efecto ocurre cuando el concreto endurecido que contiene alguna humedad reacciona con el dióxido de carbono en el aire, aunque en la actualidad son pocos los concretos que se carbonatan, por lo que la

contracción por carbonatación es insignificante y no debe ser considerada en prácticas de la ingeniería (Kosmatka et al., 2004).

### **Almacenamiento del cemento**

Se debe procurar una práctica adecuada en el almacenamiento del cemento, ya que su calidad se ve afectada por la humedad, la cual ocasiona una fragua más lenta y una menor resistencia que la de un cemento mantenido en seco (Kosmatka et al., 2004). Esto debido a la carbonatación de las fases de hidratación de los silicatos de calcio y la hidratación parcial del óxido de calcio libre. Las reglas generales para el almacenamiento del cemento son las siguientes (Muñoz, 2015):

- No debe estar en contacto con paredes (separar no menos de 20 cm)
- No debe estar en contacto con el piso (separar no menos de 20 cm)
- Altura de estibación no mayor a 2 m (para evitar la compactación del cemento)
- Almacenar en un lugar seco y bien ventilado
- Minimizar la circulación de aire
- Los sacos que se almacenen por un largo período se deben cubrir con alguna cobertura impermeable

### **Clasificación de cementos**

Con el objetivo de establecer los parámetros y las características técnicas que deben cumplir los cementos hidráulicos, para su uso en el territorio nacional; sean estos producidos localmente o importados, la presidencia de la República en conjunto con el Ministerio de Economía, Industria y Comercio y el Ministerio de Salud promulgaron en el año 2015 un nuevo reglamento denominado Reglamento Técnico RTCR 479:2015 *Materiales de Construcción, Cementos Hidráulicos*. En este reglamento se establece la clasificación de los cementos por tipos y los requisitos de etiquetado que deben contener los cementos a granel y empacados (RTCR 479: 2015, 2015). En el Cuadro 1.1 se muestran los principales tipos de cementos hidráulicos comercializados en el país.

A continuación se presenta la definición de los cementos que fueron utilizados para el desarrollo de la investigación según el Reglamento Técnico Nacional y la norma INTE C147

(anteriormente INTE 06-11-15:2015) que lo acompaña emitida por el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica:

- **Tipo MM/A (E-C) – 28:** Es un cemento modificado hidráulico mixto, conteniendo en total una cantidad de escoria granulada de alto horno (E) y caliza (C) entre el 6 % y 20 % en masa, compuesto principalmente por clinker. Se comercializa en el país con una resistencia mínima a los 28 días de 28 MPa.
- **Tipo MM/B (P-C) – 28:** Cemento modificado hidráulico mixto, conteniendo en total una cantidad de materiales puzolánico (P) y caliza (C) entre el 21 % y 35 % en masa (modificado mixto), de clase 28 (28 MPa a los 28 días). Está compuesto por minerales hidráulicos y yeso en más del 70 % de la masa del producto, más del 15 % correspondiendo a minerales activos y por otros minerales en poco más del 5 % de la masa total.
- **Tipo MP A-AR:** Cemento modificado hidráulico puzolánico, compuesto por clinker y conteniendo entre el 6 % y 20 % de puzolana (P) en masa, de alta resistencia inicial (12 MPa a 1 día y 24 MPa a los 3 días).

De acuerdo a lo señalado en el Reglamento Técnico Nacional y la norma INTE C147, en el Cuadro 2.1 se muestran los requisitos físicos y químicos con los métodos de ensayos establecidos que deben cumplir los cementos hidráulicos comercializados en el país, en tanto que en el Cuadro 2.2 se presentan las resistencias a la compresión que deben satisfacer.

**Cuadro 2.1** Requisitos físicos y químicos para cementos comercializados en Costa Rica

<b>Requerimientos físicos</b>				
Característica física		Especificación	Método de ensayo	
Finura por permeabilidad (m <sup>2</sup> /kg mínimo)		4	ASTM C204	
Finura por retenido en tamiz de 45 µm (% mínimo)		5	ASTM C430	
Cambio de longitud en autoclave (% máximo)		0.8	ASTM C151	
Tiempo de fragua (minutos)				
- Inicial mínimo		45	ASTM C191	
- Final máximo		420		
Expansión en barras de mortero 14 días (% máximo)		0.02	ASTM C108	
Falso fraguado (% mínimo)		50	ASTM C451	
<b>Requerimientos químicos</b>				
Propiedades	Tipo de cemento hidráulico	Clase de resistencia	Requisitos	Ensayo de referencia
Pérdida por Ignición	Tipo I Tipo ME	Todas	≤ 5.0 %	ASTM C114
Residuo insoluble	Tipo I Tipo ME	Todas	≤ 5.0 %	
Contenido de sulfatos (SO <sub>3</sub> )	Todos	Todas	≤ 4.0 %	
Oxido de Magnesio (MgO)	Todos excepto Tipo ME	Todas	≤ 6.0 %	

**Fuente:** Delgado, a partir de RTCR 479:2015

<sup>4</sup> Valor debe ser reportado bajo solicitud del cliente

<sup>5</sup> Valor debe ser reportado bajo solicitud del cliente

**Cuadro 2.2** Requisitos de resistencia a la compresión según clase de resistencia conforme al método ASTM C109 para cementos comercializados en Costa Rica

Clases de resistencia	Resistencia mínima a la compresión			
	MPa			
	1 día	3 días	7 días	28 días
17	-	-	7	17
21	-	5	11	21
25	-	11	18	25
28	-	13	20	28
AR (Alta Resistencia Inicial)	12	24	-	<sup>6</sup>

**Fuente:** Delgado, a partir de RTCR 479:2015

### 2.1.2 Agregado

Corresponde a un material granular (no necesariamente inerte) que ocupa la mayor parte de la mezcla de concreto o mortero; que se incorpora por razones de economía, resistencia y trabajabilidad (Muñoz, 2015). Las características de los agregados se agrupan en tres tipos según se muestra:

- Características físicas: Forma, textura y granulometría
- Características mecánicas: Tenacidad, abrasión y resistencia a la compresión
- Características químicas: Impurezas inorgánicas y reactividad

Continuando con lo anterior se tiene que un agregado para ser utilizado en la confección de concreto debe contar con las siguientes características: ser resistentes, duros (impacto), durables (abrasión), limpios, sin reactivos, con forma y textura apropiadas, y bien graduados (Muñoz, 2015). Esto último debido a que factores como la resistencia, textura, granulometría y tamaño máximo del agregado afectan el desarrollo de resistencia del concreto.

Según Muñoz (2015), los agregados pueden ser clasificados según:

- Procedencia: Naturales (río, tajo y mar) y Artificiales

<sup>6</sup> La resistencia mínima requerida a los 28 días puede ser acordada entre el proveedor y el comprador

- Tamaño máximo nominal<sup>7</sup>: Piedra bruta y bola (75 mm a 200 mm), tercera (37.5 mm), cuarta (25 mm), cuartilla (19 mm), polvo de mezcla (16 mm), quinta (12.7 mm), quintilla (9,5 mm) y Arena industrial (6 mm o 4.75 mm)
- División ASTM: Agregado grueso (se retiene en el tamiz N°4) y agregado fino (pasa el tamiz N°4 y se retiene en el tamiz N°200)
- Forma y textura: Angulosos (de forma cúbica: con caras fracturadas), redondeados (cantos rodados), planas (laminares) y aciculares
- Peso unitario masivo seco: Pesados, normales y livianos
- Composición mineralógica: Rocas Ígneas, Sedimentarias y Metamórficas

Normalmente los agregados se clasifican según la división ASTM, entendiéndose como agregado grueso al material granular que se retiene en la malla de 4.75 mm (N°4 ASTM) y agregado fino al material que pasa la malla de 4.75 mm (N°4 ASTM) y se retiene en la malla de 0.075 mm (N°200 ASTM). Generalmente estos están constituidos por<sup>8</sup>:

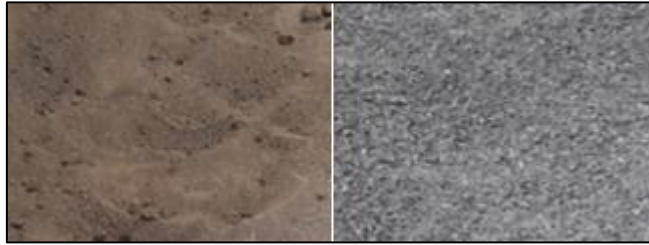
- **Grava**: Agregado grueso que resulta de la desintegración natural y de la abrasión de la roca o del procesamiento de conglomerado de adherencia débil.
- **Arena**: Comúnmente utilizado para el agregado fino que resulta de la desintegración natural y de la abrasión de la roca o del procesado de la piedra caliza deleznable.
- **Piedra triturada**: Producto del triturado industrial de rocas, piedras bola o de grandes pedruscos
- **Polvo piedra (arena manufacturada)**: Producto de la fragmentación de roca por trituración o por impacto. Los tamaños corresponden a la fracción que pasa la malla de 4.75 mm (N°4) y se retienen en la de 75 µm (N°200).

En Costa Rica, por ser un país con tierras relativamente jóvenes y de origen volcánico, las zonas donde se extraen los agregados tienen partículas con tipos muy variados de minerales; siendo las rocas ígneas las predominantes en el país. Entre sus características principales están: la ausencia de fósiles, vidrio presente y cristales entrelazados, estructura uniforme, color claro y medio, a la hora de triturarlas tienden a ser granos angulosos e irregulares, pueden tener minerales perjudiciales como el plagioclasas, k-feldespatos, anfíboles, piroxenos, olivinos, entre otros, los cuales pueden producir reacciones álcali-agregado,

<sup>7</sup> Mayor tamaño de malla donde queda retenido el material

<sup>8</sup> Definiciones según ASTM C-125 y ACI 116

meteorización e inestabilidad de taludes (Muñoz, 2015). En la **Figura 2.3** se presentan un ejemplo de los agregados utilizados en el desarrollo del proyecto.



**Figura 2.3** Ejemplo de agregados utilizados en el proyecto

### **Granulometría**

Se define como la distribución del tamaño de las partículas de un agregado, que se determina a través del análisis por tamices de malla de alambre con aberturas cuadradas, ordenadas de la abertura más grande a las más pequeña, las cuales son agitadas manual o mecánicamente hasta determinar la cantidad de agregado retenido en cada tamiz (Kosmatka et al., 2004).

Para el análisis del agregado grueso normalmente se ensaya con tamices que van desde aberturas de 100 mm hasta los 300  $\mu\text{m}$ , en tanto que el agregado fino se analiza con tamices de 9.5 mm hasta los 75  $\mu\text{m}$ . A partir de los resultados obtenidos de la granulometría se determinan los porcentajes que se retienen en cada malla y con ello se elabora una curva que explica la graduación del agregado. A esta gráfico se le denomina curva de granulometría del agregado, y es con esta, junto con el tamaño máximo nominal del agregado, que se determinan las proporciones de los agregados, la demanda de agua y cemento, la trabajabilidad, bombeabilidad, economía, porosidad, contracción y durabilidad del concreto (Kosmatka et al., 2004).

Para validar que el agregado a utilizarse en la elaboración de una mezcla de concreto presenta una graduación adecuada, y con ello asegurar un mayor acomodo de las partículas disminuyendo la cantidad de vacíos en la mezcla y aumentando el uso eficiente del concreto, se han desarrollado normas técnicas que indican diferentes rangos granulométricos que se deben cumplir de acuerdo al tamaño nominal máximo del agregado. Entre estas

especificaciones se encuentra la norma ASTM C33, con la cual se compararan los agregados utilizados en el proyecto a partir de la curva de granulometría, la cual deberá ser suave y continua, cumpliendo con los límites establecidos en la norma.

En lo que respecta al agregado fino, a partir de su análisis granulométrico, la norma ASTM C33 especifica otro requisito para el uso del material, el cual corresponde a límites para el módulo de finura. El módulo de finura (MF) corresponde a la suma de los porcentajes acumulados de la masa retenida en cada uno de los tamices de la serie especificada y dividiéndose por 100, donde la serie especificada de tamices para la determinación del módulo de finura va desde la malla No. 100 hasta la No. 4 en el agregado fino. El MF es un índice de finura del agregado, en el cual conforme sea mayor el módulo de finura más grueso es el agregado y viceversa (Kosmatka et al., 2004). Es una característica útil para estimar las proporciones de agregados finos y gruesos en el concreto, para el cual agregados con diferentes granulometrías podrían presentar el mismo MF. La degradación del agregado fino decrece el MF y aumenta la cantidad de materiales más finos que la malla No. 200. En el **Cuadro 2.3** se presenta la clasificación del agregado fino de acuerdo al módulo de finura.

**Cuadro 2.3** Clasificación del agregado fino según el módulo de finura

<b>Módulo de finura</b>	<b>Clasificación</b>
< 2.0	Muy fina
2.0 – 2.3	Fina
2.3 – 2.6	Medio fina
2.6 – 2.9	Media
2.9 – 3.2	Medio grueso
3.2 – 3.5	Gruesa
> 3.5	Muy gruesa

**Fuente:** Muñoz, 2015

Según la norma ASTM C33 el agregado fino que se emplee en la elaboración de concreto debe tener un módulo de finura cuyo valor no debe ser menor a 2.3 ni superior a 3.1. A partir de la clasificación mostrada, en el caso de una arena muy fina, la mezcla de concreto



demandará una mayor cantidad de agua y un mayor consumo de cemento; en tanto que una arena muy gruesa provocará una menor trabajabilidad del concreto fresco (Gómez, 2005).

Adicionalmente para el agregado grueso se debe considerar el tamaño máximo del agregado, ya que este influye en la economía del concreto (se requiere más agua y cemento en concretos con agregado grueso de tamaño máximo menor) (Kosmatka et al., 2004). Se tiene que para concretos los agregados pequeños proveen un uso más eficiente del cemento, y la unión desarrollada entre el agregado grueso y la pasta debido al incremento en el área superficial provista generan una mayor resistencia del concreto (Gómez, 2005).

Cabe destacar que muchas veces, esencialmente cuando se trata de cumplir las especificaciones indicados en una norma para la granulometría, se utilizan combinaciones de agregados provenientes de diferentes fuentes.

### **Forma y textura superficial de las partículas**

Se debe considerar que la forma y la textura son características, principalmente del agregado grueso, que influyen en las propiedades del concreto fresco y del concreto endurecido. Para identificar el tipo de forma que respecta a un agregado en estudio se pueden utilizar los siguientes criterios (Muñoz, 2015):

- Angulosos: Presentan ángulos, caras fracturadas, aristas vivas y superficies más o menos planas, procedentes generalmente de trituraciones.
- Redondeadas: Superficies suaves y lisas sin discontinuidades. Generalmente procedentes de ríos.
- Laminares: Predominan dos dimensiones sobre la tercera, agregados planos y delgados.
- Aciculares: Predomina una dimensión sobre las otras dos dando lugar a agregados en forma de agujas, elongados y delgados.

Las partículas con texturas ásperas, angulares o elongadas requieren más agua para producir un concreto trabajable que agregados lisos, redondeados y compactos, además que las partículas de agregados angulares requieren más cemento para mantener la misma relación agua – cemento (Kosmatka et al., 2004). Aun con lo anterior, se ha demostrado que con una

granulometría satisfactoria tanto los agregados triturados como los no triturados producen concretos con la misma resistencia, si se mantiene el contenido de cemento.

En relación con la resistencia a la compresión del concreto, la adherencia debe ser considerada al seleccionar el agregado, ya que entre la pasta de cemento y un determinado agregado generalmente la adherencia aumenta con el cambio de partículas lisas y redondeadas por las ásperas y angulares (Kosmatka et al., 2004). Adicionalmente se debe considerar que los vacíos entre partículas de agregados aumentan con la angularidad del agregado, incrementando la demanda de agua y cemento.

Según Muñoz (2015) la mejor adherencia entre la pasta y los agregados, sin sacrificar la trabajabilidad de la mezcla, ni producir altos incrementos en el consumo del cemento, convierten al agregado anguloso en el ideal para la elaboración de mezclas de concreto.

Al seleccionar el agregado se debe tomar en consideración que el mismo debe ser relativamente libre de partículas planas y elongadas, ya que estas en el concreto fresco dificultan el mezclado, el acabado y la vibración, incrementan el requerimiento de pasta y agua, y aumentan el porcentaje de vacíos, en tanto que en el concreto endurecido aumentan la permeabilidad, y reducen la resistencia y la durabilidad (Muñoz, 2015). Por lo anterior las partículas planas y elongadas se deben evitar o limitar cerca del 15 % de la masa total del agregado.

### **Peso unitario y vacíos**

Es la masa o peso de un agregado necesario para llenar un recipiente con un volumen unitario especificado, siendo este volumen ocupado por el agregado en estudio y los vacíos entre las partículas (Kosmatka et al., 2004). También se le conoce como densidad masiva.

Con base en el peso unitario masivo seco (material seco hasta obtener una masa constante) y en lo expuesto, se entiende como agregados pesados aquellos con un peso mayor a los  $1900 \text{ kg/m}^3$ , agregados normales los que presentan un peso entre  $1120 \text{ kg/m}^3$  y  $1900 \text{ kg/m}^3$ , y agregados livianos los que tienen un peso inferior a los  $1120 \text{ kg/m}^3$  (Muñoz, 2015). La

densidad masiva de un agregado depende del tamaño, distribución y forma de las partículas del agregado.

Respecto al porcentaje de vacíos, se tiene que este varía entre un 30 % y un 45 % para el agregado grueso, y cerca de un 40 % a 50 % en agregado fino (Kosmatka et al., 2004). Tal como se señaló anteriormente, la angularidad del agregado aumenta los vacíos entre partículas, en tanto que un agregado bien graduado disminuyen el contenido de vacíos. La cantidad de vacíos afecta la cantidad de pasta en el diseño de mezcla.

Para analizar la densidad masiva de un agregado normalmente se emplea al procedimiento descrito en la norma ASTM C29, en la cual se describen tres métodos para la consolidación del agregado: el varillado, el sacudido y el suelto (vaciado con pala). Entiéndase como condición suelta aquella en la que el agregado se vacía en el recipiente sin ninguna acción adicional sobre el agregado, en tanto que la condición varillada responde a cuando el material es colocado en el recipiente en diferentes capas, cada una compactada por medio de una varilla redondeada dentro del recipiente (ASTM C29, 2017).

### **Peso específico y densidad**

El peso específico o densidad relativa se define como la relación entre la masa de un agregado y la masa del agua con el mismo volumen absoluto (Kosmatka et al., 2004). Es una característica que se usa principalmente para cálculos de proporcionamiento y control de mezclas de concreto, no como una medida de la calidad de agregado, aun cuando agregados con baja gravedad específica exhiben deterioros acelerados debido a su porosidad.

La densidad relativa de la mayoría de agregados varía de 2.4 a 2.9 (Kosmatka et al., 2004), siendo este el valor que se multiplica por la densidad del agua para determinar la densidad del agregado (la cual no incluye los vacíos entre partículas). Para la determinación de las características mencionadas del agregado normalmente se emplean las normas ASTM C127 (agregado grueso) y ASTM C128 (agregado fino), en las cuales se presentan valores más precisos de la densidad del agua, así como los procedimientos para determinar la absorción, la densidad relativa aparente, el peso específico bruto seco y el peso específico saturado con superficie seca del agregado objeto de estudio.

## **Absorción y humedad superficial**

La absorción se define como el aumento en la masa de un cuerpo sólido poroso, como resultado de la penetración de un líquido dentro de sus poros permeables y se determina mediante la inmersión de una muestra de material en agua (Gómez, 2005). La absorción y la humedad superficial de los agregados se deben determinar de acuerdo a procedimientos normados para poder controlar el agua total que se adicionará en la elaboración de una mezcla de concreto y determinar las masas correctas de los materiales. Las condiciones de humedad de los agregados se pueden definir como (Kosmatka et al., 2004):

- Secado al horno: Totalmente absorbente
- Secado al aire: La superficie de las partículas está seca, pero su interior contiene humedad y, por lo tanto, aun es ligeramente absorbente
- Saturado con superficie seca (SSS): No absorben ni ceden agua al concreto
- Húmedos:: Contiene un exceso de humedad sobre la superficie (agua libre)

Los agregados gruesos tienen niveles de absorción que varían del 0.2 % al 4 %, en tanto que en el agregado fino generalmente varían del 0.2 % al 2 %. Los contenidos de agua libre en los agregados grueso y fino varían del 0.5 % al 2 % y del 2 % al 6 % respectivamente (Kosmatka et al., 2004).

Gómez (2005) señala que entre más seco se encuentre el agregado al elaborar una mezcla de concreto, es posible que las partículas se cubran rápidamente con cemento, lo cual impide que el agua sature el agregado, dando como resultado que se deba emplear una mayor cantidad de agua a la determinada en el diseño de mezcla (afectando la resistencia y trabajabilidad del concreto) y que tomará más tiempo llegar al punto de saturación del agregado. Asimismo destaca que para agregados con una mayor porosidad, la pasta es capaz de imbuirse dentro del agregado dando lugar a un mayor agarre entre la pasta y el agregado.

Otro aspecto que se debe tomar en consideración respecto a la humedad del agregado fino es el abundamiento o hinchamiento, el cual corresponde al aumento del volumen total del agregado fino húmedo con relación a la misma masa seca, esto debido a la tensión superficial en el agua que mantiene las partículas separadas, resultando en un aumento del

volumen (Kosmatka et al., 2004). El hinchamiento del agregado fino varía con el contenido de humedad y la granulometría del agregado, donde el agregado más fino se hincha más. Debido a que a la hora de elaborar una mezcla de concreto el agregado se encuentra normalmente húmedo, se considera una buena práctica la dosificación y diseño de mezcla por masa, así como el ajuste por humedad.

### **Resistencia al desgaste por abrasión**

Gómez (2005) señala que la abrasión constituye una forma indirecta de medir la capacidad del agregado a resistir cargas de compresión, resultando esencial cuando el agregado se usará en un concreto sujeto al desgaste, como en pisos industriales, sometidos a alto tránsito y aquellos expuestos al paso constante de fluidos.

El ensayo más común para la determinación de la resistencia a la abrasión del agregado grueso es el ensayo de abrasión Los Ángeles, en el cual una cantidad especificada de agregado se coloca en un tambor de acero que contiene esferas de acero, se gira y se mide el porcentaje de material desgastado (Kosmatka et al., 2004). La pérdida de masa que se da en el tambor es generalmente semejante a aquella de la abrasión, aunque la resistencia al desgaste del concreto se determina más precisamente por la abrasión del propio concreto, ya que se ha demostrado que generalmente no existe una relación clara entre la resistencia a la abrasión del agregado y la resistencia a la abrasión de un concreto producido con el mismo agregado.

La resistencia a la abrasión (desgaste) de un agregado frecuentemente se emplean como un índice de la calidad del agregado grueso en estudio (Kosmatka et al., 2004). Para concretos normales se recomienda que aquellos agregados que al ser ensayados en la máquina de Los Ángeles presentan más del 50 % de material desgastado sean descartados para la elaboración de concreto, límite establecido en la norma ASTM C33, en tanto que para concretos sometidos a desgaste severo el límite es de 40 %. Muñoz (2015) indica que existen estudios que recomienda un valor de 25 % cuando el agregado ha de usarse en concretos de mediana resistencia.

## **Materiales contaminantes**

Las sustancias perjudiciales que puedan estar presentes en los agregados incluyen impurezas orgánicas, limo, arcilla, esquisto, óxido de hierro, carbón mineral, lignito y ciertas partículas ligeras y suaves (Kosmatka et al., 2004). Son considerados potencialmente peligrosos aquellos agregados que contienen compuestos considerados químicamente reactivos con el concreto de cemento y si producen algún cambio significativo del volumen de la pasta, agregados o ambos; interfieren en la hidratación del cemento y producen otros productos secundarios dañinos.

En el caso de las impurezas orgánicas, estas pueden retrasar el fraguado y el endurecimiento del concreto, reducir el desarrollo de la resistencia del concreto y causar deterioro. Algunas impurezas orgánicas que no son tan perjudiciales pero se deben evitar son las turbas, los humus y las mangas orgánicas (Kosmatka et al., 2004).

Asimismo deben considerarse los materiales más finos que 75  $\mu\text{m}$ , especialmente el limo y la arcilla, ya que estos pueden originar un revestimiento en las partículas de agregados, el cual puede debilitar la adherencia entre la pasta de cemento y el agregado; así como aumentar significativamente la demanda de agua (Kosmatka et al., 2004).

Para determinar la presencia de impurezas orgánicas en el agregado fino se emplean el procedimiento prescrito en la norma ASTM C40, en el cual se aplica la prueba de colorimetría y se compara el color de la muestra con los estándares indicados en la misma norma. Para evaluar la cantidad de material más fino que el tamiz No. 200 (75  $\mu\text{m}$ ), se aplica el procedimiento ASTM C117, y se compara contra los límites indicados en la norma ASTM C33, en la cual se expone que el material más fino que la malla No. 200 no debe ser superior al 1 % en el agregado grueso y 5 % en el agregado fino.

### **2.1.3 Agua**

Es otro constituyente fundamental para elaborar una mezcla de concreto (entre el 14 % y el 21 % del volumen del concreto recién mezclado), el cual resulta indispensable para que se lleve a cabo la hidratación del cemento (reacción entre el agua y el cemento) y se provea una trabajabilidad adecuada a la mezcla (Gómez, 2005). Como regla general se tiene que esta

deberá ser potable y no presentar sabor ni olor para su utilización en la elaboración del concreto (con pH de 6.5 a 8.5). Sin embargo, Kosmatka et al. (2004) señalan que también se pueden usar algunas aguas que no se consideran potables en el concreto.

Elizondo (2013) indica que la cantidad de agua usada con relación con la cantidad de cemento para la fabricación de concreto, es el elemento más determinante en la resistencia última del concreto endurecido, por encima de los materiales constituyentes y las condiciones de curado. Además expone que cuando se utiliza más agua de la necesaria la calidad de la pasta disminuye y por ende la resistencia del concreto.

Cuando la mezcla de concreto se puede compactar apropiadamente, liberando el aire atrapado y reduciendo los vacíos, logrando un concreto más denso, resistente y durable, se define que algunas de las ventajas de la disminución de la cantidad del agua en la mezcla son (Elizondo, 2013):

- Aumento de la resistencia a la compresión y de la resistencia a la flexión
- Disminución de la permeabilidad y la absorción, aumento de la hermeticidad
- Aumento de resistencia a la intemperie
- Reducción de la contracción y la fisuración. Menores cambios de volumen por el humedecimiento y el secado

Una mayor cantidad de agua mejorará la trabajabilidad de la mezcla pero reducirá la resistencia esperada del concreto. Relaciones de agua – cemento cercanas a 0.4 favorecen la resistencia pero son poco trabajables dificultando el mezclado, la colocación y compactación del concreto, en tanto que relaciones superiores a 0.6 darán concretos muy trabajables pero de poca resistencia.

Aunque una práctica común para determinar que el agua para la elaboración de concreto es adecuada, es consumir agua potable; cuando existan dudas de la calidad del agua se debe verificar que la cantidad permisible de sulfatos, álcalis, cloruros y dióxido de carbono disuelto no se exceda (por ejemplo con especificaciones en la norma ASTM C94), esto porque la resistencia del concreto y la adherencia entre la pasta y el agregado se pueden alterar debido a la presencia de sustancias dañinas (Kosmatka et al., 2004).

Gómez (2005) menciona que el agua con que se curan los especímenes o elementos de concreto debe ser de características similares al agua de mezclado.

#### **2.1.4 Materiales cementantes suplementarios**

Estos corresponden a la ceniza volante, la escoria granulada de alto horno, el humo de sílice (sílice activa, micro sílice) y las puzolanas naturales (arcilla calcinada, esquisto calcinado o metacaolinita), que usados conjuntamente con el cemento portland contribuyen a la mejoría de las propiedades del concreto endurecido, debido a sus propiedades hidráulicas (Kosmatka et al., 2004).

A continuación se presenta la definición de los materiales cementantes suplementarios (Kosmatka et al., 2004):

- Ceniza volante: Es un subproducto de la combustión del carbón pulverizado en plantas generadoras de electricidad. Es básicamente un vidrio de silicato que contiene sílice, alúmina, hierro y calcio, con una menor proporción de magnesio, azufre, sodio, potasio y carbono; compuesta por partículas con un tamaño típico de 20 micrómetros y su color general es gris.
- Escoria: Se produce de la escoria siderúrgica de alto horno. Es desarrollada por el estado fundido simultáneamente con el acero en un alto horno, donde la escoria se hidrata y endurece de una manera similar al cemento portland.
- Humo de sílice: Es un subproducto de la reducción del cuarzo de alta pureza con carbón en hornos eléctricos durante la producción de liga de silicio o ferrosilicio. Es básicamente dióxido de silicio en una forma no cristalina, presenta una forma esférica y un diámetro promedio de 0.1 micrómetros.
- Puzolanas naturales: Corresponde a materiales procesados, tratados por altas temperaturas en hornos y molidos hasta que se transformen en polvo fino, incluyendo arcillas calcinadas, esquisto calcinado y metacaolinita.

Seguidamente se presentan las propiedades del concreto que se ven afectadas por los materiales cementantes suplementarios (Kosmatka et al., 2004):



**Demanda de agua:** Las mezclas de concreto que contienen ceniza volante o escoria de horno reducen su requerimiento de agua del 1 % al 10 % dependiendo de la dosis; el humo de sílice aumenta la demanda de agua y la presencia de puzolanas como arcillas calcinadas o esquistos calcinados tienen poco efecto sobre la demanda de agua.

**Trabajabilidad:** La ceniza volante, escoria, arcilla calcinada y esquisto calcinado normalmente mejoran la trabajabilidad de concretos con el mismo asentamiento (revenimiento).

**Sangrado y segregación:** Los concretos con ceniza volante o humo de sílice normalmente presentan menos sangrado (exudación) y segregación que el concreto normal; la escoria molida tiende a presentar un aumento de la tasa como de la cantidad de sangrado sin tener ningún efecto adverso sobre la segregación; la presencia de arcilla calcinada, el esquisto calcinado y la metacaolinita tienen poca influencia sobre el sangrado.

**Contenido de aire:** La adición de ceniza volante o humo de sílice en concretos sin aire incluido normalmente reduce la cantidad de aire atrapado; las características de retención de aire de concretos conteniendo escorias o puzolanas son similares a las mezclas producidas con cemento portland.

**Tiempo de fraguado:** El uso de ceniza volante o escoria granulada de alto horno molida normalmente retarda el tiempo de fraguado; las arcillas y esquistos calcinados tienen poco efecto sobre el tiempo de fraguado.

**Acabado:** El concreto que contiene materiales cementantes suplementario se puede acabar de manera igual o más fácil que el concreto sin material cementante suplementario.

**Fisuración:** El concreto con humo de sílice puede presentar un aumento de la fisuración por contracción plástica, puzolanas y escorias tienen poco efecto sobre el agrietamiento por contracción plástica.

**Curado:** Los efectos de las condiciones de temperatura y humedad, sobre las propiedades de fraguado y desarrollo de resistencia de los concretos con materiales suplementarios son similares a sus efectos sobre el concreto producido sólo con cemento portland.

**Resistencia a la compresión:** Los materiales cementantes suplementarios son esenciales para la producción de los concretos de alta resistencia; la ceniza volante, escoria granulada de alto horno, la arcilla calcinada, la metacaolinita, el esquisto calcinado y el humo de sílice contribuyen al aumento de la resistencia del concreto. Se debe considerar que la resistencia del concreto con estos materiales puede ser tanto mayor como menor que la resistencia del concreto que contenga sólo cemento portland.

**Resistencia a la abrasión:** Los concretos que contienen materiales cementantes suplementarios son tan resistentes a la abrasión como un concreto de cemento portland sin materiales cementantes suplementarios.

### **2.1.5 Aditivos**

Se trata de un material diferente del agua, agregados y cemento hidráulico que se utiliza como componente del concreto o mortero y se agrega a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado (ASTM C-125, 2016).

Debido a que en el presente proyecto no se utilizaron aditivos para la elaboración de las mezclas de concreto no se expondrá con detalle la teoría relacionada a estos.

## **2.2 Factores que inciden en la calidad del concreto**

Son características importantes a considerar en la elaboración del concreto, su grado de compactación (acomodo de las partículas de los elementos constituyentes en la mezcla de concreto), su trabajabilidad (facilidad con la cual puede ser moldeada la mezcla) y su durabilidad (capacidad para resistir las acción del medio ambiente); puesto que a la larga estas características determinarán la calidad del concreto elaborado. Por supuesto, sin dejar de lado los aspectos económicos.

Para estudiar los factores que inciden en la calidad del concreto, se deben atender las propiedades tanto del concreto fresco como del concreto endurecido, por lo que en esta sección se describen los factores que influyen en el desarrollo de la resistencia del concreto para las fases mencionadas, así como propiedades de relevancia para comprender la naturaleza del concreto y su posible comportamiento ante diferentes condiciones.

### **2.2.1 Concreto fresco**

Corresponde a la condición en la cual la mezcla de los materiales constituyentes se encuentra en estado semifluido (plástico) y es capaz de ser moldeada. Es un material de consistencia blanda, en el cual todos los granos de arena y la piedra son envueltos y sostenidos en suspensión, y la pasta de concreto fluye lentamente sin segregarse (Kosmatka et al., 2004). En la **Figura 2.4** se presenta un ejemplo de concreto fresco de una de las mezclas elaboradas en el desarrollo del proyecto.



**Figura 2.4** Ejemplo de concreto fresco elaborado en el proyecto

### **Mezclado**

Al elaborar mezclas de concreto se busca que la combinación de los elementos constituyentes (cemento, agregados y agua) sea homogénea, esto para obtener un concreto uniforme. La secuencia de carga, el volumen de concreto mezclado en relación con el tamaño del tambor de la batidora, el tiempo transcurrido entre el proporcionamiento y el mezclado, las características de la mezcladora son factores importantes en el mezclado (Kosmatka et al., 2004).

Por lo anterior, el uso de mezcladoras aprobadas, correctamente operadas (a partir de un procedimiento normado como el indicado en ASTM C31 o C192) y conservadas garantiza un intercambio adecuado entre los componentes del concreto mientras este se mezcla.

### **Trabajabilidad y consistencia**

La trabajabilidad se entiende como la facilidad para mezclar, transportar, depositar, consolidar sin producir segregación y dar acabado a una mezcla de concreto (Muñoz, 2015), y está relacionada con el trabajo que se debe hacer para vencer la fricción que existe en el concreto al compactarse. La trabajabilidad se afecta por el contenido de agua, ya que este determina la fluidez de la mezcla, pero también en menor medida por lo agregados finos (Orchard, 1973).

Otros de los factores que influyen en la trabajabilidad del concreto son el método y la duración del transporte, cantidad y características de los materiales cementantes, el aire incluido, la temperatura del aire y el concreto, y el uso de aditivos (Elizondo, 2013). Se destaca que la distribución uniforme de las partículas, así como una temperatura constante superior a los 20 °C ayudan considerablemente en el control de la segregación y en la mejoría de la trabajabilidad (Kosmatka et al., 2004).

Para cuantificar la fluidez de la mezcla se recurre a la medición de su consistencia, para lo cual normalmente se realiza la prueba de asentamiento (revenimiento) en concreto fresco según la norma ASTM C143. Se tiene que un concreto de bajo revenimiento es una mezcla que puede presentar problemas en la colocación y compactación ya que es rígida y seca, en tanto que en un concreto muy húmedo puede ocurrir la segregación del agregado grueso aun después de la compactación (Kosmatka et al., 2004). Por lo anterior se debe procurar mantener una consistencia lo suficientemente seca para que se permita la colocación del concreto fresco sin esfuerzo excesivo en la consolidación y sin producir segregación del agregado.

Según Gómez (2005) es recomendable que los agregados cumplan con una serie de características referentes a tamaño máximo, granulometría, forma y textura para asegurar una apropiada trabajabilidad del concreto fresco. Indica que los agregados no debe tener un

tamaño máximo superior a los 37.5 mm, y es conveniente la inclusión de partículas que pasan el tamiz No. 50 (0.30 mm) ya que funcionan como lubricantes de la mezcla, con el cuidado de no excederse en la cantidad de finos puesto que requieren una mayor cantidad de agua para mantener la trabajabilidad. Por último señala que el uso de aditivos también puede mejorar la trabajabilidad del concreto fresco, en especial los aditivos inclusores de aire.

### **Segregación y sangrado**

El sangrado (exudación) es el desarrollo de una lámina de agua en la superficie del concreto recién colocado y es causada por la sedimentación de las partículas sólidas (segregación) y simultáneamente la subida del agua hacia la superficie (Kosmatka et al., 2004). Corresponde a un proceso normal en el concreto el cual no debería disminuir la calidad del concreto, si este fue colocado, acabado y curado adecuadamente. Por otro lado, en caso que el sangrado sea excesivo, puede ocurrir una capa superficial débil y con poca durabilidad, alterando la resistencia del concreto y aumentando la relación agua – cemento.

El sangrado termina cuando el concreto a rigidizado lo suficiente para que se detenga el proceso de sedimentación, siendo las principales causas el mal amarre entre los componentes del concreto, exceso de agua en la mezcla, exceso de vibrado y malas prácticas de manipuleo y colocación (González, 2004). La capacidad de sangrado y la tasa de exudación aumentan con la cantidad inicial de agua, altura del elemento de concreto y presión, donde el uso de agregados de granulometría adecuada, ciertos aditivos, aire incluido, materiales cementantes suplementarios y cementos más fino reducen el sangrado (Kosmatka et al., 2004).

Gómez (2005) señala que la sedimentación es un inconveniente porque deja agua y aire atrapados bajo partículas de mayor tamaño, en detrimento de la calidad del concreto, puesto que se produce una distribución no uniforme de los componentes, reducción de la resistencia y una pérdida de la adherencia.

## **Consolidación**

La compactación del concreto recién mezclado es una acción que permite mover las partículas de la mezcla, reduce la fricción entre ellas y les da la movilidad de un fluido denso (Kosmatka et al., 2004). Esta acción permite el uso de mezclas más rígidas con mayores proporciones de agregado grueso y menores de agregado fino, lo cual repercute en el uso de menos agua y cemento.

Elizondo (2013) destaca que una adecuada granulometría de los componentes del concreto ayuda a la colocación y compactación del mismo, lo cual se refleja en una mejoría a la durabilidad, calidad y economía del concreto, y que en caso contrario, una mala contracción produce concretos débiles, porosos y poco durables, así como la corrosión temprana del refuerzo.

## **Hidratación, tiempo de fraguado y endurecimiento**

Las reacciones químicas entre el cemento y el agua son conocidas como hidratación, siendo las principales responsables de la calidad de unión (adherencia) de la pasta de cemento (Kosmatka et al., 2004). El silicato tricálcico ( $C_3S$ ), silicato bicálcico ( $C_2S$ ), aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) y aluminoferrita tetracálcica ( $C_4AF$ ) son los compuestos principales del cemento que desempeñan un papel importante en el proceso de hidratación (Elizondo, 2013).

Al hidratarse el cemento los silicatos de calcio reaccionan con el agua para formar hidróxido de calcio (CH) y silicato de calcio hidratado ( $C_3S_2H_3$ ), siendo este último sin duda el más importante compuesto del concreto, ya que el fraguado y endurecimiento, resistencia y estabilidad dimensional del concreto dependen principalmente del silicato de calcio hidratado (Kosmatka et al., 2004).

El fraguado se refiere a un proceso en el que la mezcla de concreto pierde fluidez, ganando rigidez y resistencia, dependiendo principalmente de las propiedades del cemento, como lo son la finura, compuestos del cemento y cantidad empleada (Gómez, 2005). Adicionalmente la inclusión de materiales cementantes como lo son la ceniza volante, puzolanas y escorias de alto horno provocan el retardo del tiempo de fraguado del concreto (González, 2004), en

tanto que el uso de aditivos, cantidad de agua adicionada y temperatura de los materiales son otros factores que influyen en el tiempo de fraguado.

Se tiene que cuanto menos porosa sea la pasta de cemento, más resistente será el concreto, por lo que al mezclarse el concreto no se debe utilizar una cantidad de agua más de la necesaria para obtener un concreto plástico y trabajable (Kosmatka et al., 2004). Al hidratarse el cemento, la reacción inicial debe ser lo suficientemente lenta para poder transportar, colocar y acabar el concreto, a partir de esto es deseable un endurecimiento rápido de la mezcla (siendo el yeso incorporado al cemento el regulador del fraguado inicial del cemento).

Elizondo (2013) expone que cuando el concreto se encuentra en estado endurecido, la resistencia es aportada por las partes sólidas de la pasta (sobre todo en el silicato de calcio hidratado y en los compuestos cristalinos), y que los poros llenos de agua y aire presentes no aportan ninguna resistencia. Asimismo destaca que es ventajoso conocer la cantidad de calor liberado por la hidratación del cemento, ya que a partir de esto se pueden tomar decisiones de acuerdo a las condiciones climatológicas en las que se elaborará el concreto.

### **Contracción**

A la disminución de altura de la superficie del concreto desde el momento de la colocación hasta el inicio de fraguado debido a que toda el agua de sangrado se ha evaporado se le conoce como contracción por sedimentación (Kosmatka et al., 2004).

La contracción plástica se origina cuando el concreto presenta una temperatura elevada, se da la presencia de una baja humedad ambiental y vientos fuertes; produciendo una evaporación acelerada de la humedad en la superficie del concreto y dando origen a grietas. Las grietas de este tipo de contracción aparecen cuando el agua se evapora antes de que aparezca el agua del sangrado y es muy común en climas cálidos (González, 2004).

La contracción en el concreto fresco puede ocasionar el desarrollo de esfuerzos de tensión en la superficie del concreto, dando como resultados grietas cortas e irregulares (Gómez, 2005). Algunas de las recomendaciones para reducir o evitar los efectos ocasionados por la

contracción del concreto fresco son mantener contralada la temperatura de los agregados y el agua de mezclado, usar cubiertas para proteger el concreto y humedecer ligeramente los agregados secos y absorbentes (González, 2004).

### **2.2.2 Concreto endurecido**

Corresponde al estado en el cual el cemento, agregado y el agua se han sumado para producir un material homogéneo, rígido y capaz de resistir diferentes tipos de cargas, el cual se forma una vez que la mezcla ha completado su fraguado (Gómez, 2005). En la **Figura 2.5** se presenta un ejemplo de concreto endurecido de una de las mezclas elaboradas en el desarrollo del proyecto.



**Figura 2.5** Ejemplo de concreto endurecido elaborado en el proyecto

### **Curado**

Corresponde a la manutención de la temperatura y del contenido de humedad apropiados desde el momento de colocación y el acabado del concreto; el cual determinará el aumento de la resistencia en función del tiempo del concreto según: la cantidad de cemento no hidratado aun presente en la mezcla, las condiciones de humedad (el concreto permanezca húmedo o con una humedad relativa del aire mayor al 80 %), la temperatura del concreto



(debe permanecer favorable) y el espacio inter-particular (deber haber suficiente espacio para la formación de los productos de la hidratación del cemento) (Elizondo, 2013).

En la medida que se prolongue el curado del concreto, los procesos de hidratación continuarán contribuyendo con el cierre de poros que dará lugar a concretos más densos y, por ende, más resistentes, estables y durables. Kosmatka et al. (2004) señalan que las temperaturas más frías en el curado del concreto resultan en resistencias tempranas menores y resistencias mayores a edades avanzadas, en tanto que la resistencia del concreto aumentará si se mantienen una adecuada humedad y temperatura en la hidratación del cemento.

Aunque si después de un período de secado se vuelve a saturar el concreto (provocando que la hidratación comience de nuevo aumentando la resistencia), se recomienda que el proceso de curado sea continuo hasta que el concreto alcance la resistencia deseada, puesto que resulta muy difícil que el concreto vuelva a desarrollar resistencia una vez que se ha secado (Kosmatka et al., 2004).

### **Velocidad de secado**

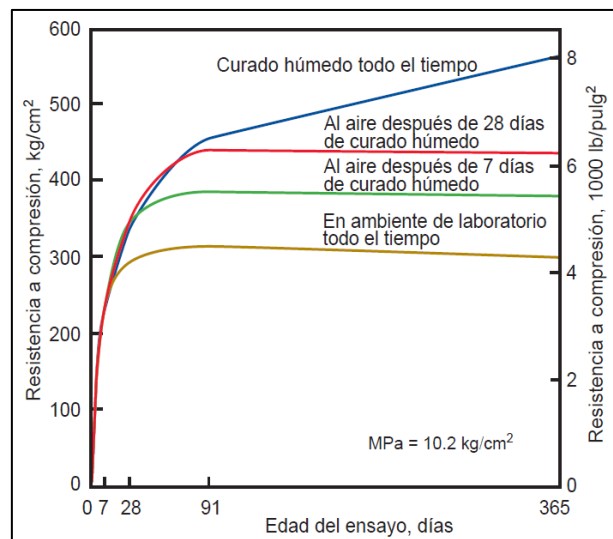
Los concretos recién colocados normalmente tienen abundancia de agua, pero a medida que el secado progresa de la superficie hacia el interior del concreto, el endurecimiento y aumento de resistencia continua sólo en aquellas profundidades del concreto en las que la humedad relativa permanezca arriba del 80 % (Kosmatka et al., 2004). Se debe recordar que es por medio de la hidratación del concreto, o más precisamente del cemento incorporado, que la mezcla se endurece y gana resistencia.

Al secarse la mezcla de concreto la ganancia de resistencia cesa debido a que el proceso de hidratación del cemento se detiene, lo cual no sugiere que las propiedades físicas deseables del concreto se han alcanzado (Elizondo, 2013). La cantidad de humedad en el concreto depende de sus componentes, cantidad original de agua, condiciones de secado y el tamaño y forma del miembro de concreto.

Además de la resistencia, otras propiedades del concreto que se ven afectadas por la cantidad de humedad son la elasticidad, fluencia, resistencia al fuego, resistencia a la abrasión, conductividad eléctrica, valor de aislamiento, resistencia al congelamiento, resistencia al descaramiento y resistencia a reactividad álcali-agregado (Kosmatka et al., 2004). De igual manera se debe tomar en cuenta que la contracción por secado es la causa principal de fisuramiento del concreto, y el ancho de estas fisuras es función de la velocidad de desecación (Elizondo, 2013).

### Resistencia a la compresión

Se define como la medida máxima de la resistencia a carga axial de especímenes de concreto, la cual normalmente se expresa en kilogramos por centímetros cuadrados ( $\text{kg/cm}^2$ ), megapascales (MPa) o en libras por pulgadas cuadradas (psi) a una edad de 28 días (Kosmatka et al., 2004). También se debe considerar, que aparte de la resistencia a la compresión, los concretos poseen resistencia a la tracción y flexión, así como a la torsión y al cortante. El comportamiento general de desarrollo de resistencia del concreto para diferentes condiciones de curado se presenta en la **Figura 2.6**.



**Figura 2.6** Desarrollo de resistencia del concreto para diferentes condiciones de curado  
**Fuente:** Kosmatka et al., 2004

Aunque se pueden usar otras edades para las pruebas, se considera importante conocer la relación entre la resistencia a los 28 días y la resistencia en otras edades (Kosmatka et al.,

2004). Normalmente se estima que la resistencia a los 7 días representa un 75 % de la resistencia a los 28 días, y la resistencia a los 56 días es aproximadamente 10 % mayor que la resistencia a los 28 días. La resistencia a compresión especificada se designa como  $f'_c$ , y la resistencia a compresión real del concreto  $f_c$  debe excederla.

La resistencia a la compresión que el concreto logra ( $f_c$ ) es función de la relación agua – cemento, de cuanto la hidratación ha progresado, del curado, de las condiciones ambientales y de la edad del concreto (Kosmatka et al., 2004). Estos factores también afectan la resistencia a flexión y tracción, así como la adherencia entre el concreto y el acero.

La determinación de la resistencia a la compresión se obtiene a través de ensayos en probetas de concreto o mortero, donde generalmente los ensayos en mortero se hacen en cubos de 50 mm, mientras que los ensayos en concreto se realizan en cilindros de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura, aunque cilindros menores de 100 mm x 200 mm también se pueden usar para el concreto (Kosmatka et al., 2004). Los especímenes de concreto empleados para la medición de la resistencia a la compresión pueden provenir de mezcla hecha en el campo o laboratorio, o pueden ser núcleos extraídos de obras ya construidas (Gómez, 2005).

La resistencia a la compresión es una propiedad principalmente mecánica y frecuentemente usada en los cálculos para diseño de diferentes tipos de estructuras, donde los concretos para uso general tienen una resistencia a la compresión entre 20 MPa y 40 MPa (Kosmatka et al., 2004).

Gómez (2005) señala que una mezcla pobre es aquella que utiliza la mayor cantidad de agregados y la menor cantidad de cemento, por lo que es poco fluida, con lo que se tiene una baja relación agua – cemento y una mayor resistencia. Asimismo indica que las propiedades principales de los agregados que tienen influencia sobre la resistencia del concreto son la forma, textura, tamaño, granulometría y calidad química y mecánica, tal como se señaló previamente.

Para resistencia no mayores a los 35 MPa, la calidad mecánica del agregado grueso no se considera determinante, ya que el agregado grueso suele estar compuesto por partículas de rocas cuyas resistencias a compresión exceden los 70 MPa, siendo esta una resistencia superior a la de la pasta (Gómez, 2005). También se debe considerar el contenido de aire, puesto que porcentajes de aire atrapado entre el 2 % y el 5 % del volumen total del concreto pueden reducir del 10 % al 30 % la resistencia a compresión del concreto (Muñoz, 2015).

### **Densidad**

El concreto convencional, normalmente utilizado en edificios y otras estructuras, tiene una densidad entre 2200 kg/m<sup>3</sup> a 2550 kg/m<sup>3</sup> (Muñoz, 2015). La masa volumétrica del concreto varía dependiendo de la cantidad y densidad del agregado, la cantidad de aire atrapado o intencionalmente incluido, y la cantidades de agua y cemento, mismos que se ven influenciados por el tamaño máximo del agregado (Kosmatka et al., 2004). Entre los procedimientos empleados para la determinación de la densidad, la norma ASTM C138 describe un procedimiento para determinar la densidad del concreto fresco, en tanto que la norma ASTM C39 indica pautas para medir la densidad del concreto endurecido.

### **Resistencia a la abrasión**

Es la capacidad que tiene una superficie de concreto para resistir fricciones o frotaciones (Orchard, 1973). Debido a que existen diversas formas de abrasión, no se ha encontrado un método estándar que contemple todas las formas (Gómez, 2005).

Se ha determinado que la resistencia a la abrasión del concreto está en función de la resistencia a la compresión, las propiedades del agregado, el acabado y el curado, demostrándose que es la resistencia a la compresión del propio concreto el factor que más controla la resistencia a la abrasión, donde a mayor resistencia a la compresión mayor es la resistencia al desgaste (Gómez, 2005). Como la resistencia a la compresión depende de la relación agua – cemento y el curado, una relación agua – cemento baja y un curado adecuado se hacen necesarios para la resistencia a la abrasión (Kosmatka et al., 2004).

En segundo orden, se tiene que la resistencia a la abrasión de los agregados en la superficie del concreto también influyen sobre la capacidad al desgaste del concreto, donde el efecto de

las diferencias entre uno y otro agregado es más evidente en concretos de baja resistencia y menos notable en concretos de alta resistencia (Gómez, 2005). Se tiene que agregados duros son más resistente a la abrasión y que una superficie acabada resiste mejor al desgaste (Kosmatka et al., 2004). Uno de los ensayos para determinar la resistencia a la abrasión del concreto se encuentra disponible en la norma ASTM C944.

### **Durabilidad**

Se define como la habilidad del concreto en resistir la acción del ambiente, al ataque químico y a la abrasión, manteniendo sus propiedades ingenieriles (Kosmatka et al., 2004). Se debe reconocer que no todos los concretos se enfrentarán a las mismas condiciones climatológicas y de uso, por lo que la durabilidad de cada concreto dependerá de la exposición del ambiente y de las propiedades deseables.

Los factores que determinan la durabilidad final y la vida útil del concreto son los componentes del concreto, la proporción de estos, la interacción entre los mismos y los métodos de colocación y curado (Kosmatka et al., 2004). Gómez (2005) también señala que la limpieza, absorción y porosidad, textura superficial, reactividad con los álcalis y resistencia a la abrasión de los agregados influyen en la durabilidad del concreto.

## **2.3 Fundamentos de estadística**

La estadística corresponde a una disciplina científica que trata con la recolección, presentación, análisis y uso de datos para resolver problemas y diseñar productos o procesos (Hernández, 2015).

Los datos son observaciones numéricas de un fenómeno de interés, la totalidad de todos los datos es la población, y una porción utilizada para el análisis es una muestra aleatoria (Hernández, 2015).

La estadística se puede clasificar fundamentalmente en (Gómez, 2009):

- Estadística descriptiva: Son los métodos estadísticos empleados para reunir, organizar, resumir y analizar los datos, con los cuales se caracteriza una población usando métodos de muestreo sin extender conclusiones.

- Estadística inferencial: Es un procedimiento por el cual se obtienen deducciones sobre una población, de acuerdo a los resultados obtenidos de las muestras de una población. Estas incluyen inferencias, pruebas de hipótesis, determinar relaciones y hacer predicciones con el fin de inferir características o propiedades de una población.

### 2.3.1 Parámetros y estadísticos

Se puede obtener una mejor comprensión de la población describiéndola numérica y gráficamente con base en los datos de la muestra. La colección de datos se puede describir en términos de forma, valores atípicos, centro y dispersión (Hernández, 2015). El centro es descrito por el promedio, en tanto que la dispersión se describe por la varianza.

Una población es descrita por sus parámetros, en tanto que una muestra es descrita por sus estadísticos. Los estadísticos son utilizados para estimar parámetros (Hernández, 2015). A continuación se muestran las ecuaciones de los parámetros y estadísticos (Devore, 2008):

Promedio de una población:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N} \quad (2-1)$$

Promedio de una muestra:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2-2)$$

Varianza poblacional:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{N} \quad (2-3)$$

Varianza muestral:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (2-4)$$

Desviación estándar poblacional:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (2-5)$$

Desviación estándar muestral:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2-6)$$

Coefficiente de variación:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \quad (2-7)$$

Dónde la notación de cada variable corresponde a:

$\mu$ : Promedio de la población

$CV$ : Coeficiente de variación

$\bar{x}$ : Promedio de la muestra

$N$ : Tamaño de la población

$\sigma^2$ : Varianza de la población

$n$ : Tamaño de la muestra

$s^2$ : Varianza de la muestra

$x_i$ : Dato estadístico o variable observada

$\sigma$ : Desviación estándar de la población

de una serie de datos recolectados, debe

$s$ : Desviación estándar de la muestra

ser medida en una escala numérica

El resumen de los datos brinda información muy valiosa que puede asistir en el análisis de la población, así como en la presentación de los datos y definición de un modelo para resolver algún problema de interés.

Un estimador puntual es un estadístico con un valor razonable de un parámetro de la población, en el cual los datos recolectados son variables aleatorias. Una variable aleatoria es una función que asigna un número real a cada resultado de un experimento aleatorio, en donde un experimento aleatorio es aquel que proporciona diferentes resultados aun cuando se repita siempre de la misma manera (Hernández, 2015).

Aleatorio significa que cada elemento tiene la misma posibilidad de ser escogido en un muestreo, en tanto que la prueba homocedasticidad muestra que las varianzas de diferentes grupos de la variable dependiente aleatoria son aproximadamente iguales, y por lo tanto se puede inferir que los datos sometidos a una prueba estadística exhiben resultados con un grado de confiabilidad adecuado (Devore, 2008).

### **2.3.2 Probabilidad y distribuciones**

El set de todos los posibles resultados de un experimento aleatorio es llamado espacio muestral, el cual puede ser discreto si está formado por un conjunto finito de resultados (sus valores se obtienen contando) o continuo si está formado por un intervalo de números reales (Hernández, 2015). Un evento es un subconjunto del espacio muestral de un experimento aleatorio.

Probabilidad es la posibilidad o chance de que ocurra un resultado particular o evento de un experimento aleatorio, el cual puede estar compuesto por espacios muestrales discretos o continuos (Hernández, 2015). Se representa como un número en el intervalo de  $[0,1]$ , donde 1 significa certeza y 0 imposibilidad.

## **Distribuciones**

Una distribución es un resumen de los datos expresados como una tabla, gráfico o función, en el que los datos son agrupados según intervalos de clase y describe la forma en que varían los resultados de un experimento aleatorio (Hernández, 2015). Las fronteras de los intervalos de clase deben ser valores convenientes, al igual que el ancho de clase.

Una forma de visualizar una distribución de frecuencia de datos es el histograma, el cual es similar a un gráfico de barras, en el cual sobre cada frontera de intervalo se proyecta un rectángulo cuya altura sea igual a la frecuencia o frecuencia relativa asociada (Hernández, 2015). Estos diagramas se pueden emplear para visualizar la probabilidad acumulativa o la forma de la distribución de los datos, donde las barras del histograma son para cada categoría definida.

Para saber si una distribución particular es un modelo razonable para explicar el comportamiento de los datos recolectados, se puede recurrir a los gráficos de probabilidad, con el cual se puede verificar una suposición con base a examinación visual (Hernández, 2015). Para el uso de estos diagramas muestras de mayor tamaño aumentan la claridad de las conclusiones realizadas.

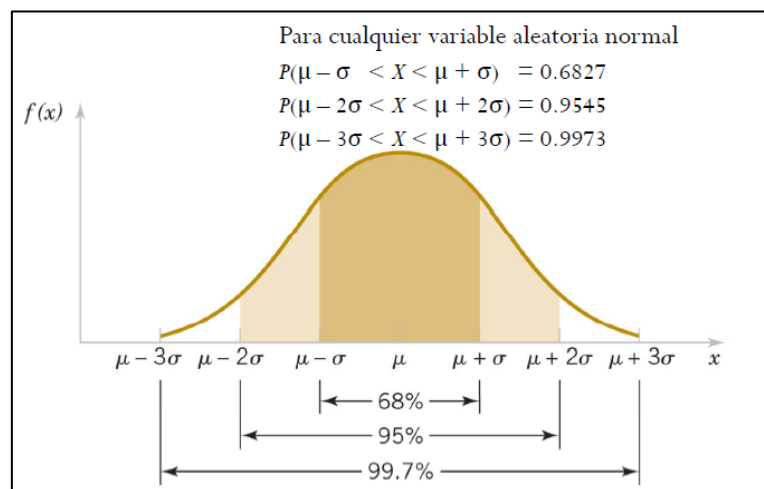
Si la variable aleatoria es continua existen infinitos valores posibles de la variable y entre cada dos variables un número infinito de valores. Para este tipo de variable se tiene que la probabilidad de que la variable aleatoria tome un valor dentro de un rango definido se define como la función de densidad, en tanto que la función acumulada describe la posibilidad de que la variable aleatoria tome un valor igual o menor al valor en que se está evaluando la función (Devore, 2008).



Una distribución más utilizada para describir el comportamiento esperado de un grupo de datos es la distribución normal o Gaussiana, ya que la distribución se utiliza para el cálculo de probabilidad de variables continuas, cuyos histogramas de la frecuencia relativa siguen una forma de campana, en la cual los resultados o eventos con mayor probabilidad de ocurrencia se agrupan cercanos a la media, en tanto que los datos con menor probabilidad se separan de la media de forma simétrica (Devore, 2008).

### Distribución normal

Corresponde a una distribución en la cual su función de densidad tiene forma de campana, la cual generalmente se denomina como campana de Gauss (Devore, 2008). Es una de las distribuciones de probabilidad más utilizadas para el análisis de datos en variables aleatorias continuas. La representación gráfica de la distribución se presenta en la **Figura 2.7**.



**Figura 2.7** Representación gráfica de distribución normal  
**Fuente:** Hernández, 2015

Su función de densidad está definida por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2-8)$$

En tanto que su función acumulada se define como:

$$F(X) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2-9)$$

Donde se cumple que:

- $-\infty < \mu < \infty$
- $\sigma > 0$
- $E(X) = \mu$
- $V(X) = \sigma^2$

Entre las principales características de este tipo de función, se destaca que la mayor probabilidad de ocurrencia se da para los valores cercanos a la media, y que conforme los valores de la variable aleatoria se van separando de la media la probabilidad va decreciendo simétricamente (Devore, 2008).

Las propiedades del modelo normal son que la media, moda<sup>9</sup> y mediana<sup>10</sup> coinciden ( $\mu$ ), la forma de la campana depende de los parámetros  $\mu$  y  $\sigma$ , es simétrica con respecto a su media (existe un 50 % de probabilidad de observar valores mayores o menores a la media), y para cualquier variable aleatoria se cumplen las probabilidades señaladas en la **Figura 2.7**.

### 2.3.3 Pruebas de hipótesis

Las pruebas o estadísticos paramétricos se emplean para detectar si existe una relación real o verdadera entre dos variables, las cuales se consideran que tienen una mayor capacidad para detectar la relación entre las variables ya que se determinan a un cierto nivel de significancia.

La prueba de hipótesis es un procedimiento que conlleva a una decisión sobre una hipótesis particular y se apoyan en el uso de información de una muestra aleatoria de la población de interés (Hernández, 2015). Si la información es concordante con la hipótesis, se concluirá que la hipótesis es verdadera, en tanto que si la información no concuerda con la hipótesis se concluirá que la hipótesis es falsa.

Estas pruebas se separan en dos tipos, pruebas paramétricas y pruebas no paramétricas. Para la prueba paramétrica se tiene que la distribución de los datos es conocida, en tanto que para las pruebas no paramétricas el método no requiere de la distribución del muestreo estadístico (Montgomery & Runger, 1996).

---

<sup>9</sup> Valor con mayor frecuencia entre los datos recolectados.

<sup>10</sup> El valor central en el grupo de datos recolectados ordenados por tamaño.

Una hipótesis se entiende como una afirmación o supuesto con respecto a una población (Montgomery & Runger, 1996). Para las pruebas de hipótesis se emplean dos criterios para la toma de decisiones:

- Hipótesis nula  $H_0$ : Afirmación acerca del valor de un parámetro poblacional
- Hipótesis alterna  $H_1$ : Afirmación que se aceptará si los datos muestrales aseguran que  $H_0$  es falsa

Una manera de notificar los resultados es indicar que la prueba de hipótesis fue o no rechazada con un valor específico de nivel de significancia (Hernández, 2015). Como ejemplo, puede decirse que la hipótesis nula fue rechazada con un nivel de significancia de 0.05.

Al tomar decisiones en las pruebas de hipótesis se puede incurrir en un error, dependiendo del nivel de significancia con el que se realice la prueba. En el Cuadro 2.4 se presentan los tipos de errores que se pueden cometer en una prueba de hipótesis:

**Cuadro 2.4** Decisiones en pruebas de hipótesis

Decisión	Situación real	
	$H_0$ es verdad	$H_0$ es falso
Fallar en rechazar $H_0$	No hay error	Error Tipo II
Rechazar $H_0$	Error Tipo I	No hay error

**Fuente:** Hernández, 2015

A continuación se presentan algunas de las pruebas de hipótesis empleadas para el presente trabajo.

### Intervalos de confianza

Corresponde a un rango de valores derivados de los estadísticos de la muestra, con los cuales se pretende estimar un conjunto de valores que incluyan la variable aleatoria en estudio, a una medida de confianza (Montgomery & Runger, 1996).

Debido a la naturaleza de la prueba, es poco probable que los intervalos de confianza de una muestra sean idénticos a los de otra muestra de la misma población. Aunque si las muestras son de un tamaño considerable y se repiten un número de veces adecuado, un determinado porcentaje de los intervalos de confianza incluiría el parámetro desconocido de la población (Montgomery & Runger, 1996).

Los factores que determinan el ancho del intervalo de confianza son el tamaño de la muestra, la varianza de la población que normalmente es estimada como la desviación estándar de la muestra y el nivel de confianza (significancia) deseado.

Para tamaños de muestras pequeños (no superiores a 30 muestras) generalmente se utiliza la distribución probabilística *t* de Student, la cual corresponde a una distribución similar a la distribución normal, para la cual el tamaño de la muestra es pequeño y la varianza es desconocida (debe ser estimada a partir de los datos de la muestra) (Montgomery & Runger, 1996). Este tipo de distribuciones se utilizan para tener en cuenta la incertidumbre añadida que resulta por la estimación de la varianza, tiene  $n - 1$  grados de libertad (siendo  $n$  el tamaño de la muestra), su media es cero y su varianza es mayor que uno.

Al estimar intervalos de confianza a partir de esta distribución la ecuación que se aplica es la siguiente (Montgomery & Runger, 1996):

$$IC = \bar{x} + t \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2-10)$$

Donde  $\bar{x}$  es el promedio de la muestra,  $s$  es la desviación estándar de la muestra, y  $t$  es el valor estadístico *t* de Student asociado a un nivel de significancia y a los grados de libertad  $n - 1$ .

Al interpretarse los resultados de la aplicación de los intervalos de confianza, la prueba da a entender que para un cierto nivel de significancia (generalmente  $\alpha=0.05$ ) la media poblacional se encuentre entre los valores obtenidos al realizarse la prueba.

## Prueba de normalidad

Es una prueba no paramétrica con la cual se pretende demostrar que los valores de la variable dependiente en estudio sigan una distribución normal (Montgomery & Runger, 1996).

La prueba de Kolmogorov – Smirnov tiene por objetivo medir el grado de concordancia existente entre la distribución de un conjunto de datos y una distribución teórica (Montgomery & Runger, 1996). Es un procedimiento de bondad de ajuste utilizado para demostrar que las variables de una muestra se distribuyen de manera similar a una distribución normal.

Cuando esta prueba se aplica para contrastar la hipótesis de normalidad, el estadístico de prueba es la máxima diferencia calculada según la siguiente ecuación:

$$D = \text{máx}|F_n(x_i) - F_o(x_i)| \quad (2-11)$$

Dónde  $x_i$  es el  $i$ -ésimo valor observado en la muestra,  $F_n(x)$  es la función de distribución muestral que estima la probabilidad de observar valores menores o iguales a  $x_i$ ; y  $F_o(x)$  es la función correspondiente a la población normal especificada en la hipótesis nula.

El estadístico de prueba  $D$  posteriormente se compara con un valor crítico  $D\alpha$  (asociado a un cierto nivel de significancia y el tamaño de la muestra) para la toma de decisión de la prueba según el siguiente criterio:

- $H_0: D < D\alpha \rightarrow$  Los datos de la muestra se ajustan a una distribución normal
- $H_1: D > D\alpha \rightarrow$  Los datos de la muestra no se ajustan a una distribución normal

## Análisis de varianza (ANOVA)

Corresponde a una prueba con la cual se compara las medias de dos o más poblaciones independientes. El análisis de varianza (ANOVA) evalúa la importancia de uno o más factores al comparar las medias de la variable en estudio en los diferentes niveles de factores (Devore, 2008).

Entre los requerimientos para aplicar la prueba se tiene que las varianzas de cada conjunto de datos no deben diferir de manera significativa, cada conjunto de datos debe ser independiente de los otros grupos, y que los datos deben ser de poblaciones normalmente distribuidas (Devore, 2008).

Para la aplicación de la prueba se utilizan las siguientes ecuaciones (Devore, 2008):

Suma de cuadrados entre muestras:

$$SS_L = \sum_{k=1}^k n_k (\bar{x}_k - \bar{x})^2 \quad (2-12)$$

Suma de cuadrados dentro de las muestras:

$$SS_R = \sum_{k=1}^k \sum_{j=1}^{n_k} (x_{kj} - \bar{x}_k)^2 \quad (2-13)$$

Suma de cuadrados total:

$$SS_T = \sum_{k=1}^k \sum_{j=1}^{n_k} (x_{kj} - \bar{x})^2 \quad (2-14)$$

Cuadrado medio entre muestras:

$$MS_L = \frac{SS_L}{k-1} \quad (2-15)$$

Cuadrado medio dentro de las muestras:

$$MS_R = \frac{SS_R}{N-k} \quad (2-16)$$

Cuadrado medio total:

$$MS_T = \frac{SS_T}{N-1} \quad (2-17)$$

Estadístico de prueba de hipótesis:

$$F = \frac{MS_L}{MS_R} \quad (2-18)$$

Dónde  $x_{kj}$  representan el k-ésimo valor de la muestra j-ésima,  $n_k$  el tamaño de dicha muestra,  $\bar{x}_k$  su media,  $\bar{x}$  la media global,  $N$  los grados de libertad total (que es igual a  $n - 1$ , siendo  $n$  el número total de muestras) y  $k$  el número de lotes.

El estadístico de prueba  $F$  posteriormente se compara con un valor crítico  $F_{crítico}$  (asociado a un cierto nivel de significancia, los grados de libertad del numerador  $k - 1$  y los grados de libertad del denominador  $N - k$ ) para la toma de decisión de la prueba según el siguiente criterio:

- $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n = \mu \rightarrow F < F_{crítico} \rightarrow$  No existe una diferencia significativa en las medias de las poblaciones en estudio

- $H_1: \exists \mu_j \neq \mu; j = 1, 2, \dots, n \rightarrow F > F_{crítico} \rightarrow$  Existe una diferencia significativa en las medias de las poblaciones en estudio

### Prueba de Tukey

Es una prueba de comparaciones múltiples, cuyo objetivo es comparar pares de medias entre diferentes muestras. También es conocida como la prueba de Diferencia Significativa Honesta (DSH) de Tukey, y se recomienda utilizar una vez que a un grupo de datos de diferentes muestras se le ha aplicado la prueba de análisis de varianza y se ha rechazado la hipótesis nula (Montgomery & Runger, 1996). Esta prueba sólo es válida para el caso de experimentos con igual número de muestras – repeticiones.

Para la prueba se calcula un valor denotado como “Comparador de Tukey”, según la siguiente ecuación (Montgomery & Runger, 1996):

$$W = q * \sqrt{\frac{CME}{r}} \quad (2-19)$$

Dónde  $CME$  es el promedio de los cuadrados del error experimental,  $r$  el número de repeticiones de las medias de las muestras de datos a ser comparadas, y  $q$  es la amplitud total estandarizada (asociada a un cierto nivel de significancia, a los grados de libertad de los tratamientos y a los grados de libertad del error).

Para la toma de decisión de la prueba se verifica si la diferencia entre dos promedios es mayor que el Comparador  $W$ , por lo que se concluye que los dos promedios son significativamente diferentes, en caso contrario se concluye que los promedios no son significativamente diferentes (Montgomery & Runger, 1996). Para todos los pares de promedios que se comparan se utiliza el mismo Comparador  $W$ .

### 2.3.4 Correlación y regresión

El análisis de regresión es una técnica estadística empleada para determinar la relación matemática entre dos o más variables (Hernández, 2015). El modelo de regresión simple está dado por:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon \quad (2-20)$$

Dónde la pendiente y el intercepto son denominados coeficientes de regresión,  $Y$  es la variable dependiente en estudio,  $x$  es la variable independiente,  $y \in$  es el término asociado al error aleatorio.

Una medida utilizada para representar el grado de asociación entre dos variables cuantitativas es el coeficiente de correlación (Hernández, 2015). El coeficiente de correlación se representa por  $r$ , toma valores entre -1 y 1, se calcula según las siguientes ecuaciones:

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n} \quad (2-21)$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n} \quad (2-22)$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n y_i (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{n} \quad (2-23)$$

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}S_{yy}}} \quad (2-24)$$

Se dice que la correlación entre dos variables es perfecta positiva cuando el coeficiente de correlación es igual a 1, por lo que exactamente en la medida que aumenta una de las variables aumenta la otra; en caso contrario se dice que la relación es perfecta negativa cuando el coeficiente de correlación es igual a -1, por lo que exactamente en la medida que aumenta una variable disminuye la otra (Montgomery & Runger, 1996). Conforme más cercano sea el valor del coeficiente de correlación a cero menor es el grado de asociación entre las variables en estudio.

Se refiere al coeficiente de determinación como la cantidad de variabilidad en los datos que es explicada por el modelo de regresión (Hernández, 2015). La ecuación para determinar el coeficiente de determinación es la siguiente:

$$R^2 = r^2 = \frac{S_{xy}^2}{S_{xx}S_{yy}} \quad (2-25)$$

Donde el coeficiente de determinación es utilizado para juzgar la calidad del modelo y se cumple que  $0 \leq R^2 \leq 1$ . Al interpretar el valor del coeficiente de determinación, se entiende que el modelo de regresión toma en cuenta el  $R^2$  (en porcentaje) de la variabilidad de los datos, por lo que al emplear un modelo de regresión lo más adecuado es seleccionar aquel cuyo coeficiente de determinación sea más cercano a un valor de uno.



### **2.3.5 Evaluación de resultados de pruebas de resistencia en el concreto**

Para el análisis de resultados de resistencia en el concreto se considera que los parámetros establecidos en la norma ACI 214R son adecuados para formular el grado de control que se tuvo al elaborar una mezcla de concreto, mas en la norma se asume que los resultados de resistencia a la compresión en el concreto siguen una distribución normal, por lo cual se considera adecuado verificar que efectivamente los resultados obtenidos para una muestra aleatoria de especímenes de concreto siguen el comportamiento de una distribución normal antes de emplear los controles establecidos en la norma indicada.

Uno de los objetivos principales de la evaluación estadística de la resistencia del concreto es identificar las fuentes de variación. Este conocimiento puede ser utilizado para ayudar a determinar pasos apropiados para mantener un nivel deseado de control. Un método sencillo para comparar la variación global es usando la desviación estándar o el coeficiente de variación. A continuación se resumen algunas de las principales fuentes de variación en la resistencia del concreto según la norma ACI 214R-02, 2002:

- Cambios en la relación agua – cemento por deficiente control del agua, variación de humedad en el agregado o reemplado.
- Variaciones en el requerimiento de agua por granulometría, absorción y forma de la partícula del agregado, propiedades del cemento, contenido de aire, tiempo de entrega y temperatura del concreto.
- Variaciones en las características y proporciones de los materiales constituyentes.
- Variaciones en la colocación, y compactación del concreto.
- Variaciones en la temperatura y curado del concreto.
- Discrepancia en los métodos de prueba por muestreo incorrecto, moldes de calidad deficiente, deficientes procedimientos de prueba y cabeceado inconsistente de los cilindros.

Tanto la desviación estándar como el coeficiente de variación se consideran herramientas adecuadas para medir la dispersión en la resistencia del concreto. Los estándares de control presentados en el Cuadro 2.5 se consideran apropiados para determinar el grado de control en la elaboración de mezclas de concreto, tomando en cuenta que los valores presentados se

obtuvieron en especímenes cilíndricos de concreto de 150 mm x 300 mm, ensayados a una edad de 28 días.

**Cuadro 2.5** Normas de control para mezclas de concreto

<b>Variación global para concretos con <math>f'c \leq 34.5</math> MPa</b>					
Clase de operación	Desviación estándar para diferentes estándares de control, MPa				
	Excelente	Muy bueno	Bueno	Aceptable	Pobre
Pruebas generales de construcción	Debajo de 2.8	2.8 a 3.4	3.4 a 4.1	4.1 a 4.8	Arriba de 4.8
Mezclas de prueba de laboratorio	Debajo de 1.4	1.4 a 1.7	1.7 a 2.1	2.1 a 2.4	Arriba de 2.4
<b>Variación global para concretos con <math>f'c &gt; 34.5</math> MPa</b>					
Clase de operación	Desviación estándar para diferentes estándares de control, MPa				
	Excelente	Muy bueno	Bueno	Aceptable	Pobre
Pruebas generales de construcción	Debajo de 7.0	7.0 a 9.0	9.0 a 11.0	11.0 a 14.0	Arriba de 14.0
Mezclas de prueba de laboratorio	Debajo de 3.5	3.5 a 4.5	4.5 a 5.5	5.5 a 7.0	Arriba de 7.0

**Fuente:** Delgado, a partir de ACI 214R-02

## Capítulo 3. Presentación y análisis de resultados

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos del desarrollo experimental del trabajo, respecto a los agregados, cementos y las mezclas de concreto elaboradas. Los detalles de cada una de las pruebas se muestran en el **Apéndice B.**<sup>11</sup>

### 3.1 Caracterización de materiales

A continuación se presenta los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización de los materiales, y con ello demostrar que los mismos se trataban de materiales de buena calidad los cuales cumplen con las especificaciones ASTM correspondientes.

#### 3.1.1 Agregados

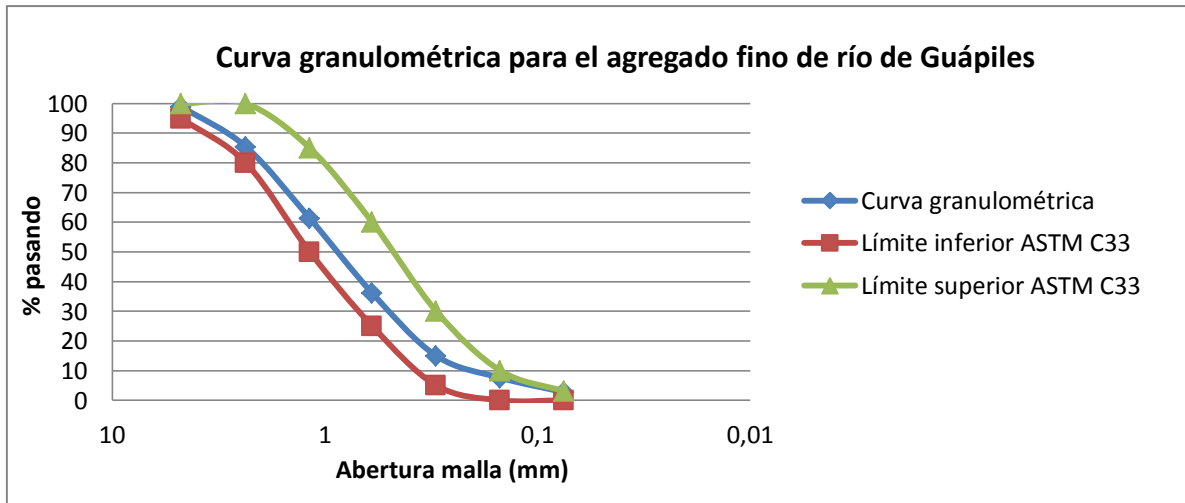
##### Agregado fino de río

Los resultados del ensayo de granulometría para el agregado se presentan en el **Cuadro 3.1**, en tanto que la curva granulométrica se muestra en la **Figura 3.1**. Se destaca que para el agregado fino de río no se debió realizar ninguna corrección, ya que el agregado cumple con los límites establecidos en la norma ASTM C33.

**Cuadro 3.1** Análisis granulométrico agregado fino de río procedente de Guápiles

No. Malla	Especificación Superior	Especificación Inferior	Promedio % Pasando acumulado	Máximo	Mínimo	Desviación Estándar
4	100.0	95.0	99.0	99.5	98.1	0.5
8	100.0	80.0	85.5	88.0	81.9	2.1
16	85.0	50.0	61.3	67.2	56.5	3.9
30	60.0	25.0	36.1	41.8	31.6	3.7
50	30.0	5.0	15.0	17.8	11.8	2.0
100	10.0	0.0	7.6	8.8	6.3	0.9
200	3.0	0.0	2.7	2.9	1.6	0.4

<sup>11</sup> Se indicará que para los resultados obtenidos por medio de las prácticas señaladas en las diferentes normas ASTM no se respetó la regla de redondeo en la precisión indicada en cada ensayo.



**Figura 3.1** Curva granulométrica para el agregado fino de río

Los resultados restantes de la caracterización del agregado se presentan en el Cuadro 3.2, revisándose las especificaciones indicadas en la norma ASTM C33 para el módulo de finura, el porcentaje de material más fino que la malla No. 200 y la colorimetría.

**Cuadro 3.2** Descripción y parámetros del agregado fino de río

Nombre de la prueba	Valor obtenido	Requisito ASTM C33
Peso unitario suelto ( $\text{kg/m}^3$ )	1517	N/A
Peso unitario varillado ( $\text{kg/m}^3$ )	1630	N/A
Humedad (%)	1.71	N/A
% Vacíos suelto	39.1	N/A
% Vacíos varillado	34.5	N/A
$G_{Bs}$	2.49	N/A
Absorción (%)	4.0	N/A
Módulo de finura	2.96	$2.3 < MF < 3.1$
Lavado en No. 200 (%)	2.3	Máx. 5 %
Colorimetría	Placa orgánica No. 1	< Placa orgánica No. 3

### Agregado fino de tajo

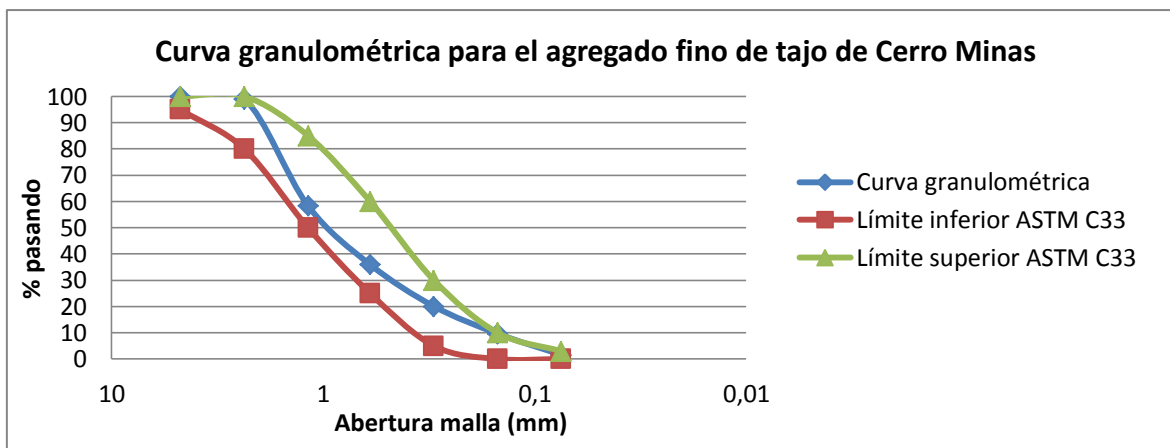
Los resultados del ensayo de granulometría para el agregado se presentan en el Cuadro 3.3 y el Cuadro 3.4, en los cuales se compara los resultados del agregado corregido y sin corregir con las especificaciones de la norma ASTM C33. La curva granulométrica del agregado se muestra en la Figura 3.2. Como medida de corrección del agregado fino de tajo se definió adecuado eliminar todo el material retenido en la malla No. 8, y con base en ello desarrollar todos los ensayos de caracterización del agregado en cuestión.

**Cuadro 3.3** Análisis granulométrico agregado fino de tajo procedente de Cerro Minas, sin corrección

No. Malla	Especificación superior	Especificación inferior	Promedio % pasando acumulado
4	100.0	95.0	99.9
8	100.0	80.0	69.9
16	85.0	50.0	41.1
30	60.0	25.0	25.7
50	30.0	5.0	14.6
100	10.0	0.0	6.8
200	3.0	0.0	1.5

**Cuadro 3.4** Análisis granulométrico agregado fino de tajo procedente de Cerro Minas, con corrección

No. Malla	Especificación superior	Especificación inferior	Promedio % Pasando acumulado	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
4	100.0	95.0	100.0	100.0	99.9	0.0
8	100.0	80.0	99.0	99.2	56.5	3.9
16	85.0	50.0	58.3	60.2	31.6	3.7
30	60.0	25.0	36.0	37.5	11.8	2.0
50	30.0	5.0	20.1	20.7	6.3	0.9
100	10.0	0.0	9.7	9.8	1.6	0.4
200	3.0	0.0	1.6	2.1	0.0	0.0



**Figura 3.2** Curva granulométrica para el agregado fino de tajo corregido

Los resultados restantes de la caracterización del agregado se presentan en el Cuadro 3.5, revisándose las especificaciones indicadas en la norma ASTM C33 para el módulo de finura, el porcentaje de material más fino que la malla No. 200 y la colorimetría.

**Cuadro 3.5** Descripción y parámetros del agregado fino de tajo

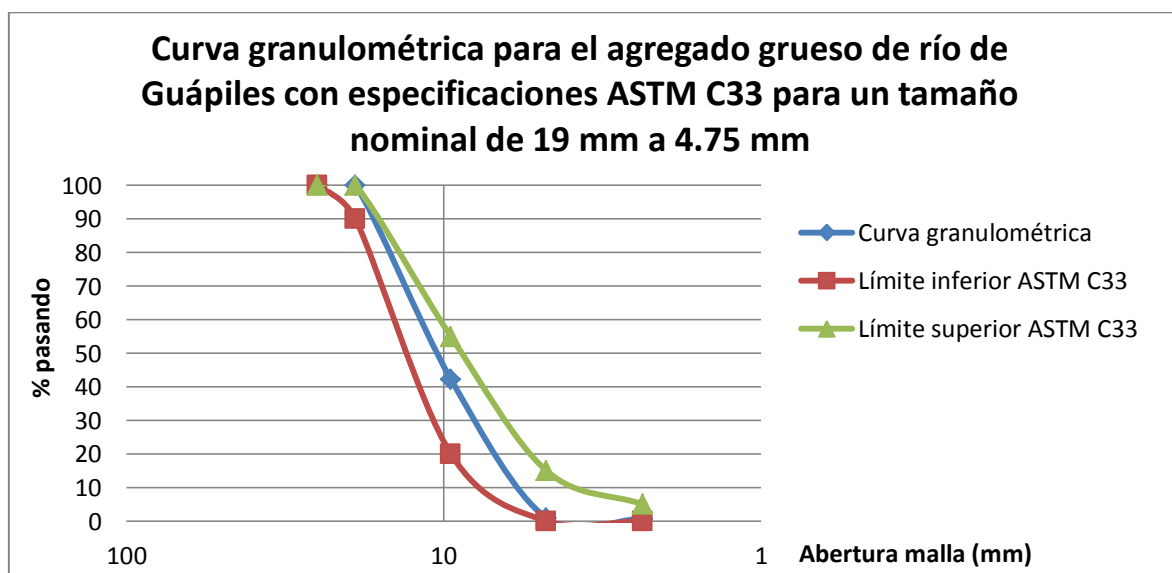
Nombre de la prueba	Valor obtenido	Requisito ASTM C33
Peso unitario suelto ( $\text{kg/m}^3$ )	1516	N/A
Peso unitario varillado ( $\text{kg/m}^3$ )	1645	N/A
Humedad (%)	2.13	N/A
% Vacíos suelto	40.4	N/A
% Vacíos varillado	35.4	N/A
$G_{Bs}$	2.55	N/A
Absorción (%)	2.1	N/A
Módulo de finura	2.77	$2.3 < MF < 3.1$
Lavado en No. 200 (%)	0.4	Máx. 5 %
Colorimetría	Placa orgánica No. 1	< Placa orgánica No. 3

### Agregado grueso de río

Debido a que el material ensayado correspondía a piedra con un tamaño máximo nominal de 16 mm y en la norma ASTM C33 no se especifican límites para la granulometría de este material, se compararon los resultados obtenidos del agregado con las especificaciones indicadas en la norma para un tamaño nominal de 19 mm a 9.5 mm, 19 mm a 4.75 mm y 12.5 mm a 4.75 mm . De los resultados obtenidos se aprecia que el agregado cumple con las especificaciones dadas para un tamaño nominal de 19 mm a 4.75 mm, tal como se presentan en el Cuadro 3.6, la curva granulométrica con los límites para el tamaño indicado se muestra en la Figura 3.3.

**Cuadro 3.6** Análisis granulométrico agregado grueso de río con especificaciones ASTM C33 para un tamaño nominal de 19 mm a 4.75 mm

No. Malla	Especificación superior	Especificación inferior	Promedio % Pasando acumulado	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
1	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0
3/4	100.0	90.0	100.0	100.0	100.0	0.0
3/8	55.0	20.0	42.3	49.8	36.8	4.4
4	15.0	0.0	0.9	1.3	0.7	0.2
8	5.0	0.0	0.6	0.9	0.5	0.1



**Figura 3.3** Curva granulométrica para el agregado grueso de río

Los resultados restantes de la caracterización del agregado se presentan en el Cuadro 3.7, revisándose las especificaciones indicadas en la norma ASTM C33 para el porcentaje de material más fino que la malla No. 200 y la abrasión del material.

**Cuadro 3.7** Descripción y parámetros del agregado grueso de río

<b>Nombre de la prueba</b>	<b>Valor obtenido</b>	<b>Requisito ASTM C33</b>
Peso unitario suelto (kg/m <sup>3</sup> )	1460	N/A
Peso unitario varillado (kg/m <sup>3</sup> )	1557	N/A
Humedad (%)	1.40	N/A
% Vacíos suelto	44.4	N/A
% Vacíos varillado	40.7	N/A
G <sub>Bs</sub>	2.63	N/A
Absorción (%)	1.4	N/A
Partículas fracturadas (%)	99.0	N/A
Abrasión (% desgaste)	16	Máx. 50 %
Lavado en No. 200 (%)	0.3	Máx. 1 %

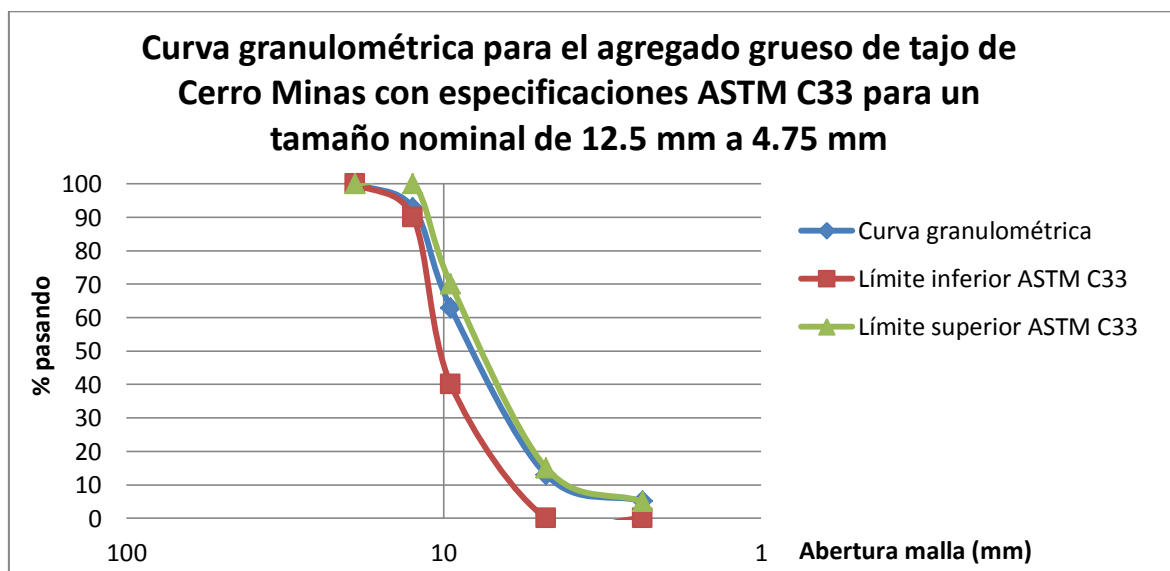


### Agregado grueso de tajo

Debido a que el material ensayado correspondía a piedra con un tamaño máximo nominal de 16 mm y en la norma ASTM C33 no se especifican límites para la granulometría de este material, se compararon los resultados obtenidos del agregado con las especificaciones indicadas en la norma para un tamaño nominal de 19 mm a 9.5 mm, 19 mm a 4.75 mm y 12.5 mm a 4.75 mm . De los resultados obtenidos se aprecia que el agregado cumple con las especificaciones dadas para un tamaño nominal de 19 mm a 4.75 mm, tal como se presentan en el **Cuadro 3.8**, la curva granulométrica con los límites para el tamaño indicado se muestra en la **Figura 3.4**.

**Cuadro 3.8** Análisis granulométrico agregado grueso de tajo con especificaciones ASTM C33 para un tamaño nominal de 12.5 mm a 4.75 mm

No. Malla	Especificación superior	Especificación inferior	Promedio % Pasando acumulado	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
3/4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0
1/2	100.0	90.0	92.9	94.1	91.5	0.8
3/8	70.0	40.0	62.9	67.0	58.2	3.0
4	15.0	0.0	13.0	16.3	10.4	2.2
8	5.0	0.0	5.1	7.2	3.7	1.2



**Figura 3.4** Curva granulométrica para el agregado grueso de tajo

Los resultados restantes de la caracterización del agregado se presentan en el Cuadro 3.9, revisándose las especificaciones indicadas en la norma ASTM C33 para el porcentaje de material más fino que la malla No. 200 y la abrasión del material.

**Cuadro 3.9** Descripción y parámetros del agregado grueso de tajo

<b>Nombre de la prueba</b>	<b>Valor obtenido</b>	<b>Requisito ASTM C33</b>
Peso unitario suelto (kg/m <sup>3</sup> )	1447	N/A
Peso unitario varillado (kg/m <sup>3</sup> )	1523	N/A
Humedad (%)	1.12	N/A
% Vacíos suelto	43.4	N/A
% Vacíos envarillado	40.5	N/A
Gbs	2.56	N/A
Absorción (%)	1.8	N/A
Partículas fracturadas (%)	100.0	N/A
Abrasión (% desgaste)	19	Máx. 50 %
Lavado en No. 200 (%)	0.8	Máx. 1 %

### 3.1.2 Cementos

#### Cemento MM/A (E-C) – 28

Los resultados de la caracterización del cemento se presentan en el Cuadro 3.10. Nótese que el tiempo de fraguado inicial es mayor a 45 minutos, en tanto que el tiempo de fraguado final es menor a 420 minutos, por lo que se infiere que el cemento cumple con las especificaciones dadas para esta característica en la norma INTE C147.

**Cuadro 3.10** Propiedades cemento MM/A (E-C) - 28

Nombre de la prueba	Valor obtenido
Agua para consistencia normal (%)	25.0
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	3.08
Tiempo de fragua inicial (minutos)	180
Tiempo de fragua final (minutos)	310
Finura por material pasando tamiz de 45 µm (%)	96.9
pH	12.25

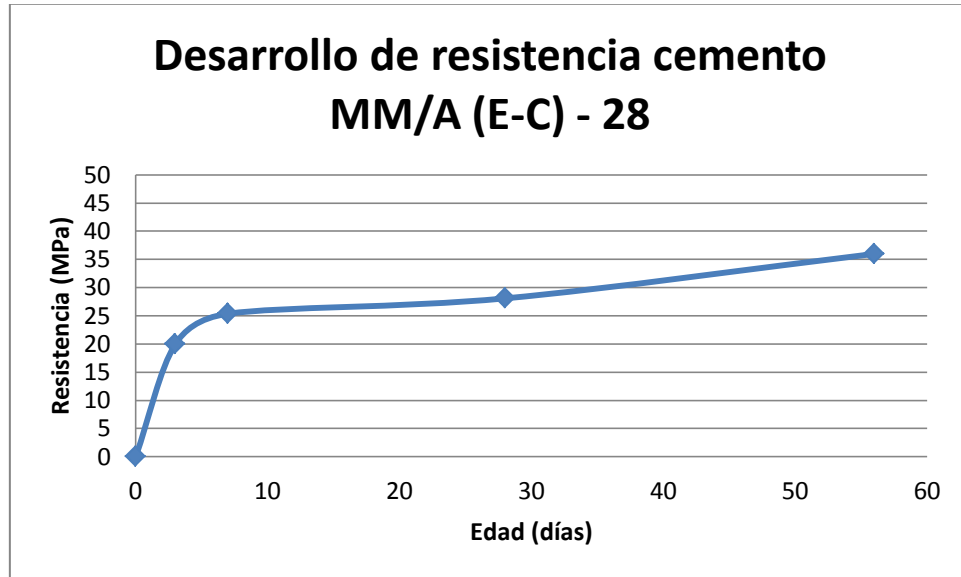
Seguidamente en el Cuadro 3.11 se presenta los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión (ASTM C109) y su comparación con los valores mínimos indicados en la norma INTE C147. De los resultados mostrados en el Cuadro 3.11 se aprecia que el cemento cumple con los límites establecidos en la norma indicada.

**Cuadro 3.11** Resistencia a la compresión y parámetros cemento MM/A (E-C) - 28

Edad de falla (días)	Resistencia a la compresión (MPa)		Desarrollo de resistencia en función de resultados a los 28 días
	Cemento de resistencia nominal clase 28 norma INTE C147	Cemento MM/A (E-C) – 28 ensayado	
3	13.0	20.0	71.0
7	20.0	25.4 <sup>12</sup>	90.3
28	28.0	28.1	100.0
56	N/A	36.0	128.1

<sup>12</sup> Especímenes fallados 8 días

Tomando como parámetro la resistencia promedio a los 28 días del cemento, en el Cuadro 3.11, adicionalmente se muestra la resistencia ganada en porcentaje en función de la edad de los especímenes elaborados. Posteriormente se evaluará la similitud entre los valores obtenidos para la resistencia del mortero con las curvas de desarrollo de resistencia de las mezclas de concreto elaboradas con el cemento MM/A (E-C) – 28. Finalmente en la Figura 3.5 se presenta la curva de desarrollo de resistencia del cemento en cuestión.



**Figura 3.5** Curva de desarrollo de resistencia para el cemento MM/A (E-C) – 28

### Cemento MM/B (P-C) – 28

Los resultados de la caracterización del cemento se presentan en el Cuadro 3.12. Nótese que el tiempo de fraguado inicial es mayor a 45 minutos, en tanto que el tiempo de fraguado final es menor a 420 minutos, por lo que se infiere que el cemento cumple con las especificaciones dadas para esta característica en la norma INTE C147.

**Cuadro 3.12** Propiedades cemento MM/B (P-C) - 28

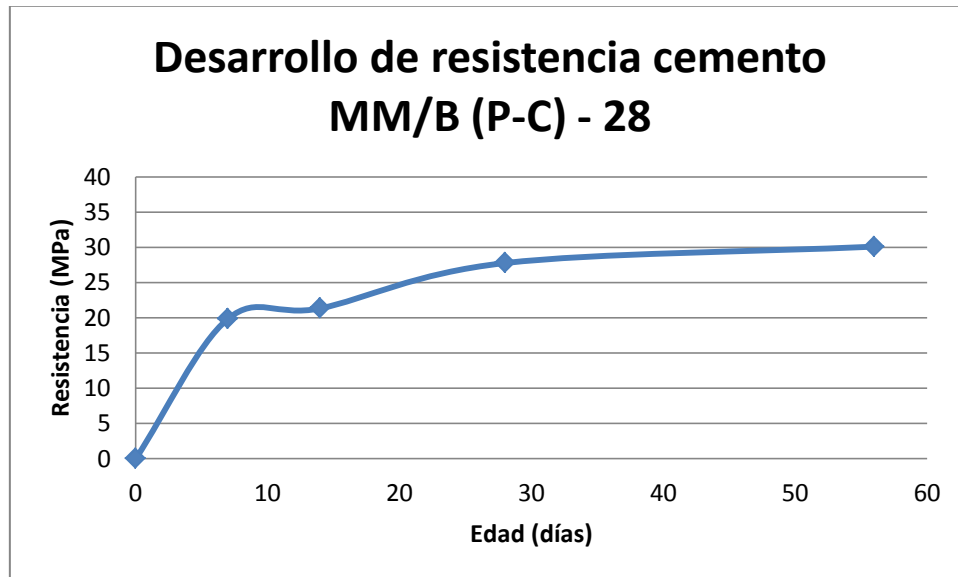
<b>Nombre de la prueba</b>	<b>Valor obtenido</b>
Agua para consistencia normal (%)	26.7
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2.98
Tiempo de fragua inicial (minutos)	95
Tiempo de fragua final (minutos)	210
Finura por material pasando tamiz de 45 µm (%)	92.5
pH	12.34

Seguidamente en el Cuadro 3.13 se presenta los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión (ASTM C109) y su comparación con los valores mínimos indicados en la norma INTE C147. De los resultados mostrados en el Cuadro 3.13 se aprecia que el cemento cumple con los límites establecidos en la norma indicada.

**Cuadro 3.13** Resistencia a la compresión y parámetros cemento MM/B (P-C) - 28

<b>Edad de falla (días)</b>	<b>Resistencia a la compresión (MPa)</b>		<b>Desarrollo de resistencia en función de resultados a los 28 días</b>
	Cemento de resistencia nominal clase 28 norma INTE C147	Cemento MM/B (P-C) – 28 ensayado	
3	13.0	N/A	N/A
7	20.0	19.9	71.5
14	N/A	21.3	76.9
28	28.0	27.8	100.0
56	N/A	30.1	108.4

Tomando como parámetro la resistencia promedio a los 28 días del cemento, en el Cuadro 3.13, adicionalmente se muestra la resistencia ganada en porcentaje en función de la edad de los especímenes elaborados. Posteriormente se evaluará la similitud entre los valores obtenidos para la resistencia del mortero con las curvas de desarrollo de resistencia de las mezclas de concreto elaboradas con el cemento MM/B (P-C) – 28. Finalmente en la Figura 3.6 se presenta la curva de desarrollo de resistencia del cemento en cuestión.



**Figura 3.6** Curva de desarrollo de resistencia para el cemento MM/B (P-C) – 28

### Cemento MP A – AR

Los resultados de la caracterización del cemento se presentan en el Cuadro 3.14. Nótese que el tiempo de fraguado inicial es mayor a 45 minutos, en tanto que el tiempo de fraguado final es menor a 420 minutos, por lo que se infiere que el cemento cumple con las especificaciones dadas para esta característica en la norma INTE C147.

**Cuadro 3.14** Propiedades cemento MP A - AR

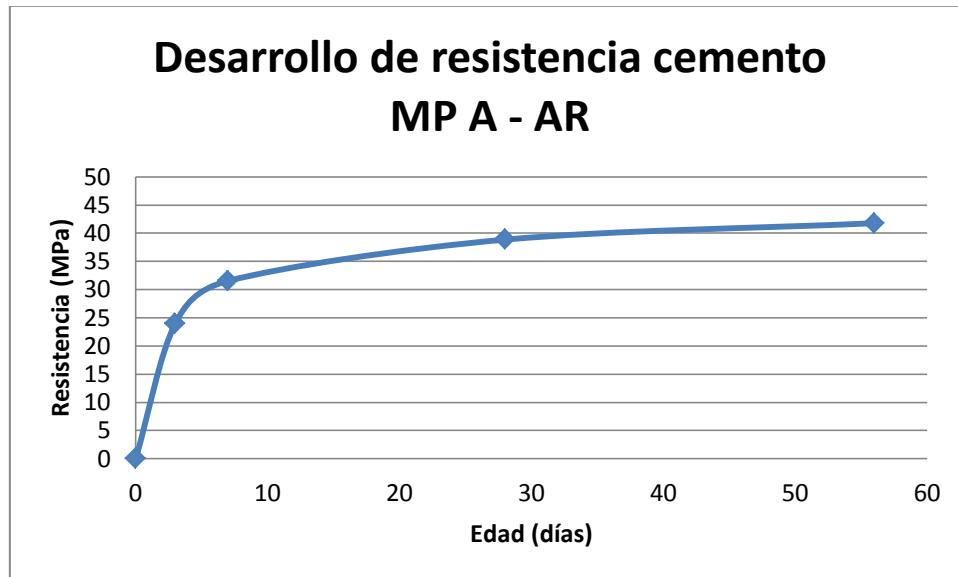
<b>Nombre de la prueba</b>	<b>Valor obtenido</b>
Agua para consistencia normal (%)	26.2
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	3.08
Tiempo de fragua inicial (minutos)	120
Tiempo de fragua final (minutos)	240
Finura por material pasando tamiz de 45 µm (%)	96.7
pH	12.22

Seguidamente en el Cuadro 3.15 se presenta los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión (ASTM C109) y su comparación con los valores mínimos indicados en la norma INTE C147. De los resultados mostrados en el Cuadro 3.15 se aprecia que el cemento cumple con los límites establecidos en la norma indicada.

**Cuadro 3.15** Resistencia a la compresión y parámetros cemento MP A - AR

<b>Edad de falla (días)</b>	<b>Resistencia a la compresión (MPa)</b>		<b>Desarrollo de resistencia en función de resultados a los 28 días (%)</b>
	Cemento de resistencia nominal clase AR norma INTE C147	Cemento MP A – AR ensayado	
3	24.0	24.0	61.7
7	N/A	31.5	81.2
28	N/A	38.9	100.0
56	N/A	41.8	107.5

Tomando como parámetro la resistencia promedio a los 28 días del cemento, en el Cuadro 3.15, adicionalmente se muestra la resistencia ganada en porcentaje en función de la edad de los especímenes elaborados. Posteriormente se evaluará la similitud entre los valores obtenidos para la resistencia del mortero con las curvas de desarrollo de resistencia de las mezclas de concreto elaboradas con el cemento MP AR – A. Finalmente en la Figura 3.6 se presenta la curva de desarrollo de resistencia del cemento en cuestión.



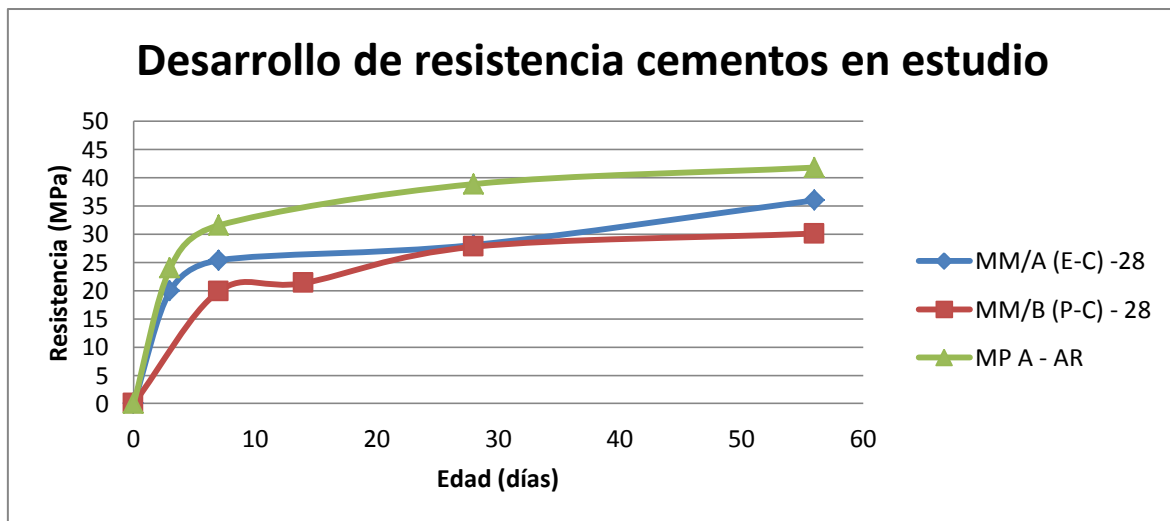
**Figura 3.7** Curva de desarrollo de resistencia para el cemento MP A – AR



Como forma de resumen, en el Cuadro 3.16 se presenta un comparativo del desarrollo de resistencia para cada uno de los cementos en estudio, en tanto que en la Figura 3.8 se agrupan las curvas de los cementos indicados.

**Cuadro 3.16** Comparativo de desarrollo de resistencia para los tres tipos de cementos ensayados

Edad de falla (días)	Cemento MM/A (E-C) – 28		Cemento MM/B (P-C) – 28		Cemento MP A – AR	
	Resistencia (MPa)	Porcentaje desarrollo resistencia	Resistencia (MPa)	Porcentaje desarrollo resistencia	Resistencia (MPa)	Porcentaje desarrollo resistencia
3	20.0	71.0	--	--	24	61.7
7	25.4	90.3	19.9	71.5	31.5	81.2
14	--	--	21.3	76.9	--	--
28	28.1	100.0	27.8	100.0	38.9	100.0
56	36.0	128.1	30.1	108.4	41.8	107.5



**Figura 3.8** Comparativo de curvas de desarrollo para cementos en estudio

### 3.2 Análisis estadístico

En esta sección se evalúan los resultados obtenidos de las pruebas de resistencia a las cuales se sometieron las mezclas de concreto elaboradas para validar que los resultados presentan un grado de confiabilidad adecuado así como comprobar si existen similitudes en el desarrollo de resistencia entre las mezclas de concreto.

Para facilitar la lectura de los resultados a mostrarse, en el Cuadro 3.17 se presentan la identificación de cada mezcla así como sus respectivos componentes.

**Cuadro 3.17** Clasificación de mezclas de concretos elaboradas

<b>Identificación</b>	<b>Tipo de cemento</b>	<b>Tipo de agregado</b>
Mezcla No. 1	MM/A (E-C) – 28	Agregado de río
Mezcla No. 2	MM/A (E-C) – 28	Agregado de tajo
Mezcla No. 3	MM/B (P-C) – 28	Agregado de río
Mezcla No. 4	MM/B (P-C) – 28	Agregado de tajo
Mezcla No. 5	MP A – AR	Agregado de río
Mezcla No. 6	MP A – AR	Agregado de tajo

#### 3.2.1 Prueba de normalidad

Empleando la prueba de Kolmogorov - Smirnov, para un tamaño de muestra de 8 y un valor de significancia de  $\alpha=0.05$ , se revisa que los valores de resistencia a cada edad de falla para las diferentes mezclas de concreto sigan el comportamiento de una distribución normal. Los resultados se presentan en el Cuadro 3.18.

Asimismo, de los resultados mostrados para la prueba de normalidad, se aprecia que todos los valores del estadístico D son menores al valor crítico asociado al tamaño de muestra y nivel de significancia indicados, por lo que se concluye que los valores de resistencia de todas las mezclas de concreto para las diferentes edades de falla siguen el comportamiento de una distribución normal.

**Cuadro 3.18** Resultados prueba de normalidad Kolmogorov - Smirnov para las mezclas de concreto elaboradas

Identificación mezcla	Edad del concreto (días)	Estadístico D	Valor crítico $D\alpha$
<b>Mezcla No. 1</b>	3	0.277	0.454
	7 <sup>13</sup>	0.210	0.454
	28	0.240	0.454
	56	0.376	0.454
<b>Mezcla No. 2</b>	3	0.127	0.454
	7	0.265	0.454
	28	0.236	0.454
	56	0.262	0.454
<b>Mezcla No. 3</b>	7	0.222	0.454
	14 <sup>14</sup>	0.200	0.454
	28	0.218	0.454
	56	0.270	0.454
<b>Mezcla No. 4</b>	7	0.153	0.454
	14	0.211	0.454
	28	0.155	0.454
	56	0.175	0.454
<b>Mezcla No. 5</b>	3	0.264	0.454
	7	0.122	0.454
	28	0.295	0.454
	56	0.256	0.454
<b>Mezcla No. 6</b>	3	0.234	0.454
	7	0.153	0.454
	28	0.225	0.454
	56	0.283	0.454

<sup>13</sup> Especímenes fallados a 8 días

<sup>14</sup> Especímenes fallados a 15 días

### 3.2.2 Evaluación resultados de resistencia

Conforme a lo estipulado en la norma ACI 214R-02, 2002; se determinan los estadísticos para los valores de resistencia a los 28 días de las mezclas de concretos elaboradas y se comparan los valores de la desviación estándar experimentales con los indicados en la norma.

En el Cuadro 3.19 se presentan los resultados obtenidos para este análisis, de lo cual se logra apreciar que el estándar de control determinado según la norma ACI 214R-02 es de bueno a excelente entre las mezclas de concreto.

**Cuadro 3.19** Resultados evaluación de estándares de control según norma ACI 214R-02 para las mezclas de concreto elaboradas

Identificación mezcla	Resistencia promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coefficiente de variación (%)	Criterio de resistencia	Tipo de control según desviación estándar
Mezcla No. 1	34.23	1.88	5.49	$f'c < 34.5$ MPa	1.7 MPa a 2.1 MPa - <b>Bueno</b>
Mezcla No. 2	34.21	1.90	5.55	$f'c < 34.5$ MPa	1.7 MPa a 2.1 MPa - <b>Bueno</b>
Mezcla No. 3	29.70	0.92	3.11	$f'c < 34.5$ MPa	Menor a 1.4 MPa - <b>Excelente</b>
Mezcla No. 4	27.72	0.52	1.89	$f'c < 34.5$ MPa	Menor a 1.4 MPa - <b>Excelente</b>
Mezcla No. 5	39.71	1.13	2.85	$f'c > 34.5$ MPa	Menor a 3.5 MPa - <b>Excelente</b>
Mezcla No. 6	36.03	1.37	3.81	$f'c > 34.5$ MPa	Menor a 3.5 MPa - <b>Excelente</b>

### 3.2.3 Prueba ANOVA

A continuación se presenta los resultados del análisis de un factor para cada una de las mezclas de concreto elaboradas, evaluando tanto la resistencia a cada edad de falla como la resistencia ganada en función de la resistencia obtenida a los 28 días, a un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ . Finalmente se determina si existe una diferencia significativa entre

los promedios de la resistencia y la resistencia ganada entre cada una de las mezclas. Se indicará que los valores de resistencia y los valores de resistencia ganada promedios se presentan en la **sección 3.3**, en tanto que el detalle de la resistencia obtenida para cada uno de los especímenes elaborados se presenta en el **Apéndice B**.

#### Análisis a una edad de 3 días del concreto

En el **Cuadro 3.20** se presentan los resultados obtenidos del análisis ANOVA para una edad del concreto de 3 días. Se indicará que los resultados mostrados en el cuadro no incluyen los promedios de resistencia de las mezclas No. 3 y No. 4, ya que su falla a 3 días debió ser trasladada a 14 días después de elaborarse las mezclas. Así, de los resultados mostrados en el **Cuadro 3.20**, se aprecia que los valores de F son mucho mayores al valor crítico de F, en tanto que la probabilidad resultante de ambas pruebas es menor al nivel de significancia de 0.05 establecido, por lo que se concluye que sí existe una diferencia significativa entre los promedios de resistencia y los promedios de resistencia ganada a 3 días de elaboradas las mezclas.

**Cuadro 3.20** Resultados análisis ANOVA a 3 días

<b>Análisis de varianza – Promedio de resistencia</b>						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico F
Entre grupos	425.35	3	141.78	188.34	1.16E-18	2.95
Dentro de los grupos	21.08	28	0.75			
Total	446.43	31				
<b>Análisis de varianza – Promedio de resistencia ganada según resultados a 28 días</b>						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico F
Entre grupos	2267.19	3	755.73	140.45	5.60E-17	2.95
Dentro de los grupos	150.66	28	5.38			
Total	2417.85	31				

### Análisis a una edad de 7 días del concreto

En el Cuadro 3.21 se presentan los resultados obtenidos del análisis ANOVA para una edad del concreto de 7 días. Los resultados mostrados en el cuadro incluyen los promedios de resistencia todas las mezclas. Así, de los resultados mostrados en el Cuadro 3.21, se aprecia que los valores de F son mucho mayores al valor crítico de F, en tanto que la probabilidad resultante de ambas pruebas es menor al nivel de significancia de 0.05 establecido, por lo que se concluye que sí existe una diferencia significativa entre los promedios de resistencia y los promedios de resistencia ganada a 7 días de elaboradas las mezclas.

**Cuadro 3.21** Resultados análisis ANOVA a 7 días

<b>Análisis de varianza – Promedio de resistencia</b>						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico F
Entre grupos	491.18	5	98.24	56.69	1.37E-17	2.44
Dentro de los grupos	72.78	42	1.73			
Total	563.96	47				

<b>Análisis de varianza – Promedio de resistencia ganada según resultados a 28 días</b>						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico F
Entre grupos	1080.78	5	216.16	12.92	1.25E-07	2.44
Dentro de los grupos	702.71	42	16.73			
Total	1783.49	47				

### Análisis a una edad de 14 días del concreto

En el Cuadro 3.22 se presentan los resultados obtenidos del análisis ANOVA para una edad del concreto de 14 días. Los resultados mostrados en el cuadro incluyen únicamente los promedios de resistencia de las mezclas No. 3 y No. 4. De los resultados mostrados en el Cuadro 3.22 se aprecia que el valor de F es menor al valor crítico de F para el análisis de la resistencia ganada, en tanto que el valor de F es mayor al valor crítico de F para el análisis de la resistencia (resultados que se pueden corroborar con los valores de la probabilidad resultante de ambas pruebas), por lo que se concluye que no existe una diferencia significativa entre los promedios de resistencia ganada y sí existe una diferencia significativa entre los promedios de resistencia a 14 días de elaboradas las mezclas.

**Cuadro 3.22** Resultados análisis ANOVA a 14 días

<b>Análisis de varianza – Promedio de resistencia</b>						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico F
Entre grupos	43.21	1	43.21	17.07	0.001	4.60
Dentro de los grupos	35.44	14	2.53			
Total	78.65	15				
<b>Análisis de varianza – Promedio de resistencia ganada según resultados a 28 días</b>						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico F
Entre grupos	112.02	1	112.02	3.82	0.07	4.60
Dentro de los grupos	410.10	14	29.29			
Total	522.12	15				

Análisis a una edad de 28 días del concreto

En el Cuadro 3.23 se presentan los resultados obtenidos del análisis ANOVA para una edad del concreto de 28 días. Los resultados mostrados en el cuadro incluyen los promedios de resistencia todas las mezclas. Así, de los resultados mostrados en el Cuadro 3.23, se aprecia que el valor de F es mayor al valor crítico de F, en tanto que la probabilidad resultante de la prueba es menor al nivel de significancia de 0.05 establecido, por lo que se concluye que sí existe una diferencia significativa entre los promedios de resistencia a 28 días de elaboradas las mezclas.

**Cuadro 3.23** Resultados análisis ANOVA a 28 días

<b>Análisis de varianza – Promedio de resistencia</b>						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico F
Entre grupos	750.11	5	150.02	78.79	3.12E-20	2.44
Dentro de los grupos	79.97	42	1.90			
Total	830.08	47				

### Análisis a una edad de 56 días del concreto

En el Cuadro 3.24 se presentan los resultados obtenidos del análisis ANOVA para una edad del concreto de 56 días. Los resultados mostrados en el cuadro incluyen los promedios de resistencia todas las mezclas. Así, de los resultados mostrados en el Cuadro 3.24, se aprecia que los valores de F son mucho mayores al valor crítico de F, en tanto que la probabilidad resultante de ambas pruebas es menor al nivel de significancia de 0.05 establecido, por lo que se concluye que sí existe una diferencia significativa entre los promedios de resistencia y los promedios de resistencia ganada a 56 días de elaboradas las mezclas.

**Cuadro 3.24** Resultados análisis ANOVA a 56 días

<b>Análisis de varianza – Promedio de resistencia</b>						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico F
Entre grupos	977.87	5	195.57	131.25	1.67E-24	2.44
Dentro de los grupos	62.59	42	1.49			
Total	1040.46	47				

<b>Análisis de varianza – Promedio de resistencia ganada según resultados a 28 días</b>						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico F
Entre grupos	2353.99	5	470.80	35.84	4.12E-14	2.44
Dentro de los grupos	551.71	42	13.14			
Total	2905.70	47				

### **3.2.4 Prueba Tukey**

A partir de los resultados obtenidos de la prueba ANOVA se verifico la existencia de diferencias significativas entre los promedios de resistencia y resistencia ganada de las mezclas de concreto elaboradas para las edades de 3 días, 7 días, 28 días y 56 días, por lo que se procede a mostrar los resultados de la prueba de comparación múltiple Tukey para identificar las combinaciones de mezclas en las cuales no existe una diferencia significativa entre sus promedios. Para esta prueba de se establece un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ .



Para la lectura de los resultados mostrados en esta sección se entenderá como resistencia ganada al porcentaje de resistencia obtenido a una edad específica a partir de los resultados obtenidos de resistencia promedio a los 28 días de cada mezcla de concreto.

#### Análisis a una edad de 3 días del concreto

En el Cuadro 3.25 y el Cuadro 3.26 se presentan los resultados obtenidos de la prueba Tukey para una edad del concreto de 3 días. Las combinaciones que no presentan diferencias significativas en su promedio se marcan en color gris, con lo cual se concluye que a un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$  las combinaciones resaltadas corresponden a pares de mezclas de concreto con desarrollos de resistencias similares a 3 días de elaboradas las mezclas.

**Cuadro 3.25** Resultados prueba de Tukey para promedios de resistencia a 3 días

Combinación		Diferencia	W	¿Existe una diferencia significativa?
Mezcla No. 1	Mezcla No. 2	5.42	1.18	Sí
Mezcla No. 1	Mezcla No. 5	8.98	1.18	Sí
Mezcla No. 1	Mezcla No. 6	8.84	1.18	Sí
Mezcla No. 2	Mezcla No. 5	3.56	1.18	Sí
Mezcla No. 2	Mezcla No. 6	3.42	1.18	Sí
Mezcla No. 5	Mezcla No. 6	0.14	1.18	No

**Cuadro 3.26** Resultados prueba de Tukey para promedios de resistencia ganada a 3 días

Combinación		Diferencia	W	¿Existe una diferencia significativa?
Mezcla No. 1	Mezcla No. 2	15.87	3.15	Sí
Mezcla No. 1	Mezcla No. 5	17.22	3.15	Sí
Mezcla No. 1	Mezcla No. 6	22.58	3.15	Sí
Mezcla No. 2	Mezcla No. 5	1.36	3.15	No
Mezcla No. 2	Mezcla No. 6	6.71	3.15	Sí
Mezcla No. 5	Mezcla No. 6	5.35	3.15	Sí

### Análisis a una edad de 7 días del concreto

En el Cuadro 3.27 y el Cuadro 3.28 se presentan los resultados obtenidos de la prueba Tukey para una edad del concreto de 7 días. Las combinaciones que no presentan diferencias significativas en su promedio se marcan en gris, con lo cual se concluye que a un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$  las combinaciones resaltadas corresponden a pares de mezclas de concreto con desarrollos de resistencias similares a 7 días de elaboradas las mezclas.

**Cuadro 3.27** Resultados prueba de Tukey para promedios de resistencia a 7 días

Combinación		Diferencia	W	¿Existe una diferencia significativa?
Mezcla No. 1	Mezcla No. 2	1.56	1.94	No
Mezcla No. 1	Mezcla No. 3	0.89	1.94	No
Mezcla No. 1	Mezcla No. 4	0.45	1.94	No
Mezcla No. 1	Mezcla No. 5	7.49	1.94	Sí
Mezcla No. 1	Mezcla No. 6	5.60	1.94	Sí
Mezcla No. 2	Mezcla No. 3	2.45	1.94	Sí
Mezcla No. 2	Mezcla No. 4	2.01	1.94	Sí
Mezcla No. 2	Mezcla No. 5	5.93	1.94	Sí
Mezcla No. 2	Mezcla No. 6	4.04	1.94	Sí
Mezcla No. 3	Mezcla No. 4	0.44	1.94	No
Mezcla No. 3	Mezcla No. 5	8.38	1.94	Sí
Mezcla No. 3	Mezcla No. 6	6.49	1.94	Sí
Mezcla No. 4	Mezcla No. 5	7.94	1.94	Sí
Mezcla No. 4	Mezcla No. 6	6.05	1.94	Sí
Mezcla No. 5	Mezcla No. 6	1.90	1.94	No

**Cuadro 3.28** Resultados prueba de Tukey para promedios de resistencia ganada a 7 días

Combinación		Diferencia	W	¿Existe una diferencia significativa?
Mezcla No. 1	Mezcla No. 2	4.61	6.02	No
Mezcla No. 1	Mezcla No. 3	7.34	6.02	Sí
Mezcla No. 1	Mezcla No. 4	14.30	6.02	Sí
Mezcla No. 1	Mezcla No. 5	9.52	6.02	Sí
Mezcla No. 1	Mezcla No. 6	12.14	6.02	Sí
Mezcla No. 2	Mezcla No. 3	2.73	6.02	No
Mezcla No. 2	Mezcla No. 4	9.69	6.02	Sí
Mezcla No. 2	Mezcla No. 5	4.91	6.02	No
Mezcla No. 2	Mezcla No. 6	7.54	6.02	Sí
Mezcla No. 3	Mezcla No. 4	6.96	6.02	Sí
Mezcla No. 3	Mezcla No. 5	2.17	6.02	No
Mezcla No. 3	Mezcla No. 6	4.80	6.02	No
Mezcla No. 4	Mezcla No. 5	4.78	6.02	No
Mezcla No. 4	Mezcla No. 6	2.15	6.02	No
Mezcla No. 5	Mezcla No. 6	2.63	6.02	No

#### Análisis a una edad de 28 días del concreto

En el Cuadro 3.29 se presentan los resultados obtenidos de la prueba Tukey para una edad del concreto de 28 días. Las combinaciones que no presentan diferencias significativas en su promedio se marcan en gris, con lo cual se concluye que a un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$  las combinaciones resaltadas corresponden a pares de mezclas de concreto con desarrollos de resistencias similares a 28 días de elaboradas las mezclas.

**Cuadro 3.29** Resultados prueba de Tukey para promedios de resistencia a 28 días

Combinación		Diferencia	W	¿Existe una diferencia significativa?
Mezcla No. 1	Mezcla No. 2	0.02	2.03	No
Mezcla No. 1	Mezcla No. 3	4.53	2.03	Sí
Mezcla No. 1	Mezcla No. 4	6.51	2.03	Sí
Mezcla No. 1	Mezcla No. 5	5.48	2.03	Sí
Mezcla No. 1	Mezcla No. 6	1.80	2.03	No
Mezcla No. 2	Mezcla No. 3	4.51	2.03	Sí
Mezcla No. 2	Mezcla No. 4	6.49	2.03	Sí
Mezcla No. 2	Mezcla No. 5	5.50	2.03	Sí
Mezcla No. 2	Mezcla No. 6	1.82	2.03	No
Mezcla No. 3	Mezcla No. 4	1.98	2.03	No
Mezcla No. 3	Mezcla No. 5	10.01	2.03	Sí
Mezcla No. 3	Mezcla No. 6	6.33	2.03	Sí
Mezcla No. 4	Mezcla No. 5	11.99	2.03	Sí
Mezcla No. 4	Mezcla No. 6	8.31	2.03	Sí
Mezcla No. 5	Mezcla No. 6	3.68	2.03	Sí

#### Análisis a una edad de 56 días del concreto

En el Cuadro 3.30 y el Cuadro 3.31 se presentan los resultados obtenidos de la prueba Tukey para una edad del concreto de 56 días. Las combinaciones que no presentan diferencias significativas en su promedio se marcan en gris, con lo cual se concluye que a un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$  las combinaciones resaltadas corresponden a pares de mezclas de concreto con desarrollos de resistencias similares a 56 días de elaboradas las mezclas.

**Cuadro 3.30** Resultados prueba de Tukey para promedios de resistencia a 56 días

<b>Combinación</b>		<b>Diferencia</b>	<b>W</b>	<b>¿Existe una diferencia significativa?</b>
Mezcla No. 1	Mezcla No. 2	5.05	1.80	Sí
Mezcla No. 1	Mezcla No. 3	7.71	1.80	Sí
Mezcla No. 1	Mezcla No. 4	12.80	1.80	Sí
Mezcla No. 1	Mezcla No. 5	0.39	1.80	No
Mezcla No. 1	Mezcla No. 6	5.32	1.80	Sí
Mezcla No. 2	Mezcla No. 3	2.66	1.80	Sí
Mezcla No. 2	Mezcla No. 4	7.75	1.80	Sí
Mezcla No. 2	Mezcla No. 5	5.44	1.80	Sí
Mezcla No. 2	Mezcla No. 6	0.27	1.80	No
Mezcla No. 3	Mezcla No. 4	5.08	1.80	Sí
Mezcla No. 3	Mezcla No. 5	8.10	1.80	Sí
Mezcla No. 3	Mezcla No. 6	2.39	1.80	Sí
Mezcla No. 4	Mezcla No. 5	13.19	1.80	Sí
Mezcla No. 4	Mezcla No. 6	7.48	1.80	Sí
Mezcla No. 5	Mezcla No. 6	5.71	1.80	Sí

**Cuadro 3.31** Resultados prueba de Tukey para promedios de resistencia ganada a 56 días

Combinación		Diferencia	W	¿Existe una diferencia significativa?
Mezcla No. 1	Mezcla No. 2	14.69	5.33	Sí
Mezcla No. 1	Mezcla No. 3	7.25	5.33	Sí
Mezcla No. 1	Mezcla No. 4	17.33	5.33	Sí
Mezcla No. 1	Mezcla No. 5	15.96	5.33	Sí
Mezcla No. 1	Mezcla No. 6	20.90	5.33	Sí
Mezcla No. 2	Mezcla No. 3	7.44	5.33	Sí
Mezcla No. 2	Mezcla No. 4	2.64	5.33	No
Mezcla No. 2	Mezcla No. 5	1.26	5.33	No
Mezcla No. 2	Mezcla No. 6	6.21	5.33	Sí
Mezcla No. 3	Mezcla No. 4	10.08	5.33	Sí
Mezcla No. 3	Mezcla No. 5	8.71	5.33	Sí
Mezcla No. 3	Mezcla No. 6	13.65	5.33	Sí
Mezcla No. 4	Mezcla No. 5	1.38	5.33	No
Mezcla No. 4	Mezcla No. 6	3.57	5.33	No
Mezcla No. 5	Mezcla No. 6	4.94	5.33	No

### 3.3 Resistencia a la compresión en concretos elaborados

En esta sección se presentarán los resultados de la caracterización de las mezclas de concreto y falla de los cilindros, mostrándose las curvas que exponen el comportamiento de la resistencia respecto a la edad del concreto, intervalos de confianza para cada una de las resistencias promedios obtenidas a las diferentes edades del concreto, ecuaciones para predecir el comportamiento del desarrollo de resistencia de las mezclas a partir de una regresión logarítmica y comparaciones en el desarrollo de resistencia a la compresión entre las mezclas de concreto elaboradas que corroboren los resultados mostrados en la **sección 3.2**.

El detalle de los ensayos de caracterización de las mezclas de concreto y los resultados de las fallas de los cilindros de cada una se muestran en el **Apéndice B**.

### 3.3.1 Resistencia a la compresión en cemento hidráulico modificado mixto clase A con escoria de alto horno y caliza de clase de resistencia 28: MM/A (E-C) – 28

Mezcla No. 1: Cemento MM/A (E-C) – 28 con agregado de río

Los resultados de la caracterización de la mezcla de concreto se presentan en el Cuadro 3.32. Nótese de los resultados mostrados en el cuadro que el revenimiento obtenido para la mezcla se encuentra dentro del intervalo de 120 mm  $\pm$  20 mm establecido previamente, y que la relación agua – cemento presenta un valor cercano al determinado en el diseño de mezcla.

**Cuadro 3.32** Propiedades mezcla de concreto elaborada con cemento MM/A (E-C) – 28 y agregado de río

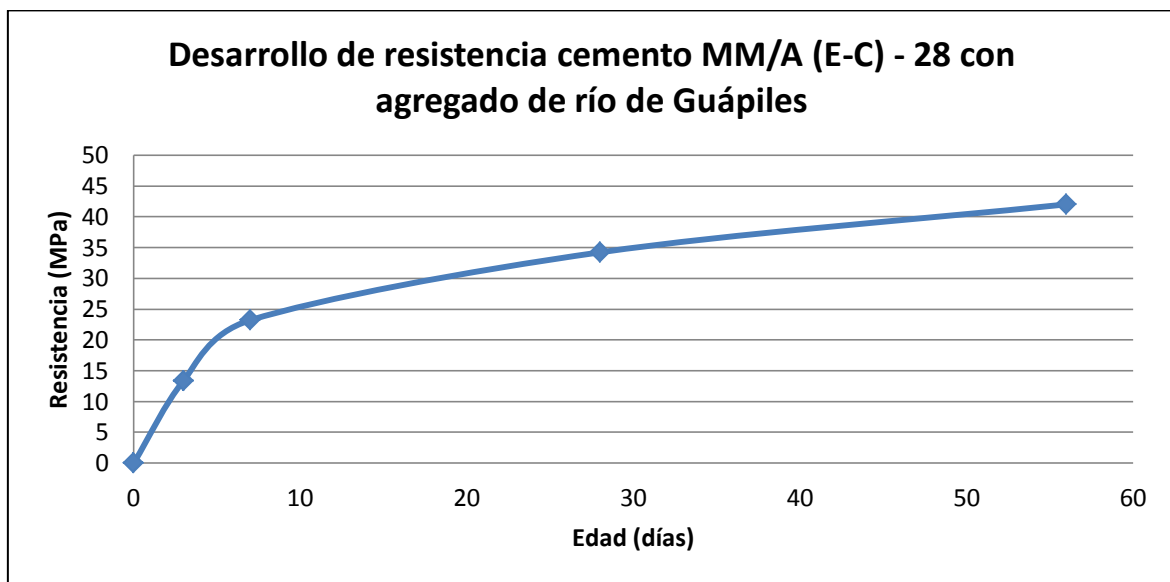
<b>Caracterización concreto fresco</b>			
<b>Dato</b>	<b>Valor obtenido</b>	<b>Dato</b>	<b>Valor obtenido</b>
Revenimiento (mm)	125.0	pH agua	7.45
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2352	a/c diseño de mezcla	0.57
Contenido de aire (%)	1.4	a/c experimental	0.58
Temperatura (°C)	24.8	Proporción	1 : 2.18 : 2.48
<b>Caracterización concreto endurecido</b>			
<b>Dato</b>			<b>Valor obtenido</b>
Pérdida promedio en superficie por el método de corte rotativo (g)			0.35 <sup>15</sup>
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )			2357

Seguidamente, en el Cuadro 3.33, se presentan los resultados promedios de resistencia a la compresión simple de los cilindros de concreto elaborados para cada edad de falla. De acuerdo a los valores promedios y a la desviación estándar entre los resultados obtenidos se determinaron los intervalos de confianza de la resistencia a la compresión para cada edad mostrados en el Cuadro 3.33, a un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ . Esto último para concluir que, a un 95 % de confiabilidad, la resistencia a la compresión promedio a cada edad del concreto elaborado se encuentra entre los rangos mostrados en el cuadro. La curva de desarrollo de resistencia para la mezcla de concreto se muestra en la Figura 3.9.

<sup>15</sup> Resultado para una carga de 89.2 N, en norma se indica como mínimo 98 N

**Cuadro 3.33** Resistencia a la compresión promedio de los cilindros de concreto elaborados con cemento MM/A (E-C) - 28 y agregado de río

Edad del concreto (días)	Resistencia a la compresión (MPa)			Desarrollo de resistencia en función de resultados a los 28 días (%)
	Promedio	Límite superior	Límite inferior	
3	13.40	13.82	12.98	39.15
7 <sup>16</sup>	23.21	24.29	22.14	67.82
28	34.23	35.53	32.93	100.00
56	42.02	42.86	41.18	122.76



**Figura 3.9** Curva de desarrollo de resistencia para concreto elaborado con cemento MM/A (E-C) - 28 y agregado de río

A partir de los resultados mostrados en el Cuadro 3.33 se procedió determinar una ecuación la cual describiera el comportamiento de la resistencia del concreto elaborado a través del tiempo y con ello concluir que tan adecuado o no resulta predecir la resistencia de la mezcla de concreto a partir de un modelo numérico. Basado en un modelo de regresión se determinó que la ecuación que mejor se ajusta al comportamiento de la curva de desarrollo de resistencia de la mezcla elaborada es logarítmica, obteniendo como resultado la siguiente ecuación:

<sup>16</sup> Especímenes fallados a 8 días de elaborarse la mezcla



$$f_c = 9.6158 * \ln(t) + 2.8887$$

Dónde el  $t$  representa la edad del concreto en días,  $f'_c$  la resistencia a la compresión en MPa del concreto elaborado con cemento MM/A (E-C) – 28 y agregado de río, y el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de la ecuación es de 0.9983. La comparación entre la ecuación mostrada y los resultados obtenidos experimentalmente se presentan en el Cuadro 3.34.

**Cuadro 3.34** Comparación entre la resistencia a la compresión promedio y su proyección para mezcla de concreto elaborada con cemento MM/A (E-C) - 28 y agregado de río

Edad del concreto (días)	Resistencia a la compresión (MPa)		
	Promedio	Proyección	Diferencia
3	13.40	13.45	0.05
7	23.21	22.88	0.33
28	34.23	34.93	0.70
56	42.02	41.60	0.42

De los resultados mostrados en el Cuadro 3.34 se aprecia que existe una similitud apropiada entre los datos experimentales y los valores dados por la ecuación, por lo que se infiere que el aplicar una proyección para determinar la resistencia de la mezcla elaborada con los elementos constituyentes anteriormente destacados resulta adecuado bajo las condiciones obtenidas en la caracterización de la mezcla.

Mezcla No. 2: Cemento MM/A (E-C) – 28 con agregado de tajo

Los resultados de la caracterización de la mezcla de concreto se presentan en el Cuadro 3.35. Nótese de los resultados mostrados en el cuadro que el revenimiento obtenido para la mezcla se encuentra dentro del intervalo de  $120 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$  establecido previamente, y que la relación agua – cemento presenta un valor cercano al determinado en el diseño de mezcla.

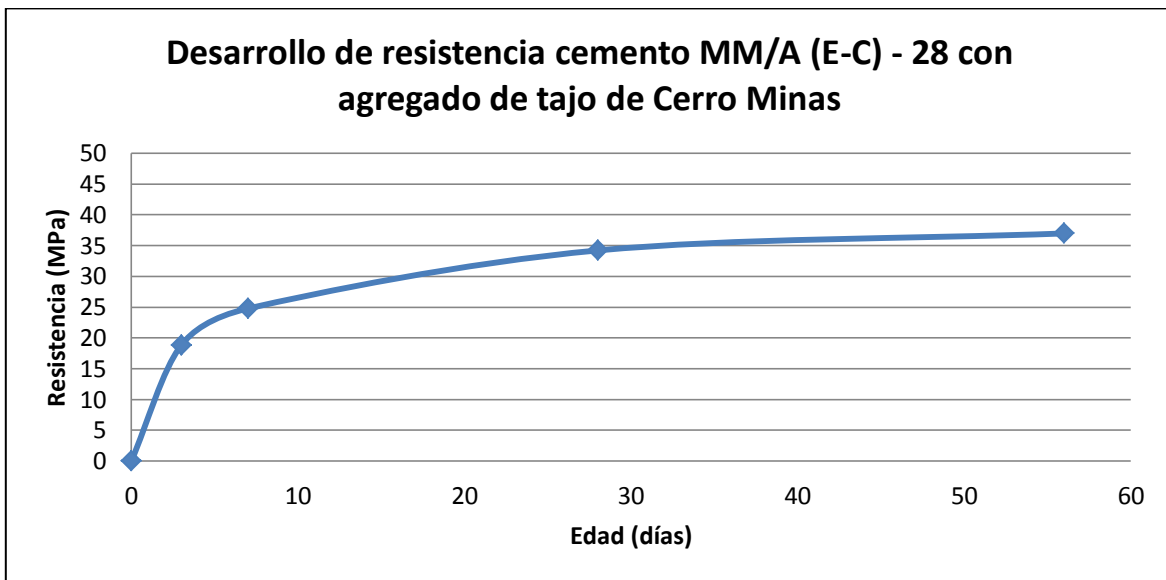
**Cuadro 3.35** Propiedades mezcla de concreto elaborada con cemento MM/A (E-C) – 28 y agregado de tajo

<b>Caracterización concreto fresco</b>			
<b>Dato</b>	<b>Valor obtenido</b>	<b>Dato</b>	<b>Valor obtenido</b>
Revenimiento (mm)	120.0	pH agua	7.44
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2281	a/c diseño de mezcla	0.57
Contenido de aire (%)	1.3	a/c experimental	0.58
Temperatura (°C)	24.9	Proporción	1 : 2.13 : 2.52
<b>Caracterización concreto endurecido</b>			
<b>Dato</b>			<b>Valor obtenido</b>
Pérdida promedio en superficie por el método de corte rotativo (g)			0.17
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )			2308

Seguidamente, en el Cuadro 3.36, se presentan los resultados promedios de resistencia a la compresión simple de los cilindros de concreto elaborados para cada edad de falla. De acuerdo a los valores promedios y a la desviación estándar entre los resultados obtenidos se determinaron los intervalos de confianza de la resistencia a la compresión para cada edad mostrados en el Cuadro 3.36, a un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ . Esto último para concluir que, a un 95 % de confiabilidad, la resistencia a la compresión promedio a cada edad del concreto elaborado se encuentra entre los rangos mostrados en el cuadro. La curva de desarrollo de resistencia para la mezcla de concreto se muestra en la Figura 3.10.

**Cuadro 3.36** Resistencia a la compresión promedio de los cilindros de concreto elaborados con cemento MM/A (E-C) - 28 y agregado de tajo

Edad del concreto (días)	Resistencia a la compresión (MPa)			Desarrollo de resistencia en función de resultados a los 28 días (%)
	Promedio	Límite superior	Límite inferior	
3	18.82	19.30	18.34	55.01
7	24.78	25.35	24.20	72.43
28	34.21	35.53	32.90	100.00
56	36.97	37.76	36.18	108.07



**Figura 3.10** Curva de desarrollo de resistencia para concreto elaborado con cemento MM/A (E-C) - 28 y agregado de tajo

A partir de los resultados mostrados en el Cuadro 3.36 se procedió determinar una ecuación la cual describiera el comportamiento de la resistencia del concreto elaborado a través del tiempo y con ello concluir que tan adecuado o no resulta predecir la resistencia de la mezcla de concreto a partir de un modelo numérico. Basado en un modelo de regresión se determinó que la ecuación que mejor se ajusta al comportamiento de la curva de desarrollo de resistencia de la mezcla elaborada es logarítmica, obteniendo como resultado la siguiente ecuación:

$$f_c = 6.3285 * \ln(t) + 12.238$$

Dónde el  $t$  representa la edad del concreto en días,  $f'_c$  la resistencia a la compresión en MPa del concreto elaborado con cemento MM/A (E-C) – 28 y agregado de tajo, y el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de la ecuación es de 0.9928. La comparación entre la ecuación mostrada y los resultados obtenidos experimentalmente se presentan en el Cuadro 3.37.

**Cuadro 3.37** Comparación entre la resistencia a la compresión promedio y su proyección para mezcla de concreto elaborada con cemento MM/A (E-C) - 28 y agregado de tajo

Edad del concreto (días)	Resistencia a la compresión (MPa)		
	Promedio	Proyección	Diferencia
3	18.82	19.19	0.37
7	24.78	24.55	0.23
28	34.21	33.33	0.88
56	36.97	37.71	0.74

De los resultados mostrados en el Cuadro 3.37 se aprecia que existe una similitud apropiada entre los datos experimentales y los valores dados por la ecuación, por lo que se infiere que el aplicar una proyección para determinar la resistencia de la mezcla elaborada con los elementos constituyentes anteriormente destacados resulta adecuado bajo las condiciones obtenidas en la caracterización de la mezcla.

### 3.3.2 Resistencia a la compresión en cemento hidráulico modificado mixto clase B con puzolana y caliza de clase de resistencia 28: MM/B (P-C) – 28

Mezcla No. 3: Cemento MM/B (P-C) – 28 con agregado de río

Los resultados de la caracterización de la mezcla de concreto se presentan en el Cuadro 3.38. Nótese de los resultados mostrados en el cuadro que el revenimiento obtenido para la mezcla se encuentra dentro del intervalo de 120 mm  $\pm$  20 mm establecido previamente, y que la relación agua – cemento presenta el mismo valor al determinado en el diseño de mezcla.

**Cuadro 3.38** Propiedades mezcla de concreto elaborada con cemento MM/B (P-C) – 28 y agregado de río

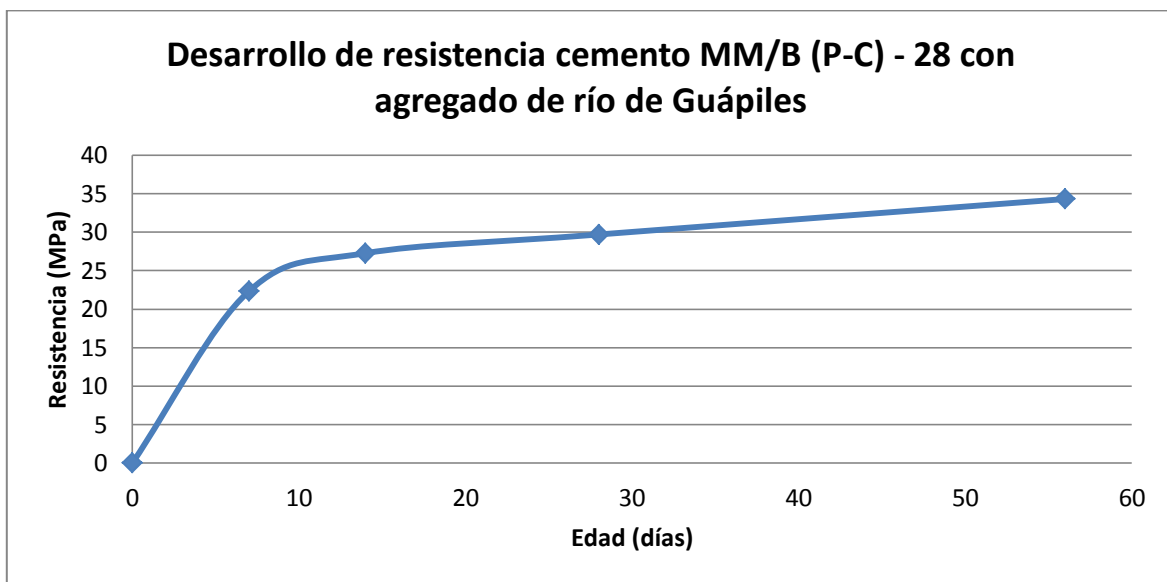
<b>Caracterización concreto fresco</b>			
<b>Dato</b>	<b>Valor obtenido</b>	<b>Dato</b>	<b>Valor obtenido</b>
Revenimiento (mm)	110.0	pH agua	7.32
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2335	a/c diseño de mezcla	0.57
Contenido de aire (%)	1.6	a/c experimental	0.57
Temperatura (°C)	26.0	Proporción	1 : 2.18 : 2.48
<b>Caracterización concreto endurecido</b>			
<b>Dato</b>			<b>Valor obtenido</b>
Pérdida promedio en superficie por el método de corte rotativo (g)			0.76 <sup>17</sup>
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )			2343

Seguidamente, en el Cuadro 3.39, se presentan los resultados promedios de resistencia a la compresión simple de los cilindros de concreto elaborados para cada edad de falla. De acuerdo a los valores promedios y a la desviación estándar entre los resultados obtenidos se determinaron los intervalos de confianza de la resistencia a la compresión para cada edad mostrados en el Cuadro 3.39, a un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ . Esto último para concluir que, a un 95 % de confiabilidad, la resistencia a la compresión promedio a cada edad del concreto elaborado se encuentra entre los rangos mostrados en el cuadro. La curva de desarrollo de resistencia para la mezcla de concreto se muestra en la Figura 3.11.

<sup>17</sup> Resultado para una carga de 89.2 N, en norma se indica como mínimo 98 N

**Cuadro 3.39** Resistencia a la compresión promedio de los cilindros de concreto elaborados con cemento MM/B (P-C) - 28 y agregado de río

Edad del concreto (días)	Resistencia a la compresión (MPa)			Desarrollo de resistencia en función de resultados a los 28 días (%)
	Promedio	Límite superior	Límite inferior	
7	22.32	23.81	20.84	75.16
14 <sup>18</sup>	27.27	28.72	25.83	91.82
28	29.70	30.34	29.06	100.00
56	34.31	35.47	33.15	115.51



**Figura 3.11** Curva de desarrollo de resistencia para concreto elaborado con cemento MM/B (P-C) - 28 y agregado de río

A partir de los resultados mostrados en el Cuadro 3.39 se procedió determinar una ecuación la cual describiera el comportamiento de la resistencia del concreto elaborado a través del tiempo y con ello concluir que tan adecuado o no resulta predecir la resistencia de la mezcla de concreto a partir de un modelo numérico. Basado en un modelo de regresión se determinó que la ecuación que mejor se ajusta al comportamiento de la curva de desarrollo de resistencia de la mezcla elaborada es logarítmica, obteniendo como resultado la siguiente ecuación:

<sup>18</sup> Especímenes fallados a 15 días de elaborarse la mezcla

$$f_c = 5.6985 * \ln(t) + 11.561$$

Dónde el  $t$  representa la edad del concreto en días,  $f'_c$  la resistencia a la compresión en MPa del concreto elaborado con cemento MM/B (P-C) – 28 y agregado de río, y el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de la ecuación es de 0.9916. La comparación entre la ecuación mostrada y los resultados obtenidos experimentalmente se presentan en el Cuadro 3.40.

**Cuadro 3.40** Comparación entre la resistencia a la compresión promedio y su proyección para mezcla de concreto elaborada con cemento MM/B (P-C) - 28 y agregado de río

Edad del concreto (días)	Resistencia a la compresión (MPa)		
	Promedio	Proyección	Diferencia
7	22.32	22.65	0.32
14	27.27	26.99	0.28
28	29.70	30.55	0.85
56	34.31	34.50	0.19

De los resultados mostrados en el Cuadro 3.40 se aprecia que existe una similitud apropiada entre los datos experimentales y los valores dados por la ecuación, por lo que se infiere que el aplicar una proyección para determinar la resistencia de la mezcla elaborada con los elementos constituyentes anteriormente destacados resulta adecuado bajo las condiciones obtenidas en la caracterización de la mezcla.

Mezcla No. 4: Cemento MM/B (P-C) – 28 con agregado de tajo

Los resultados de la caracterización de la mezcla de concreto se presentan en el Cuadro 3.41. Nótese de los resultados mostrados en el cuadro que el revenimiento obtenido para la mezcla se encuentra dentro del intervalo de  $120 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$  establecido previamente, y que la relación agua – cemento presenta un valor cercano al determinado en el diseño de mezcla.

**Cuadro 3.41** Propiedades mezcla de concreto elaborada con cemento MM/B (P-C) – 28 y agregado de tajo

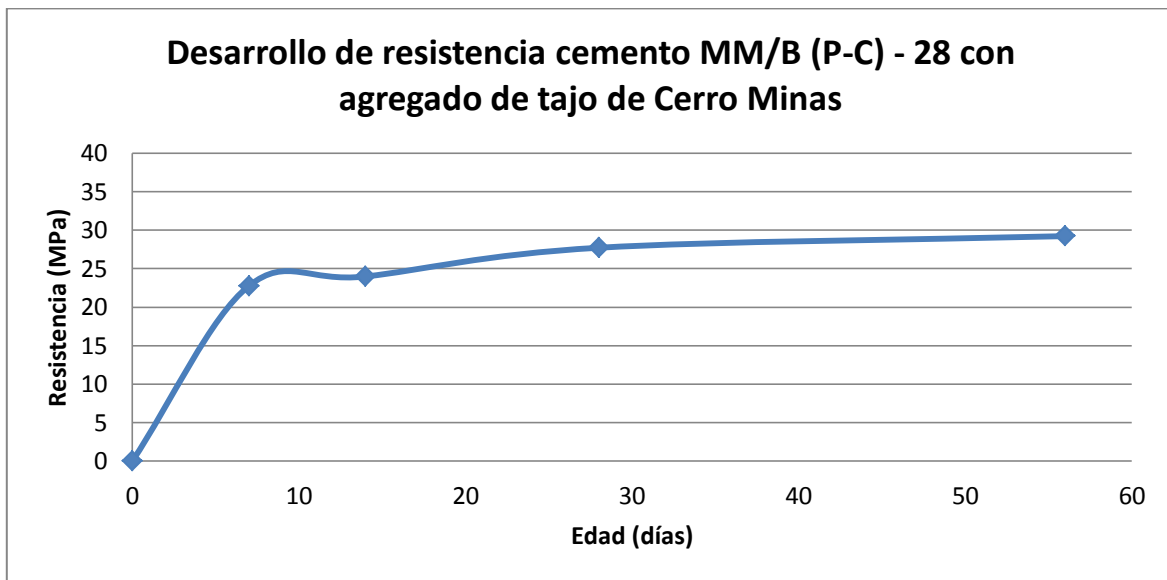
<b>Caracterización concreto fresco</b>			
<b>Dato</b>	<b>Valor obtenido</b>	<b>Dato</b>	<b>Valor obtenido</b>
Revenimiento (mm)	100.0	pH agua	7.38
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2270	a/c diseño de mezcla	0.57
Contenido de aire (%)	1.7	a/c experimental	0.58
Temperatura (°C)	24.9	Proporción	1 : 2.13 : 2.52
<b>Caracterización concreto endurecido</b>			
<b>Dato</b>			<b>Valor obtenido</b>
Pérdida promedio en superficie por el método de corte rotativo (g)			0.32
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )			2296

Seguidamente, en el Cuadro 3.42, se presentan los resultados promedios de resistencia a la compresión simple de los cilindros de concreto elaborados para cada edad de falla. De acuerdo a los valores promedios y a la desviación estándar entre los resultados obtenidos se determinaron los intervalos de confianza de la resistencia a la compresión para cada edad mostrados en el Cuadro 3.42, a un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ . Esto último para concluir que, a un 95 % de confiabilidad, la resistencia a la compresión promedio a cada edad del concreto elaborado se encuentra entre los rangos mostrados en el cuadro. La curva de desarrollo de resistencia para la mezcla de concreto se muestra en la Figura 3.12.



**Cuadro 3.42** Resistencia a la compresión promedio de los cilindros de concreto elaborados con cemento MM/B (P-C) - 28 y agregado de tajo

Edad del concreto (días)	Resistencia a la compresión (MPa)			Desarrollo de resistencia en función de resultados a los 28 días (%)
	Promedio	Límite superior	Límite inferior	
7	22.76	23.23	22.30	82.12
14	23.99	24.57	23.40	86.53
28	27.72	28.08	27.36	100.00
56	29.23	29.53	28.92	105.43



**Figura 3.12** Curva de desarrollo de resistencia para concreto elaborado con cemento MM/B (P-C) - 28 y agregado de tajo

A partir de los resultados mostrados en el Cuadro 3.42 se procedió determinar una ecuación la cual describiera el comportamiento de la resistencia del concreto elaborado a través del tiempo y con ello concluir que tan adecuado o no resulta predecir la resistencia de la mezcla de concreto a partir de un modelo numérico. Basado en un modelo de regresión se determinó que la ecuación que mejor se ajusta al comportamiento de la curva de desarrollo de resistencia de la mezcla elaborada es logarítmica, obteniendo como resultado la siguiente ecuación:

$$f_c = 3.3353 * \ln(t) + 15.966$$

Dónde el  $t$  representa la edad del concreto en días,  $f'_c$  la resistencia a la compresión en MPa del concreto elaborado con cemento MM/B (P-C) – 28 y agregado de tajo, y el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de la ecuación es de 0.9589. La comparación entre la ecuación mostrada y los resultados obtenidos experimentalmente se presentan en el Cuadro 3.43.

**Cuadro 3.43** Comparación entre la resistencia a la compresión promedio y su proyección para mezcla de concreto elaborada con cemento MM/B (P-C) - 28 y agregado de tajo

Edad del concreto (días)	Resistencia a la compresión (MPa)		
	Promedio	Proyección	Diferencia
7	22.76	22.46	0.31
14	23.99	24.77	0.78
28	27.72	27.08	0.64
56	29.23	29.39	0.17

De los resultados mostrados en el Cuadro 3.43 se aprecia que existe una similitud apropiada entre los datos experimentales y los valores dados por la ecuación, por lo que se infiere que el aplicar una proyección para determinar la resistencia de la mezcla elaborada con los elementos constituyentes anteriormente destacados resulta adecuado bajo las condiciones obtenidas en la caracterización de la mezcla.

### 3.3.3 Resistencia a la compresión en cemento hidráulico modificado con puzolana clase A de alta resistencia inicial: MP A – AR

Mezcla No. 5: Cemento MP A – AR con agregado de río

Los resultados de la caracterización de la mezcla de concreto se presentan en el Cuadro 3.44. Nótese de los resultados mostrados en el cuadro que el revenimiento obtenido para la mezcla se encuentra dentro del intervalo de 120 mm  $\pm$  20 mm establecido previamente, y que la relación agua – cemento presenta un valor cercano al determinado en el diseño de mezcla.

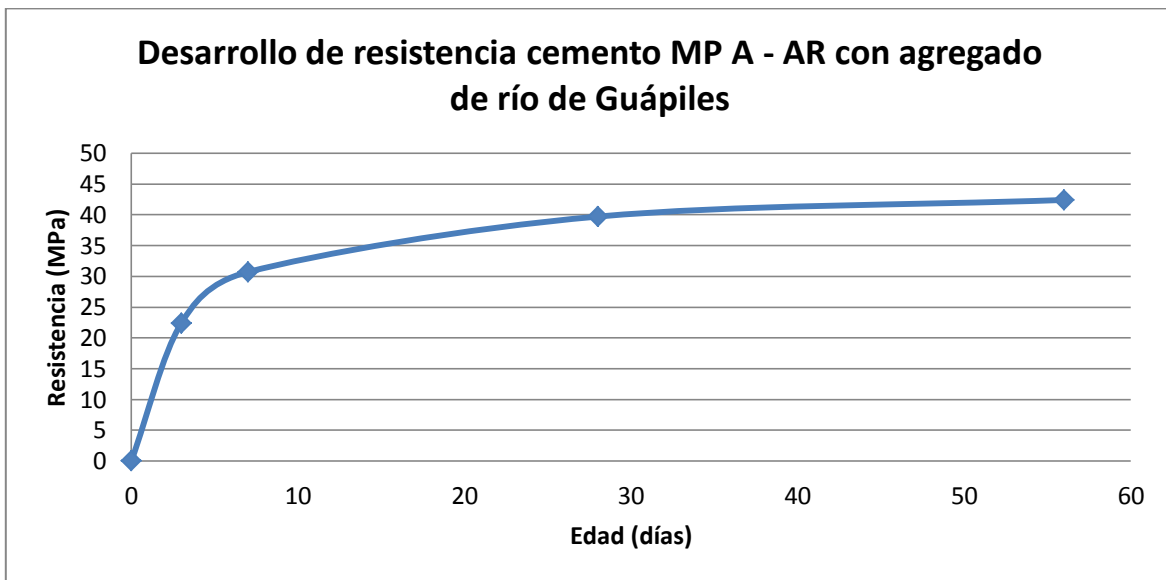
**Cuadro 3.44** Propiedades mezcla de concreto elaborada con cemento MP A – AR y agregado de río

<b>Caracterización concreto fresco</b>			
<b>Dato</b>	<b>Valor obtenido</b>	<b>Dato</b>	<b>Valor obtenido</b>
Revenimiento (mm)	140.0	pH agua	7.63
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2287	a/c diseño de mezcla	0.57
Contenido de aire (%)	2.0	a/c experimental	0.58
Temperatura (°C)	24.5	Proporción	1 : 2.18 : 2.48
<b>Caracterización concreto endurecido</b>			
<b>Dato</b>			<b>Valor obtenido</b>
Pérdida promedio en superficie por el método de corte rotativo (g)			0.35
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )			2335

Seguidamente, en el Cuadro 3.45, se presentan los resultados promedios de resistencia a la compresión simple de los cilindros de concreto elaborados para cada edad de falla. De acuerdo a los valores promedios y a la desviación estándar entre los resultados obtenidos se determinaron los intervalos de confianza de la resistencia a la compresión para cada edad mostrados en el Cuadro 3.45, a un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ . Esto último para concluir que, a un 95 % de confiabilidad, la resistencia a la compresión promedio a cada edad del concreto elaborado se encuentra entre los rangos mostrados en el cuadro. La curva de desarrollo de resistencia para la mezcla de concreto se muestra en la Figura 3.13.

**Cuadro 3.45** Resistencia a la compresión promedio de los cilindros de concreto elaborados con cemento MP A – AR y agregado de río

Edad del concreto (días)	Resistencia a la compresión (MPa)			Desarrollo de resistencia en función de resultados a los 28 días (%)
	Promedio	Límite superior	Límite inferior	
3	22.38	23.30	21.47	56.37
7	30.71	31.42	30.00	77.34
28	39.71	40.49	38.93	100.00
56	42.41	43.52	41.30	106.81



**Figura 3.13** Curva de desarrollo de resistencia para concreto elaborado con cemento MP A – AR y agregado de río

A partir de los resultados mostrados en el Cuadro 3.45 se procedió determinar una ecuación la cual describiera el comportamiento de la resistencia del concreto elaborado a través del tiempo y con ello concluir que tan adecuado o no resulta predecir la resistencia de la mezcla de concreto a partir de un modelo numérico. Basado en un modelo de regresión se determinó que la ecuación que mejor se ajusta al comportamiento de la curva de desarrollo de resistencia de la mezcla elaborada es logarítmica, obteniendo como resultado la siguiente ecuación:

$$f_c = 6.812 * \ln(t) + 16.088$$

Dónde el  $t$  representa la edad del concreto en días,  $f'c$  la resistencia a la compresión en MPa del concreto elaborado con cemento MP A – AR y agregado de río, y el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de la ecuación es de 0.9786. La comparación entre la ecuación mostrada y los resultados obtenidos experimentalmente se presentan en el Cuadro 3.46.

**Cuadro 3.46** Comparación entre la resistencia a la compresión promedio y su proyección para mezcla de concreto elaborada con cemento MP A – AR y agregado de río

Edad del concreto (días)	Resistencia a la compresión (MPa)		
	Promedio	Proyección	Diferencia
3	22.38	23.57	1.19
7	30.71	29.34	1.37
28	39.71	38.79	0.92
56	42.41	43.51	1.10

De los resultados mostrados en el Cuadro 3.46 se aprecia que existe una similitud apropiada entre los datos experimentales y los valores dados por la ecuación, por lo que se infiere que el aplicar una proyección para determinar la resistencia de la mezcla elaborada con los elementos constituyentes anteriormente destacados resulta adecuado bajo las condiciones obtenidas en la caracterización de la mezcla.

Mezcla No. 6: Cemento MP A – AR con agregado de tajo

Los resultados de la caracterización de la mezcla de concreto se presentan en el Cuadro 3.47. Nótese de los resultados mostrados en el cuadro que el revenimiento obtenido para la mezcla se encuentra dentro del intervalo de 120 mm  $\pm$  20 mm establecido previamente, y que la relación agua – cemento presenta un valor cercano al determinado en el diseño de mezcla.

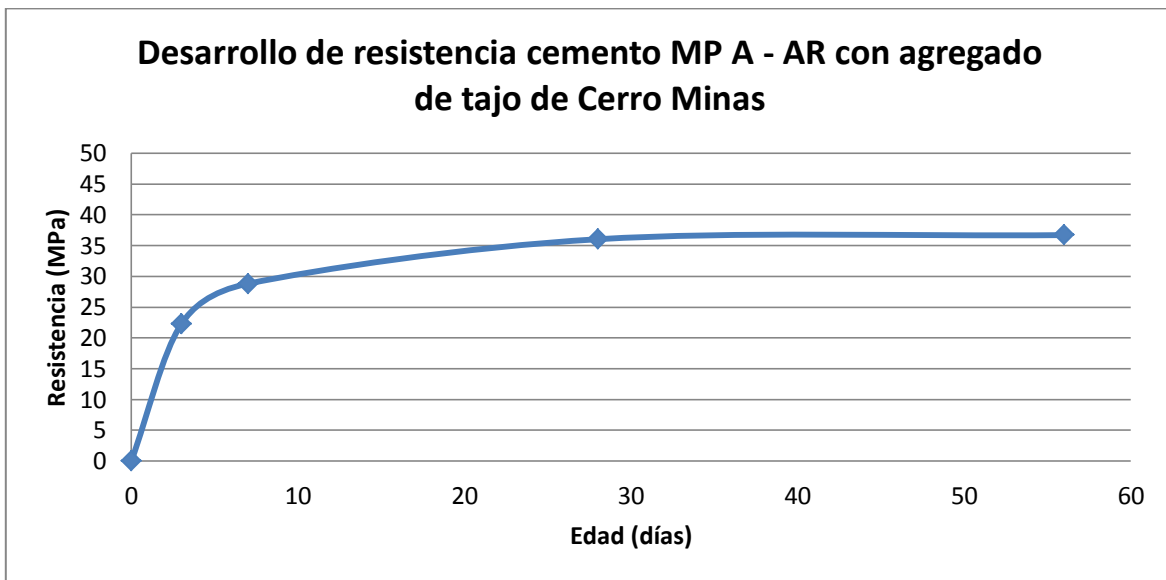
**Cuadro 3.47** Propiedades mezcla de concreto elaborada con cemento MP A – AR y agregado de tajo

<b>Caracterización concreto fresco</b>			
<b>Dato</b>	<b>Valor obtenido</b>	<b>Dato</b>	<b>Valor obtenido</b>
Revenimiento (mm)	100.0	pH agua	7.43
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2267	a/c diseño de mezcla	0.57
Contenido de aire (%)	1.9	a/c experimental	0.58
Temperatura (°C)	25.1	Proporción	1 : 2.13 : 2.52
<b>Caracterización concreto endurecido</b>			
<b>Dato</b>			<b>Valor obtenido</b>
Pérdida promedio en superficie por el método de corte rotativo (g)			0.27
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )			2303

Seguidamente, en el Cuadro 3.48, se presentan los resultados promedios de resistencia a la compresión simple de los cilindros de concreto elaborados para cada edad de falla. De acuerdo a los valores promedios y a la desviación estándar entre los resultados obtenidos se determinaron los intervalos de confianza de la resistencia a la compresión para cada edad mostrados en el Cuadro 3.48, a un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ . Esto último para concluir que, a un 95 % de confiabilidad, la resistencia a la compresión promedio a cada edad del concreto elaborado se encuentra entre los rangos mostrados en el cuadro. La curva de desarrollo de resistencia para la mezcla de concreto se muestra en la Figura 3.14.

**Cuadro 3.48** Resistencia a la compresión promedio de los cilindros de concreto elaborados con cemento MP A – AR y agregado de tajo

Edad del concreto (días)	Resistencia a la compresión (MPa)			Desarrollo de resistencia en función de resultados a los 28 días (%)
	Promedio	Límite superior	Límite inferior	
3	22.24	22.69	21.79	61.72
7	28.81	29.57	28.06	79.96
28	36.03	36.98	35.08	100.00
56	36.70	37.24	36.16	101.86



**Figura 3.14** Curva de desarrollo de resistencia para concreto elaborado con cemento MP A – AR y agregado de tajo

A partir de los resultados mostrados en el Cuadro 3.48 se procedió determinar una ecuación la cual describiera el comportamiento de la resistencia del concreto elaborado a través del tiempo y con ello concluir que tan adecuado o no resulta predecir la resistencia de la mezcla de concreto a partir de un modelo numérico. Basado en un modelo de regresión se determinó que la ecuación que mejor se ajusta al comportamiento de la curva de desarrollo de resistencia de la mezcla elaborada es logarítmica, obteniendo como resultado la siguiente ecuación:

$$f_c = 5.02183 * \ln(t) + 17.871$$

Dónde el  $t$  representa la edad del concreto en días,  $f'c$  la resistencia a la compresión en MPa del concreto elaborado con cemento MP A – AR y agregado de tajo, y el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de la ecuación es de 0.9524. La comparación entre la ecuación mostrada y los resultados obtenidos experimentalmente se presentan en el Cuadro 3.49.

**Cuadro 3.49** Comparación entre la resistencia a la compresión promedio y su proyección para mezcla de concreto elaborada con cemento MP A – AR y agregado de tajo

Edad del concreto (días)	Resistencia a la compresión (MPa)		
	Promedio	Proyección	Diferencia
3	22.24	23.39	1.15
7	28.81	27.64	1.17
28	36.03	34.60	1.43
56	36.70	38.09	1.38

De los resultados mostrados en el Cuadro 3.49 se aprecia que existe una similitud apropiada entre los datos experimentales y los valores dados por la ecuación, por lo que se infiere que el aplicar una proyección para determinar la resistencia de la mezcla elaborada con los elementos constituyentes anteriormente destacados resulta adecuado bajo las condiciones obtenidas en la caracterización de la mezcla.

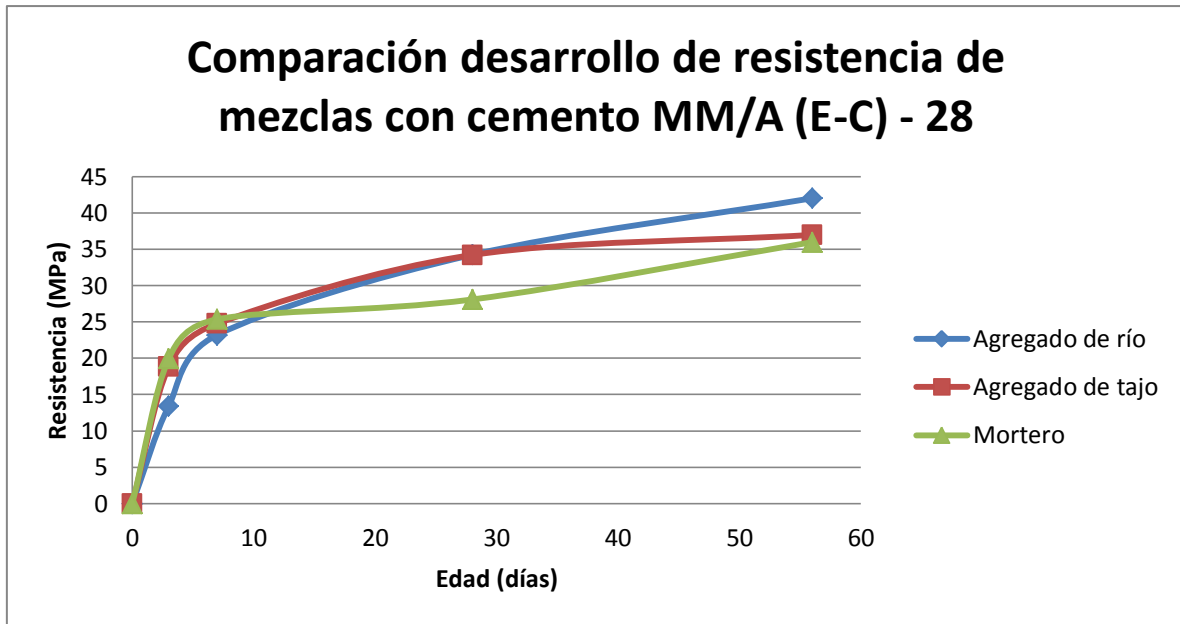
### 3.3.4 Comparación entre mezclas de concreto elaboradas

A continuación se presenta gráficas comparativas para evaluar el desarrollo de resistencia de las diferentes mezclas elaboradas y determinar las principales variaciones según los materiales empleados para la constitución de las mezclas.

#### Mezclas de concreto empleando cemento MM/A (E-C) – 28

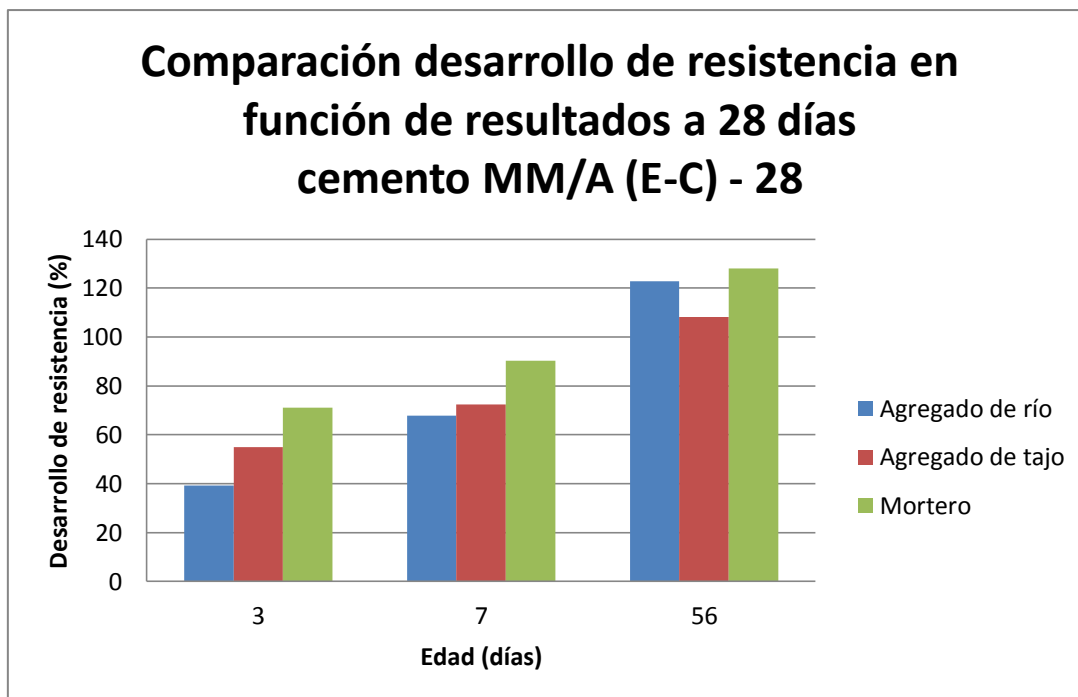
A partir de los resultados mostrados previamente en la sección 3.3.1 para las mezclas de concreto utilizando cemento MM/A (E-C) – 28 y los resultados mostrados en la sección 3.1.2 del mortero elaborado con el cemento en cuestión se elaboran los gráficos mostrados en la Figura 3.15 y la Figura 3.16.





**Figura 3.15** Comportamiento del desarrollo de resistencia de mezclas con cemento MM/A (E-C) – 28

Según los resultados mostrados en la **Figura 3.15** se aprecia que a las edades de 3 y 7 días el mortero del cemento MM/A (E-C) – 28 muestra una mayor resistencia que las mezclas de concreto; en tanto que para las edades de 28 días y 56 días el concreto elaborado con el cemento presenta una mayor resistencia que el mortero elaborado con el mismo cemento. Adicionalmente de la figura se aprecia que a las edades de 3 días y 7 días el concreto elaborado con agregado de tajo presenta una mayor resistencia que el concreto elaborado con agregado de río, lo cual se contrapone a los resultados a 56 días donde la mayor resistencia se obtiene para el concreto con agregado de río. A 28 días se aprecia que la resistencia del concreto elaborado con ambos agregados es muy similar.

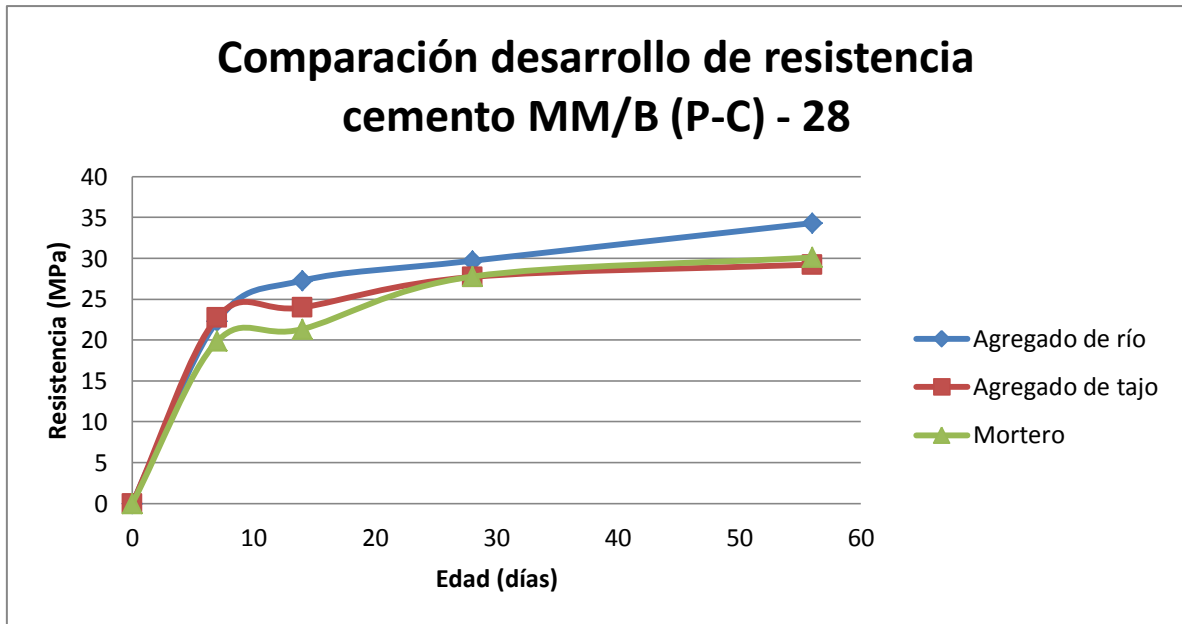


**Figura 3.16** Desarrollo de la resistencia con respecto a los resultados a 28 días para cemento MM/A (E-C) - 28

A partir de los resultados mostrados en la **Figura 3.16** se observa que aun después de los 28 días el concreto y el mortero elaborados con cemento MM/A (E-C) – 28 son capaces de obtener una resistencia mayor a la resistencia promedio a los 28 días. Asimismo se observa que para todas las edades señaladas en la figura el mortero presenta un mayor desarrollo de resistencia respecto a la resistencia a los 28 días que los concretos, en tanto que para las edades de 3 días y 7 días el concreto elaborado con agregado de tajo muestra un mayor desarrollo de resistencia respecto a su respectiva resistencia a los 28 días que el concreto elaborado con agregado de río, donde finalmente el concreto elaborado con agregado de río presenta un mayor desarrollo de resistencia a los 56 días que el concreto elaborado con agregado de tajo.

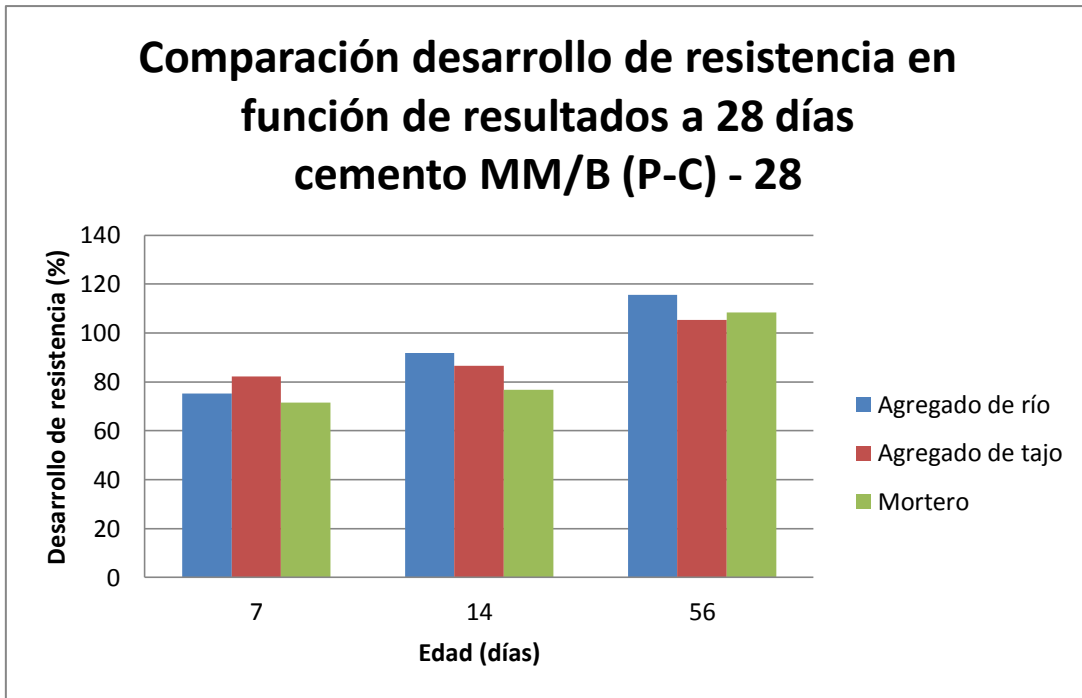
#### Mezclas de concreto empleando cemento MM/B (P-C) – 28

A partir de los resultados mostrados previamente en la **sección 3.3.2** para las mezclas de concreto utilizando cemento MM/B (P-C) – 28 y los resultados mostrados en la **sección 3.1.2** del mortero elaborado con el cemento en cuestión se elaboran los gráficos mostrados en la **Figura 3.17** y la **Figura 3.18**.



**Figura 3.17** Comportamiento del desarrollo de resistencia para cemento MM/B (P-C) – 28

Según los resultados mostrados en la **Figura 3.17** se aprecia un comportamiento muy variado para las diferentes edades de los especímenes elaborados, donde prevalece que la mayor resistencia en casi todas las edades se da en el concreto elaborado con el agregado de río, a excepción de la edad de 7 días donde la resistencia del concreto elaborado con el agregado de tajo es muy similar a la resistencia del concreto elaborado con el agregado de río. Finalmente de la figura se aprecia que para la edad de 14 días el concreto con agregado de tajo tiene una mayor resistencia que el mortero, a los 28 días el mortero y el concreto con agregado de tajo presentan una resistencia similar y a los 56 días el mortero tiene una mayor resistencia que el concreto elaborado con el agregado de tajo.



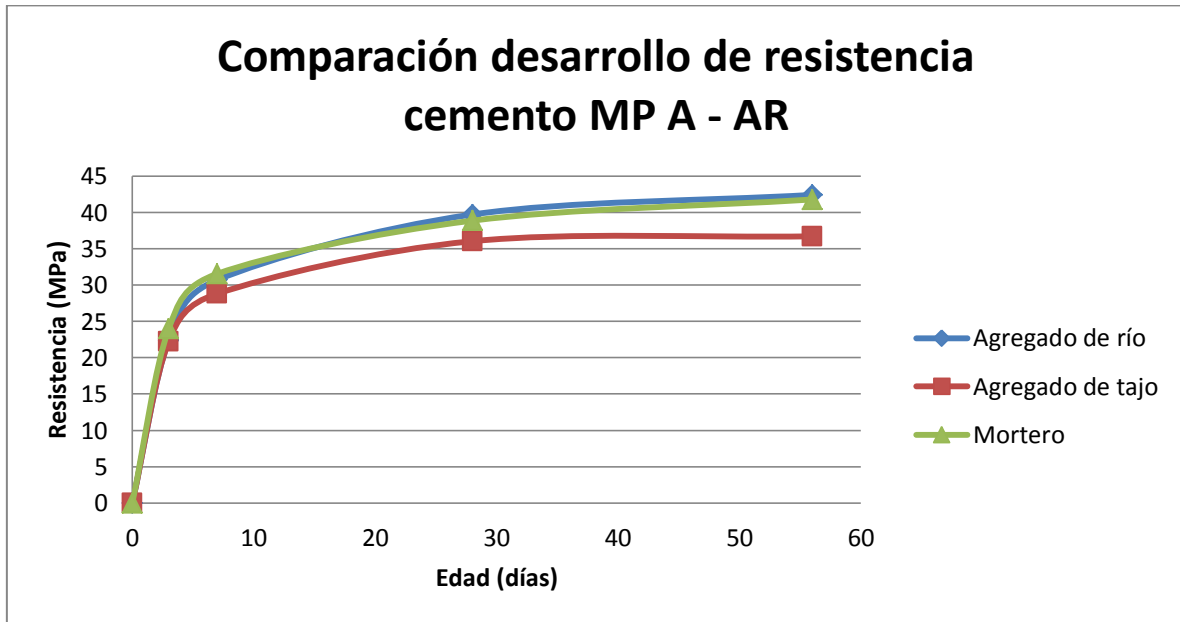
**Figura 3.18** Desarrollo de la resistencia con respecto a los resultados a 28 días para cemento MM/B (P-C) - 28

A partir de los resultados mostrados en la **Figura 3.18** se observa que aun después de los 28 días el concreto y el mortero elaborados con cemento MM/B (P-C) – 28 son capaces de obtener una resistencia mayor a la resistencia promedio a los 28 días. Asimismo se observa un comportamiento muy variado en el desarrollo de resistencia tanto del mortero como del concreto para las edades mostradas en la figura, lo cual concuerda con el comportamiento señalado para los resultados mostrados en la **Figura 3.17**. Para la edad de 7 días se aprecia que el mayor desarrollo de resistencia se da en el concreto con agregado de tajo y el menor en el mortero, a los 14 días el mayor desarrollo de resistencia se da en el concreto con agregado de río y el menor en el mortero, y finalmente a los 56 días el mayor desarrollo de resistencia se da en el concreto con agregado de río y el menor en el concreto con agregado de tajo.

#### Mezclas de concreto empleando cemento MP A - AR

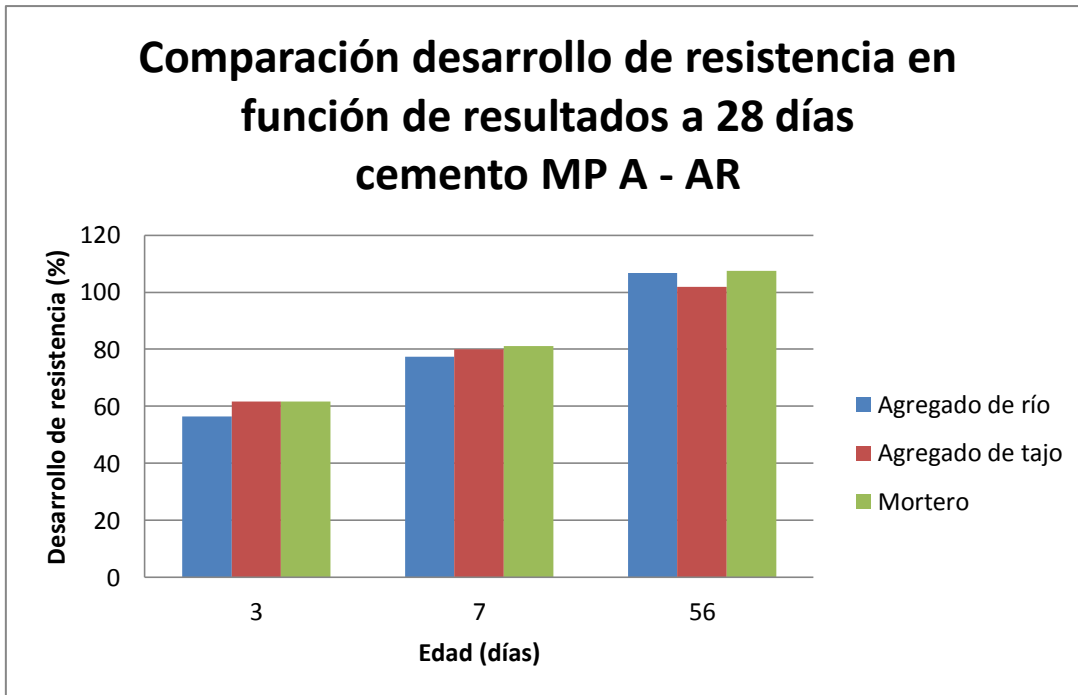
A partir de los resultados mostrados previamente en la **sección 3.3.3** para las mezclas de concreto utilizando cemento MP A - AR y los resultados mostrados en la **sección 3.1.2** del

mortero elaborado con el cemento en cuestión se elaboran los gráficos mostrados en la **Figura 3.19** y la **Figura 3.20**.



**Figura 3.19** Comportamiento del desarrollo de resistencia para cemento MP A - AR

Según los resultados mostrados en la **Figura 3.19** se aprecia que a la edad de 3 días la resistencia dada por las mezclas de concreto y el mortero elaborados con el cemento MP A – AR es muy similar; en tanto que para las edades de 7 días, 28 días y 56 días el concreto elaborado con el agregado de río presenta una resistencia similar a la del mortero (ligeramente mayor), donde el concreto elaborado con el agregado de tajo presenta la menor resistencia para las edades de 7 días , 28 días y 56 días.

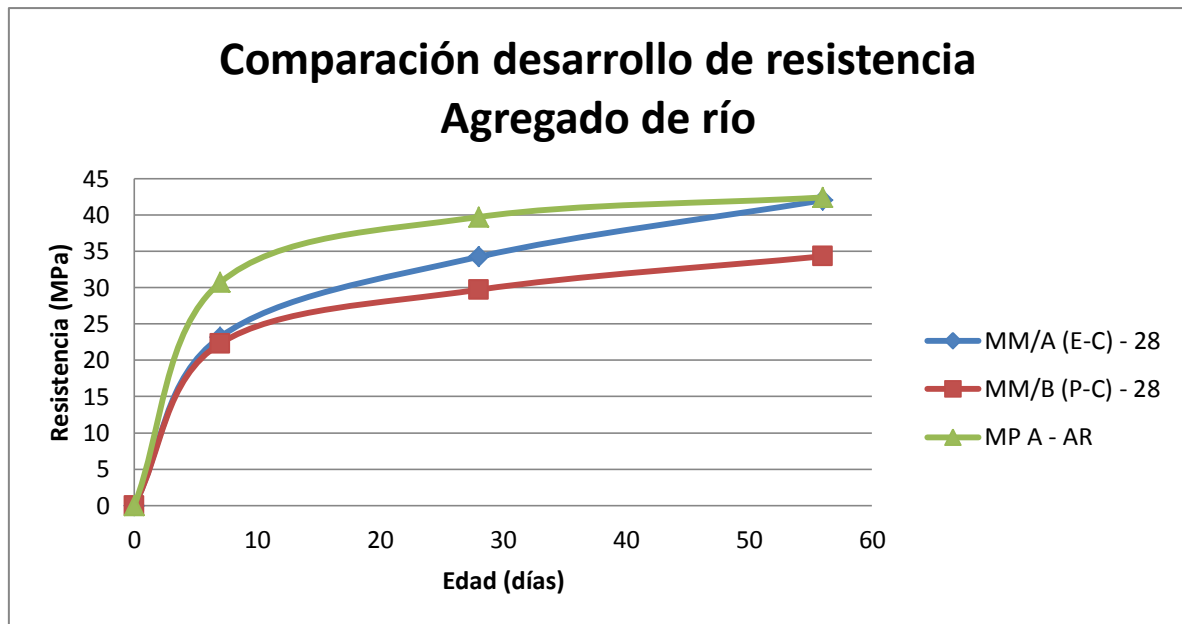


**Figura 3.20** Desarrollo de la resistencia con respecto a los resultados a 28 días para cemento MP A - AR

A partir de los resultados mostrados en la **Figura 3.20** se observa que aun después de los 28 días el concreto y el mortero elaborados con cemento MP A - AR son capaces de obtener una resistencia ligeramente mayor a la resistencia promedio a los 28 días. Asimismo se observa que para todas las edades señaladas en la figura el desarrollo de resistencia es muy similar entre las mezclas de concreto y el mortero, donde a los 3 días y 7 días el menor desarrollo de resistencia se da en el concreto elaborado con agregado de río, y a los 56 días el menor desarrollo de resistencia se da en el concreto elaborado con el agregado de tajo.

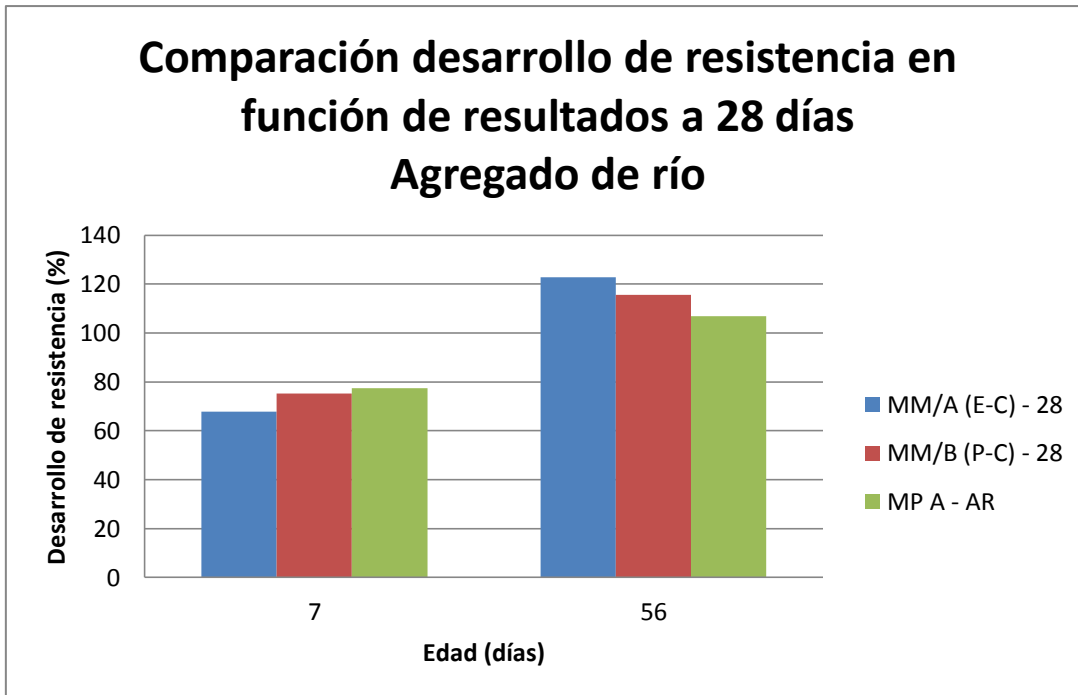
#### Mezclas de concreto empleando agregado de río

A partir de los resultados mostrados previamente en las **secciones 3.3.1, 3.3.2 y 3.3.3** para las mezclas de concreto utilizando agregado de río se elaboran los gráficos mostrados en la **Figura 3.21** y la **Figura 3.22**. Se indicará que debido al traslado de la falla de los especímenes elaborados con cemento MM/B (P-C) – 28 de 3 días a 14 días, los resultados a continuación se muestran para las edades de 7 días, 28 días y 56 días para comparar todas las mezclas elaboradas en las mismas edades de falla.



**Figura 3.21** Comportamiento del desarrollo de resistencia para concreto con agregado de río

Según los resultados mostrados en la **Figura 3.21** se aprecia que a las edades de 7 y 28 días la mayor resistencia la presenta la mezcla de concreto elaborada con el cemento MP A – AR, lo cual resulta apropiado ya que se trata de un cemento de alta resistencia inicial, donde para la edad de 56 días se presenta una resistencia muy similar entre las mezclas de concreto elaboradas con el cemento MP A – AR y MM/A (E-C) – 28. Aunque se aprecia que para todas las edades la menor resistencia la dio el concreto elaborado con el cemento MM/B (P-C) – 28, se destaca que para la edad de 7 días la resistencia entre las mezclas de concreto elaboradas con los cementos MM/A (E-C) – 28 y MM/B (P-C) – 28 es muy similar.



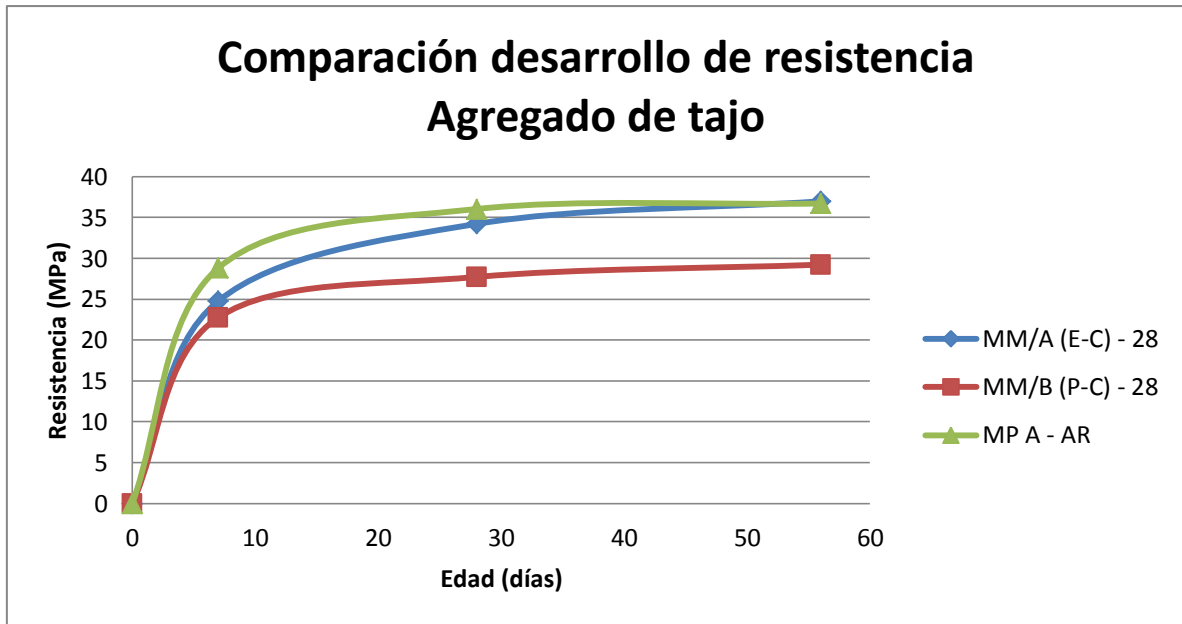
**Figura 3.22** Desarrollo de la resistencia con respecto a los resultados a 28 días para concreto con agregado de río

A partir de los resultados mostrados en la **Figura 3.22** se observa un comportamiento esperado entre las mezclas de concreto elaborados, ya que a los 7 días el mayor desarrollo de resistencia se da por parte del concreto elaborado con el cemento MP A – AR, donde para la edad de 56 días esta mezcla de concreto resulta ser la que presenta el menor desarrollo de resistencia. De manera opuesta la mezcla de concreto elaborada con el cemento MM/A (E-C) – 28 presenta el menor desarrollo de resistencia a los 7 días y el mayor desarrollo de resistencia a los 56 días.

#### Mezclas de concreto empleando agregado de tajo

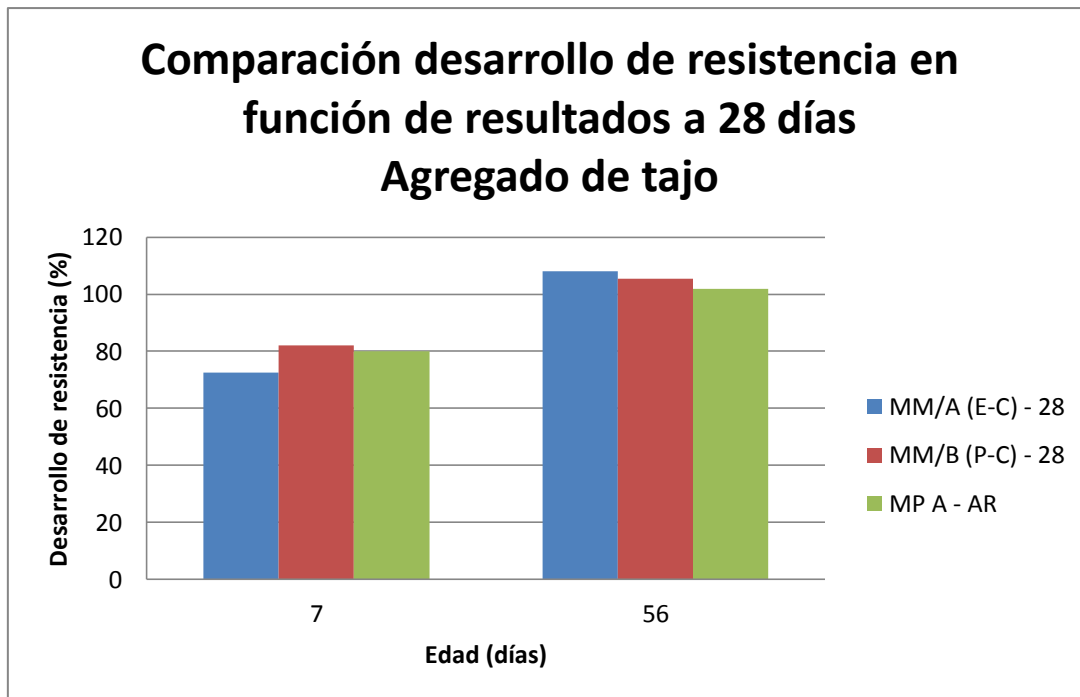
A partir de los resultados mostrados previamente en las **secciones 3.3.1, 3.3.2 y 3.3.3** para las mezclas de concreto utilizando agregado de tajo se elaboran los gráficos mostrados en la **Figura 3.23** y la **Figura 3.24**. Se indicará que debido al traslado de la falla de los especímenes elaborados con cemento MM/B (P-C) – 28 de 3 días a 14 días, los resultados a continuación se muestran para las edades de 7 días, 28 días y 56 días para comparar todas las mezclas elaboradas en las mismas edades de falla.





**Figura 3.23** Comportamiento del desarrollo de resistencia para concreto con agregado de tajo

Según los resultados mostrados en la **Figura 3.23** se aprecia que a las edades de 7 días y 28 días la mayor resistencia la presenta la mezcla de concreto elaborada con el cemento MP A – AR, coincidiendo con los resultados mostrados para las mezclas de concreto con agregado de río, donde para la edad de 56 días se observa que la mezcla de concreto elaborada con el cemento MM/A (E-C) – 28 presenta una resistencia mayor a la resistencia de la mezcla de concreto elaborada con el cemento MP A – AR. Al igual que en el caso de las mezclas de concreto elaborados con agregado de río, se denota que para todas las edades la menor resistencia la dio el concreto elaborado con el cemento MM/B (P-C) – 28.



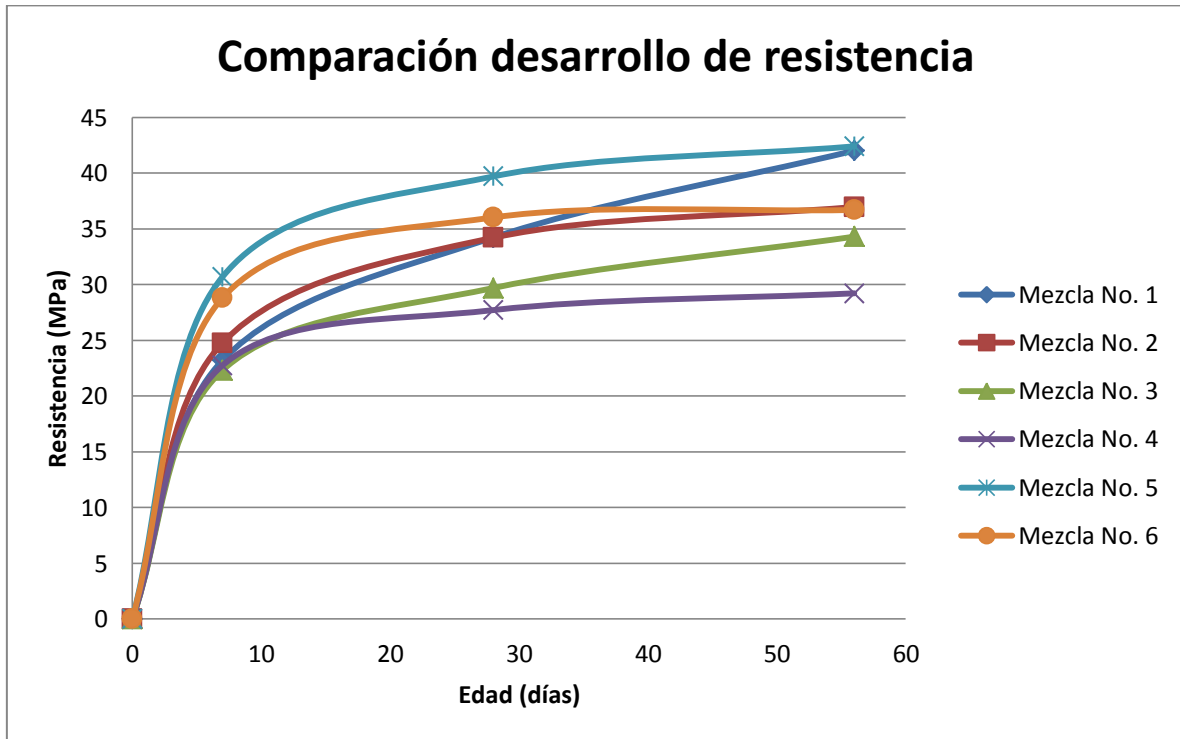
**Figura 3.24** Desarrollo de la resistencia con respecto a los resultados a 28 días para concreto con agregado de tajo

A partir de los resultados mostrados en la **Figura 3.24** se observa un comportamiento muy similar al señalado en las mezclas de concreto elaboradas con el agregado de río, ya que la mezcla de concreto elaborada con el cemento MM/A (E-C) – 28 presenta el menor desarrollo de resistencia a los 7 días y el mayor desarrollo de resistencia a los 56 días, en tanto que la mezcla de concreto elaborada con el cemento MP A – AR presenta el menor desarrollo de resistencia a los 56 días. Finalmente se tiene que el mayor desarrollo de resistencia a los 7 días se da por parte de la mezcla de concreto elaborada con el cemento MM/B (P-C) – 28, siendo esta la única diferencia con los resultados mostrados en la **Figura 3.22** para las mezclas de concreto elaborados con el agregado de río.

#### Comparación entre todas las mezclas de concreto elaboradas

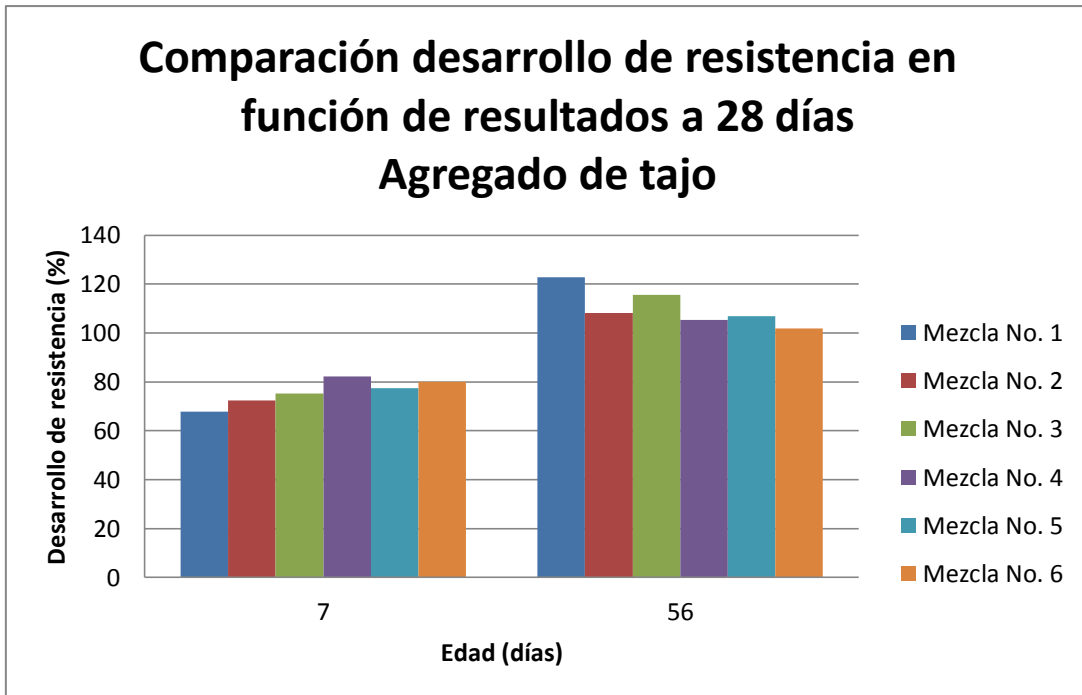
A partir de los resultados mostrados previamente en las **secciones 3.3.1, 3.3.2 y 3.3.3** para las mezclas de concreto elaboradas se construyen los gráficos mostrados en la **Figura 3.25** y la **Figura 3.26**. Se indicará que debido al traslado de la falla de los especímenes elaborados con cemento MM/B (P-C) – 28 de 3 días a 14 días, los resultados a continuación se muestran para las edades de 7 días, 28 días y 56 días para comparar todas las mezclas elaboradas en

las mismas edades de falla. La identificación de cada una de las mezclas a las que se hace referencia en las figuras se presenta en el Cuadro 3.17.



**Figura 3.25** Comportamiento del desarrollo de resistencia para mezclas de concreto elaboradas

Según los resultados mostrados en la Figura 3.25 se aprecia que a las edades de 7 y 28 días la mayor resistencia la presentan las mezclas de concreto elaboradas con el cemento MP A – AR (Mezclas No.5 y No.6), coincidiendo con los resultados mostrados previamente para las mezclas de concretos con agregado de río y tajo, donde para la edad de 56 días la mayor resistencia se presenta entre las mezclas de concreto elaboradas con los cementos MP A – AR y MM/A (E-C) – 28 con agregado de río (Mezclas No.5 y No.1). Tal como se destacó anteriormente, se denota que para todas las edades la menor resistencia se presenta en las mezclas de concreto elaboradas con el cemento MM/B (P-C) – 28 (Mezclas No.3 y No.4).



**Figura 3.26** Desarrollo de la resistencia con respecto a los resultados a 28 días para mezclas de concreto elaboradas

Finalmente de los resultados mostrados en la **Figura 3.26** se aprecia que en términos generales el mayor desarrollo de resistencia a los 56 días respecto a la resistencia a los 28 días se da en las mezclas de concreto elaboradas con agregado de río (Mezclas No. 1, No. 3 y No. 5), donde el mayor desarrollo de resistencia lo presenta la mezcla de concreto con cemento MM/A (E-C) – 28 y agregado de río (Mezcla No. 1). Para la edad de 7 días se no se determina un comportamiento claro en el desarrollo de resistencia, mas se logra apreciar que el mayor desarrollo de resistencia se da en la mezcla de concreto con cemento MM/B (P-C) – 28 y agregado de tajo (Mezcla No. 4), y el menor desarrollo de resistencia en la mezcla de concreto con cemento MM/A (E-C) – 28 y agregado de río (Mezcla No. 1), coincidiendo con los resultados anteriormente señalados para las mezclas de concreto con agregado de río y agregado de tajo.

### **3.4 Análisis de resultados**

#### **Caracterización de materiales constituyentes**

De los resultados obtenidos para la caracterización de los agregados, se apreció que tanto para el agregado fino de río como el de tajo se cumplieron con las especificaciones indicadas en la norma ASTM C33 para el módulo de finura, el máximo de porcentaje de material pasando la malla No. 200 y la prueba de colorimetría (no contenían una cantidad perjudicial de material orgánico). Asimismo se obtuvo que el agregado de río no requería de ninguna corrección para cumplir con las especificaciones granulométricas.

Aunque se observó que en primera instancia el agregado fino de tajo requería una corrección para cumplir con las especificaciones granulométricas indicadas en la norma ASTM C33, el corregir el agregado eliminando todo el material retenido en la malla No. 8 permitió que el mismo cumpliera con los límites establecidos en la norma indicada.

Respecto al agregado grueso, tanto para el agregado de río como el de tajo se demostró que estos cumplían con las especificaciones de máximo porcentaje de desgaste y el máximo de porcentaje de material pasando la malla No. 200. También se demostró que el agregado grueso, aunque este correspondió a piedra con un tamaño máximo nominal de 16 mm y por lo tanto no entra dentro de las especificaciones indicadas en la norma ASTM C33, cumple con las especificaciones denotadas para otros tamaños máximos nominales indicados en la norma, donde para el agregado grueso de río se cumplieron con los límites establecidos para un tamaño nominal de 19 mm a 4.75 mm, y el agregado grueso de tajo cumplió con los límites establecidos en la norma para un tamaño nominal de 12.5 mm a 4.75 mm.

En lo que respecta al cumplimiento de lo señalado en la norma ASTM C33 para el uso de agregados en mezclas de concreto, al haber cumplido cada uno de estos con las especificaciones señaladas en la norma, se comprueba que para las mezclas de concreto elaboradas se utilizaron agregados de buena calidad. A lo anterior se debe incluir el hecho que el agregado fino de tajo tuvo que ser corregido.

A partir del módulo de finura se define que el agregado de tajo se clasifica como una arena fina, lo cual coincide con el hecho que el agregado tuvo que ser corregido eliminando todo el

material retenido en la malla No. 8 para cumplir con las especificaciones en la norma ASTM C33, en tanto que el agregado de río clasifica como un arena medio gruesa. El agregado fino presento una humedad del 1.71 % (río) y 2.13 % (tajo), cumpliendo con los valores establecidos en la teoría; en tanto que el porcentaje de absorción varió entre el 4 % (río) y el 2.1 % (tajo), siendo estos valores ligeramente mayores a los indicados en la teoría al discutir esta característica del agregado.

Para el agregado grueso de ambas fuentes se observó que la mayor parte de su composición correspondió a partículas con al menos una cara fracturada, por lo que se concluye que posiblemente los resultados de resistencia obtenidos con las mezclas de concreto elaboradas sean mayores a los posibles resultados que se hubieran obtenido al utilizar un agregado redondeado o liso. Asimismo se comprobó que los agregados utilizados cumplieron con el límite máximo de 15 % de masa total de partículas planas o lisas. En relación a la absorción en el agregado grueso, para los agregados de ambas fuentes se observó que los valores obtenidos fueron de 1.4 % (río) y 1.8 % (tajo), así como que sus porcentajes de humedad fueron de 1.40 % (río) y 1.12 % (tajo), cumpliendo estos valores mencionados con los rangos indicados para estas variables en la nota teórica.

La densidad masiva de todos los agregados se mantuvo en el rango de 1120 kg/m<sup>3</sup> y 1900 kg/m<sup>3</sup>, por lo que se concluye que se utilizó agregados con un peso normal. Para el agregado fino se apreció que los agregados de ambas fuentes presentaron un porcentaje de vacíos cercano al 40 %, en tanto que el agregado grueso presentó un porcentaje de vacíos cercano al 45 %, cumpliendo con lo mencionado en la teoría. Para todos los agregados utilizados la densidad relativa varió entre 2.4 y 2.9, que son valores teóricos recomendados para producir concretos de peso normal.

A partir de los resultados obtenidos para los agregados se concluye que las mezclas de concreto elaboradas con los agregados utilizados cumplen con los estándares establecidos tanto en la norma ASTM C33 como en la teoría, por lo que poseían las características necesarias para elaborar concretos de buena calidad.

En relación al cemento utilizado, de los resultados obtenidos se observa que para los tres cementos en estudio se cumplen con los valores de resistencia a la compresión en cubos de mortero establecidos por tipo de cemento, así como el tiempo de fragua inicial y final requeridos según la norma INTE C47. Con esto último, debido a que el tiempo de fraguado del cemento está estrechamente relacionado con el tiempo de fraguado del concreto, se infiere que los concretos elaborados con estos cementos garantizan que el tiempo para colocar y moldear las mezclas de concreto es suficiente. A partir de lo anterior se concluye que los cementos utilizados para la elaboración de las mezclas de concreto cumplen con los parámetros establecidos para ser utilizados en Costa Rica.

Asimismo se observa que para los cementos tipo MM/A (E-C) – 28, MM/B (P-C) – 28 y MP A – AR el agua requerida para obtener una consistencia normal oscila entre el 22 % y el 30 %; para la finura aproximadamente un 95 % del material en los tres cementos es de un tamaño inferior a los 45 micrómetros y sus valores de pH en suspensión se encuentran en el rango entre 12.11 y 12.62, cumpliendo con los valores indicados en la teoría para estas variables en estudio. Se aprecia que para los tres cementos la densidad presenta valores en el rango de 2.90 g/cm<sup>3</sup> a 3.15 g/cm<sup>3</sup>, por lo que se infiere que cumplen con lo indicado en la teoría para esta característica.

Para los cementos tipo MM/A (E-C) – 28 y MP A – AR, se aprecia que la mayor densidad, mayor finura y los tiempo de fragua más retardados se obtienen para estos cementos, lo cual concuerda con su menor requerimiento de agua para obtener una consistencia normal y la mayor resistencia a la compresión que presentan en los cubos de mortero elaborados. Se infiere que estas características se relacionan con los materiales suplementarios utilizados para la elaboración de los cementos, ya que según lo visto en la nota teórica, la incorporación de escoria de alto horno, caliza o puzolana repercuten en las características de finura, densidad, requerimiento de agua, resistencia y tiempo de fraguado de la misma manera que los resultados obtenidos para los cementos tipo MM/A (E-C) – 28 y MP A – AR.

Finalmente para todas las mezclas elaboradas se obtuvo que el agua utilizada presentó un pH entre los valores de 6.5 a 8.5, por lo que se infiere que se trató de agua potable y resultó ser adecuada para la elaboración de las mezclas de concreto.

## **Análisis estadístico**

Al realizar la prueba de normalidad al grupo de datos generados sobre el desarrollo de resistencia para las diferentes mezclas de concreto elaboradas se demostró que los resultados obtenidos se comportan de manera semejante a una distribución normal. Debido a que las pruebas paramétricas así como el análisis según la norma ACI 214R-02 requieren que los datos sigan el comportamiento de una distribución normal, el comprobar que los datos generados en efecto siguen este comportamiento resulto adecuado para validar los resultados obtenidos con las pruebas realizadas en el análisis estadístico.

Comparándose los resultados obtenidos para la desviación estándar de la resistencia a la compresión a los 28 días en las mezclas de concreto elaboradas con los valores establecidos en la norma ACI 214R-02 se logró denotar que el grado de control entre las mezclas vario de bueno a excelente. Con esto se logra comprobar que los resultados generados con los concretos elaborados no presentan una variación significativa, y por lo tanto se infiere que el grado de control en la fabricación de los especímenes de concreto obtenido según la norma responde como un parámetro de validación de las curvas de desarrollo estándar que se generaron con el proyecto.

A partir de los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANOVA) para cada edad del concreto se comprobó la existencia de diferencias significativas entre los promedios de resistencia de las mezclas de concreto elaboradas, en tanto que los resultados en relación con el desarrollo de resistencia según los resultados a los 28 días demostró de igual manera que existen diferencias significativas en el promedio de resistencia ganada para cada edad de falla; con excepción de los resultados a los 14 días, para lo cual se comprueba que las mezclas elaboradas con cemento MM/B (P-C) – 28 no presentan una diferencia significativa de la resistencia ganada a la edad indicada. Con los resultados del análisis de varianza se desecha la hipótesis planteada con el trabajo, ya que se demostró que el desarrollo de la resistencia compresiva para las diferentes edades de curado difiere significativamente entre las combinaciones de cemento y agregados que se utilizaron para las mezclas de concretos fabricadas a un 95 % de confiabilidad.



Finalmente se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey con la se identificaron aquellos pares de los promedios de resistencia a la compresión y resistencia ganada en función de los resultados a los 28 días que no presentaban una diferencia significativa según la edad del concreto. En términos generales se demostró que aquellas mezclas de concreto elaboradas con el mismo tipo de cemento no presentan una diferencia significativa en sus promedios de resistencia, esto sin importar el tipo de agregado utilizado; aunque también se presentaron casos aislados en los cuales mezclas de concreto elaborados con un cemento y agregado específico presentaron un promedio de resistencia a la compresión semejante a la de otras mezclas de concreto elaboradas con otro tipo de cemento y agregado. En relación a los agregados no se observó un comportamiento claro si estos presentan una diferencia significativa en los promedios de resistencia ganada, ya que para ciertos casos se demuestra que el uso de cualquier agregado sin importar el cemento no genera diferencias significativas en el desarrollo de resistencia, mientras que en otros sí. Respecto a la resistencia ganada en función de los resultados a los 28 días tampoco se logró identificar un comportamiento entre los resultados generados, por lo que se concluye que el desarrollo de resistencia según la resistencia esperada a los 28 días depende de los materiales constituyentes, sin predominar uno sobre otro. Asimismo se infiere que el componente más determinante en el desarrollo de resistencia del concreto es el cemento utilizado, aspecto que coincide con lo explicado en la teoría.

Como punto adicional se obtuvieron los intervalos de confianza de la resistencia a la compresión para cada mezcla de concreto según la edad del concreto. Ya que los intervalos de confianza se obtuvieron a partir de un nivel de significancia, el tamaño de muestra, el promedio y la desviación estándar de la resistencia a la compresión para cada edad de falla, se demuestra que la resistencia de las mezclas de concreto elaboradas a un 95 % de confiabilidad se encuentra entre los valores límites obtenidos con los intervalos de confianza.

Asimismo, del modelo de regresión aplicado, se concluye que las ecuaciones que mejor se ajustan al comportamiento de desarrollo de resistencia en las mezclas de concreto son logarítmicas, y que el aplicar una proyección para obtener la resistencia a la compresión en mezclas de concreto para edades avanzadas con este tipo de ecuaciones resulta apropiado para obtener una predicción conservadora de la resistencia. Esto último debido a las leves

diferencias observadas de los resultados obtenidos de resistencia a la compresión en las mezclas de concreto elaboradas con los resultados obtenidos al aplicar las ecuaciones determinadas con el modelo de regresión simple.

### **Características mezclas de concreto elaboradas**

En relación al contenido de aire presente en cada una de las mezclas de concreto elaboradas, se observa que este no fue superado en más del 2 %, por lo que se debe considerar que los resultados de resistencia en los concretos posiblemente pudieron verse reducidos en un 10 % de la resistencia del concreto, esto según lo visto en la nota teórica.

Respecto a la consistencia de las mezclas, se aprecia que para cada una de estas se respetó que el revenimiento se encontrase en el rango de  $120 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ , así como que la relación agua – cemento se mantuvo igual a 0.58 en casi todas las mezclas de concreto, con excepción de la mezcla constituida por cemento MM/B (P-C) – 28 y agregado de río, para la cual se utilizó una relación agua – cemento de 0.57. Asimismo se debe considerar que todos los cilindros fueron curados bajo las mismas condiciones en cámara húmeda, y al fallar estos eran humedecidos hasta ser ensayados. Al mantenerse estas condiciones de manera constante entre cada mezcla elaborada, así como que las proporciones fueron constantes según el diseño de mezcla para cada tipo de agregado y la temperatura del concreto fresco fue superior a los  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  para todas las mezclas, se infiere que respecto a la fabricación de los especímenes de concreto las variaciones debido a las condiciones y características mencionadas fueron mínimas, aspecto que se comprueba con los resultados obtenidos del análisis estadístico generado para los resultados de resistencia a los 28 días con la norma ACI 214R-02, por lo que en términos generales se tuvo un control bueno en la elaboración de las mezclas de concreto.

Como resultado global, se mantuvo que las mezclas de concreto elaboradas con el cemento MM/A (E-C) – 28, debido a su menor requerimiento de agua para obtener una consistencia normal, fueron las que ofrecieron la mejor trabajabilidad, permitiendo ser moldeadas y acabadas con mayor facilidad.

De los resultados obtenidos de la densidad del concreto, para todas las mezclas elaboradas se aprecia que la medida de densidad del concreto fresco no presento una diferencia notable con la densidad del concreto endurecido, manteniéndose valores en el rango  $2200 \text{ kg/m}^3$  y  $2400 \text{ kg/m}^3$ , por lo cual se infiere que se fabricaron concretos de peso normal. También se destaca que para los concretos fabricados con agregado de río se obtuvieron valores de densidad ligeramente mayores que utilizando agregado de tajo, a lo cual se atribuye que el agregado grueso de río fue el que presento el mayor valor de gravedad específica.

Por último, en lo que respecta a la resistencia a la abrasión en los concretos, se observa que para todas las mezclas, aquellas que fueron fabricadas con agregado de tajo fueron las que presentaron el menor desgaste, en tanto que las mezclas elaboradas con el cemento MM/B (P-C) – 28 fueron las que presentaron la mayor pérdida de material debido a la abrasión, siendo la combinación de cemento MM/B (P-C) – 28 y agregado de río la que menor resistencia a la abrasión presento. Como se señaló en la nota teórica, la resistencia a la abrasión del concreto se ve principalmente determinada por la resistencia a la compresión del concreto que por cualquier otro factor, lo cual coincide con los resultados obtenidos, ya que el agregado que presento la mayor resistencia a la abrasión fue el agregado de río, contrario al comportamiento que se observó en el concreto, en tanto que el cemento que menos resistencia a la compresión presento fue el tipo MM/B (P-C) – 28, siendo este cemento parte de la matriz de las mezclas de concreto que presentaron la menor resistencia tanto a la compresión como a la abrasión.

### **Desarrollo de resistencia y comparación entre concretos elaborados**

Como se expuso en la nota teórica, la resistencia a la compresión del concreto es función de la relación agua – cemento, del proceso de hidratación en el cemento, del curado, de las condiciones ambientales y de la edad del concreto. Al haberse mantenido la mayoría de estas condiciones constantes al elaborarse y curarse los especímenes de concreto, se determina que las principales diferencias observadas en las resistencia a la compresión de los concretos fabricados reside en los materiales constituyentes de cada mezcla elaborada, especialmente en el cemento utilizado.

Anteriormente se había destacado que de la resistencia del concreto esperada a los 28 días, normalmente se estima que la resistencia a los 7 días representa un 75 % de la resistencia a los 28 días, y que la resistencia a los 56 días es aproximadamente mayor en un 10 % que la resistencia a los 28 días. De lo anterior se observa que, para el concreto fabricado con cemento MM/A (E-C) – 28, las mezclas de concreto alcanzaron un 68 % (con agregado de río) y 72 % (con agregado de tajo) de la resistencia esperada a los 28 días a la edad de 7 días; en tanto que la resistencia a los 56 días fue un 22 % (con agregado de río) y 8 % (con agregado de tajo) mayor que la resistencia obtenida a los 28 días para cada mezcla. Aunque los valores obtenidos para las mezclas de concreto con el cemento MM/A (E-C) – 28 se aproximan a los valores destacados en la teoría, se observa que existe un desarrollo mayor al esperado a los 56 días que el señalado en la teoría, así como un desarrollo menor a los 7 días, se atribuye que el aumento de resistencia significativo entre las edades de 28 días y 56 días se debe a la presencia de escoria granulada de alto horno en este tipo de cemento, ya que este material retarda el tiempo de fraguado en la mezcla, por lo que se generan menos fisuras y se fabrican concretos más densos que mejoran la resistencia. Como nota adicional a este tipo de cemento, si bien este se comercializa en el país como un cemento que alcanza una resistencia mínima de 28 MPa a los 28 días en el mortero, de los resultados obtenidos se aprecia que esta resistencia es superada significativamente, alcanzando resistencias de hasta 34 MPa a los 28 días (resultados obtenidos utilizando agregado de tajo y río).

Respecto al cemento MM/B (P-C) – 28, para la edad de 7 días la resistencia obtenida en los especímenes de concreto represento un 75 % (con agregado de río) y un 82 % (con agregado de tajo) de la resistencia obtenida a los 28 días, y para la edad de 56 días la resistencia obtenida fue un 15 % (con agregado de río) y un 5 % (con agregado de tajo) mayor que la obtenida a los 28 días. Se aprecia que los valores más cercanos a los señalados en la teoría son los de la mezcla de concreto conteniendo cemento MM/B (P-C) – 28 y agregado de río, en tanto que la mezcla con agregado de tajo desarrollo mayor resistencia a los 7 días y una menor a los 56 días de los valores obtenidos con el agregado de río e indicados en la teoría. Este tipo de cemento en el país se comercializa en Costa Rica como un cemento de uso general que desarrolla una resistencia de 28 MPa a los 28 días, si bien se trata de un cemento modificado con presencia de puzolanas y caliza, estos no repercuten de manera severa en la resistencia del concreto si no se tratan de adiciones importantes de

material, por lo que los resultados obtenidos se atribuyen a que se trata de un material de uso general, que en efecto se comporta de la misma manera que la indicada en la nota teórica. Se señalará que este tipo de cemento en mezclas de concreto ciertamente alcanza la resistencia de 28 MPa a los 28 días en el concreto elaborado, tal como se aprecia de los resultados obtenidos.

Se indicará que para los cementos MM/A (E-C) – 28 y MM/B (P-C) – 28, todos los valores de resistencia promedio superaron la resistencia mínima indicada para cada edad especificada en la norma INTE C147, considerando que estos se tratan de cementos de clase de resistencia 28 según la norma señalada, y que los valores destacados se expresan para morteros y no mezclas de concreto.

Para el cemento MP A – AR se obtiene el mayor desarrollo de resistencia a los 7 días, y el más pobre a los 56 días, ya que a la edad de 7 días la resistencia obtenida en los especímenes de concreto represento un 77 % (con agregado de río) y un 80 % (con agregado de tajo) de la resistencia obtenida a los 28 días, donde a la edad de 56 días solo un 6 % (con agregado de río) y un 2 % (con agregado de tajo) de la resistencia obtenida resulto ser mayor a la resistencia obtenida a los 28 días. De lo anterior se aprecia que este se trata de un cemento que desarrolla la mayor parte de su resistencia a edades tempranas, lo cual coincide con el hecho que este tipo de cemento se comercializa en el país como un cemento de alta resistencia inicial, asimismo se señalará que si bien el desarrollo de resistencia a los 56 días no difiere demasiado de la resistencia a los 28 días, este tipo de cemento llega a alcanzar resistencias de hasta 40 MPa (con agregado de río) y 36 MPa (con agregado de tajo) a los 28 días, lo cual es considerablemente mayor a la resistencia con la que se comercializan la mayoría de cementos en el país, por lo que este leve incremento en la resistencia a los 56 días no representa que el cemento no haya alcanzado una resistencia significativamente alta. El efecto observado en la resistencia de estos concretos se debe al aumento en la cantidad de puzolanas con las cuales se fabrica el cemento, provocando un efecto similar al de la presencia de escoria granulada de alto horno, retardando el fraguado del concreto y originando concretos más densos. Como parte del etiquetado con el cual se comercializa este tipo de cemento en el país, se indica que la resistencia mínima a los 3 días debe ser superior a los 24 MPa, tal como se señala en la norma INTE C147, aspecto que no

se cumplió en ninguna de las mezclas de concreto elaboradas con el cemento MP A – AR (debe considerarse que esta resistencia es para morteros y no mezclas de mortero).

Al generar las curvas de desarrollo de resistencia de cada una de las mezclas de concreto fabricadas se evidenció que estas siguieron el comportamiento esperado, donde a edades tempranas se dio un incremento constante de la resistencia y a edades avanzadas, aunque se siguió observando un aumento, se fueron estabilizando. Comportamiento que también coincidió con los resultados de resistencia obtenidos para los morteros elaborados. Se señalará que los modos de falla más comunes en los cilindros ensayados se generaron principalmente porque el acabado de las superficies de los cilindros no resulto ser el adecuado (superficie tipo convexa, fallas tipo 2 y 3 según norma ASTM C39).

De la comparación de resultados entre las mezclas de concreto elaboradas con los agregados utilizados y el mortero fabricado, normalmente se obtuvo que la combinación de cualquiera de los cementos en estudio con agregado de río es la que genera los concretos con mayor resistencia, donde la resistencia del mortero con los cementos en estudio resulto ser menor que la resistencia de los concretos ya sean fabricados con agregados de río o tajo (a excepción del cemento MP A – AR, donde el mortero presento mayores resistencia que el concreto con agregado de tajo). Debido a que en las mezclas de concreto fabricadas con agregado de río fueron con las que se obtuvieron las mayores resistencias, se infiere que el aporte de este agregado en la resistencia se origina debido a que se trata de un agregado que sin ningún tipo de modificación cumple con los límites establecidos en la norma ASTM C33, por lo que se trata de un agregado que en su proceso de producción y manutención lleva un control más estricto para que presente las características apropiadas para ser utilizado en mezclas de concreto.

Respecto al desarrollo de resistencia según los resultados obtenidos a los 28 días, no se observó un comportamiento claro, ya que en el cemento MM/A (E-C) – 28 el mayor desarrollo de resistencia se dio en el mortero para todas las edades de curado, en el cemento MM/B (P-C) – 28 predominó que el mayor desarrollo de resistencia se dio en las mezclas de concreto con agregado de río, y en el cemento MP A – AR los resultados no mostraron en que caso el cemento presenta su mayor desarrollo de resistencia. Debido a esto no se define en que

condición de manera generalizada se da el mayor y el menor desarrollo de resistencia según los resultados a los 28 días para los cementos en estudio, y cada uno de estos deben ser analizados de manera individual para observar la condición predominante. Aun con lo anterior, dejando de lado los resultados obtenidos con el mortero y comparando únicamente el comportamiento según el tipo de agregado, para las mezclas de concreto elaboradas se observa que a edades tempranas el agregado de tajo es el que genera los mayores porcentajes de desarrollo de resistencia en el concreto sin distinguir entre los cementos en estudio, en tanto que el agregado de río genera los mayores porcentajes de desarrollo de resistencia para edades avanzadas.

Al analizar los resultados según el tipo de agregado utilizado, se obtuvo que sin importar el tipo de agregado el cemento MP A – AR es el que genera las mayores resistencias a la compresión en el concreto, aunque a una edad de 56 días el cemento MM/A (E-C) – 28 puede llegar a alcanzar resistencias similares a las del cemento MP A – AR, en tanto que el cemento MM/B (P-C) – 28 es el que genera los concretos con menor resistencia. Al observar la composición de cada uno de los cementos, y el uso con el cual se comercializan cada uno de estos cementos en el país, resulta claro que los resultados obtenidos siguieran el comportamiento observado, aunque cabe destacar que si bien el cemento MM/A (E-C) – 28 se trata de un cemento de uso general, este puede llegar a alcanzar resistencias tan altas como las de un cemento de alta resistencia tal como lo es el cemento MP A – AR. Las mezclas de concreto elaboradas con el cemento MM/B (P-C) resultaron ser las de menor resistencia sin importar el tipo de agregado, coincidiendo con el hecho, que a diferencia de los otros cementos en estudio, este se trata de un cemento que presenta adiciones de puzolana y caliza no en niveles lo suficientemente significativos.

Respecto al desarrollo de resistencia según los resultados a 28 días, se muestra que a edades tempranas el mayor desarrollo de resistencia generalmente se da en las mezclas de concreto fabricadas con el cemento MP A – AR (donde la combinación de cemento MM/B (P-C)- 28 y agregado de tajo también logra alcanzar un desarrollo de resistencia importante a los 7 días), lo cual coincide con que este se trata de un cemento de alta resistencia inicial, y para la edad de 56 días las mezclas de concreto conteniendo el cemento MM/A (E-C) – 28 resultan ser las que presentan el mayor desarrollo de resistencia. Contradictoriamente, a la edad de 7 días

las mezclas de concreto con cemento MM/A (E-C) – 28 son las que presentan el menor desarrollo de resistencia, y a la edad de 56 días las mezclas de concreto fabricadas con el cemento MP A – AR son las que general el menor incremento de resistencia con respecto a la resistencia obtenida a los 28 días.

Finalmente al comparar todos las curvas de desarrollo de resistencia generadas, se aprecia que el concreto fabricado con cemento MP A – AR y agregado de río resulto ser la mezcla de concreto con mayor resistencia a la compresión a todas las edades de falla, en tanto que la combinación de cemento MM/B (P-C) – 28 con agregado de tajo resulto ser la mezcla de concreto con menor resistencia a todas las edades de falla, coincidiendo estos resultados con los resultados previamente destacados. Asimismo se observa que para cualquier tipo de cemento, el agregado de río fue el que generó las mayores resistencias en el concreto (dejando de lado el comportamiento observado en el mortero).

Asimismo, en concordancia con los resultados anteriormente expuestos, las mezcla de concreto con agregado de río y cemento MM/A (E-C) – 28 corresponde al concreto con el menor desarrollo de resistencia a los 7 días según los resultados a los 28 días, y el mayor desarrollo de resistencia a los 56 días (alcanzando una resistencia de 42 MPa, valor semejante a la resistencia del concreto con cemento MP A – AR y agregado de río a la misma edad), en tanto que el mayor desarrollo de resistencia a los 7 días según los resultados a los 28 días se da en la mezcla de concreto de cemento MM/B (P-C) – 28 con agregado de tajo (siendo inclusive mayor que el desarrollo de resistencia en los concretos con cemento MP A – AR a la misma edad), y el menor desarrollo de resistencia a los 56 días se da en la mezcla de concreto fabricada con el cemento MP A – AR y agregado de tajo.



## Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

- Inicialmente el agregado fino de tajo no contaba con una adecuada graduación, por lo que por medio de una corrección (eliminando el material retenido en la malla No. 8) a todo el material utilizado, se cumplió con los límites estandarizados en la norma ASTM C33. El agregado fino de río no requirió de una corrección para cumplir con los límites granulométricos establecidos.
- El agregado grueso de río que se comercializa en el país con un tamaño máximo nominal de 16 mm, sin ninguna corrección del material, cumple con los límites especificados de granulometría en la norma ASTM C33 para un tamaño máximo nominal de 19 mm a 4.75 mm .
- El agregado grueso de tajo que se comercializa en el país con un tamaño máximo nominal de 16 mm, sin ninguna corrección del material, cumple con los límites especificados de granulometría en la norma ASTM C33 para un tamaño máximo nominal de 12.5 mm a 4.75 mm .
- Se comprobó que los agregados gruesos utilizados están constituidos mayoritariamente por partículas fracturadas.
- Los cementos tipo MM/A (E-C) – 28, MM/B (P-C) – 28 y MP A – AR cumplen con los parámetros de resistencia mínima a la compresión y tiempo de fraguado establecidos en la norma nacional INTE C147.
- La incorporación de escoria granulada de alto horno, caliza y puzolana en los cementos MM/A (E-C) – 28 y MP A – AR, generan que estos tipos de cementos presenten valores mayores de densidad, finura, resistencia a la compresión, así como un menor requerimiento de agua para obtener una consistencia normal y provoca un retardo considerable en los tiempos de fragua.
- De la prueba de normalidad en los datos generados de resistencia para cada mezcla de concreto se verifica que estos siguen el comportamiento de una distribución normal para cada edad del concreto, validando los resultados obtenidos con las pruebas realizadas en el análisis estadístico.
- Se demuestra que el grado de control al elaborar las mezclas de concreto; y fallar los especímenes fue de bueno a excelente, esto según las tablas publicadas en el ACI

214R-02. Se toma lo anterior como un parámetro de verificación de las curvas de desarrollo estándar generadas con el proyecto.

- El desarrollo de la resistencia compresiva para las diferentes edades de curado difiere significativamente entre las combinaciones de cemento y agregados que se utilizaron para las mezclas de concretos fabricadas a un 95 % de confiabilidad.
- Generalmente aquellas mezclas de concreto elaboradas con el mismo tipo de cemento no presentan una diferencia significativa en sus promedios de resistencia a la compresión, esto sin importar el tipo de agregado utilizado; por lo que el componente más determinante en el desarrollo de resistencia del concreto es el cemento utilizado.
- Las ecuaciones que mejor se ajustan al comportamiento de desarrollo de resistencia en las mezclas de concreto son logarítmicas, y el aplicar una proyección para obtener la resistencia a la compresión en mezclas de concreto para edades avanzadas con este tipo de ecuaciones resulta apropiado para obtener una predicción conservadora de la resistencia del concreto.
- Para obtener concretos semejantes a los fabricados en el proyecto, de peso normal, se deben respetar las disposiciones de diseño señaladas en la ACI 211.1-91, con una resistencia especificada en planos de 24 MPa, curado en cámara húmeda, agua potable ( $6.5 < \text{pH} < 8.5$ ) y una consistencia constante bajo un revenimiento de  $120 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ .
- Las mezclas de concreto fabricadas con el cemento MM/A (E-C) – 28, debido a su menor requerimiento de agua para obtener una consistencia normal, fueron las que ofrecieron la mejor trabajabilidad, permitiendo ser moldeadas y acabadas con mayor facilidad. De los concretos fabricados, aquellos que contenían el cemento tipo MM/B (P-C) – 28 como parte de su matriz fueron los que menor resistencia a la abrasión presentaron.
- El comportamiento de las curvas de desarrollo de resistencia a la compresión en los concretos fabricados fue el esperado, presentando un aumento considerable en edades tempranas, y comenzando a estabilizarse a edades avanzadas.
- Al haberse mantenido constante las condiciones y características con las cuales se elaboraron las mezclas de concreto y fallaron los especímenes cilíndricos, las variaciones en la resistencia a la compresión de los concretos fabricados se deben a

los materiales constituyentes de cada mezcla elaborada, especialmente al cemento utilizado.

- Los concretos fabricados con cemento MM/A (E-C) – 28 y MM/B (P-C) – 28 cumplen con los valores de resistencia mínima indicada para cada edad especificada en la norma INTE C147 *Construcción. Cemento Hidráulico. Especificaciones y Requisitos*, considerando que estos se trata de cementos de clase de resistencia 28 según la norma señalada y los valores destacados se expresan para morteros y no mezclas de concreto. Las mezclas de concreto fabricadas con cemento MP A – AR no fueron capaces de superar los valores de resistencia indicados en la norma INTE C147 para este tipo de cemento.
- Aun cuando se pulieron los cilindros y se fallaron empleando almohadillas de neopreno, revisándose la planicidad de cada espécimen y su regularidad, la falla predominante en los cilindros de concreto se dio por deficiencias en el coronamiento y la aplicación de la carga en una superficie tipo convexa.
- Las mayores resistencias a la compresión en el concreto, sin distinguir entre el cemento utilizado, se generan al fabricar concreto con agregado de río.
- A edades tempranas el agregado de tajo es el que genera los mayores porcentajes de desarrollo de resistencia en el concreto sin distinguir entre los cementos en estudio, en tanto que el agregado de río genera los mayores porcentajes de desarrollo de resistencia para edades avanzadas.
- El cemento MP A – AR es el que genera las mayores resistencias a la compresión en el concreto, aunque a una edad de 56 días el cemento MM/A (E-C) – 28 puede llegar a alcanzar resistencias similares a las del cemento MP A – AR. El cemento MM/B (P-C) – 28 es el que genera los concretos con menor resistencia.
- A edades tempranas el mayor desarrollo de resistencia se da en las mezclas de concreto fabricadas con el cemento MP A – AR, y para la edad de 56 días las mezclas de concreto conteniendo cemento MM/A (E-C) – 28 resultan ser las que presentan el mayor desarrollo de resistencia. En contraposición, a la edad de 7 días las mezclas de concreto con cemento MM/A (E-C) – 28 son las que presentan el menor desarrollo de resistencia, y a la edad de 56 días las mezclas de concreto fabricadas con el cemento MP A – AR son las que general el menor incremento de resistencia con respecto a la resistencia obtenida a los 28 días.

- Las mezclas de concreto fabricadas con cemento MM/A (E-C) – 28 pueden llegar a alcanzar resistencias considerablemente altas a las edades de 28 días y 56 días, donde para las mezclas elaboradas con este tipo de cemento se alcanzó una resistencia a la compresión de 34 MPa a los 28 días y hasta 42 MPa a los 56 días.
- El estudio realizado con el presente trabajo permite brindarles a los diseñadores y constructores de Costa Rica curvas de desarrollo de resistencia para concretos elaborados con los cementos MM/A (E-C) – 28, MM/B (P-C) – 28 y MP A – AR y agregados comercializados en el país.

## **4.2 Recomendaciones**

- Determinar curvas de desarrollo de la resistencia a la compresión para los cementos en estudio en condiciones de campo, siguiendo el procedimiento señalado en la norma ASTM C31, ya que las curvas determinadas con el presente trabajo se confeccionaron bajo condiciones de laboratorio y un curado constante en cámara húmeda, condiciones que no se satisfacen en las construcciones donde normalmente se utilizan los cementos en estudio. Si bien no se cuenta con un método preciso para validar las curvas estadísticamente, evaluar su desviación con la norma ACI 214R resulta adecuado ya que este es un criterio más preciso, y en caso que no cumpla con las especificaciones, el evaluar su validez a partir del rango de sus intervalos de confianza contra los criterios del ACI 214R sería otra medida adecuada, ya que aunque los intervalos de confianza van a ser menores en rango, estos cuentan con una estadística de fondo que les da mayor validez que la desviación.
- Debido a la comercialización de agregado grueso con un tamaño máximo nominal de 16 mm, se debe establecer alguna clase de reglamentación para la granulometría de este agregado, ya que si bien se obtuvo que el agregado cumple con las especificaciones para otros tamaños nominales en la norma ASTM C33, finalmente se trata de un agregado al cual no se le puede realizar una verificación directa de este parámetro, y tal como se obtuvo con el trabajo, la distribución del tamaño de sus partículas puede variar considerablemente de una fuente a otra.
- Se considera que buena parte del grado de control obtenido en las mezclas de concreto elaboradas se debe a la capacitación ofrecida en cada uno de los ensayos así como la cantidad de ensayos y muestras que se emplearon para la obtención de cada

variable, por lo que se debe tratar de mantener estándares similares para reducir la variabilidad entre los resultados que se vayan a obtener en investigaciones de índole similar.

- Es aconsejable elaborar mezclas de concreto de prueba para comprobar que los diseños de mezcla cumplen con los valores de revenimiento establecidos, se obtenga una trabajabilidad adecuada y prevenir problemas que se presenten en cuanto a resistencia.
- Debido a que al momento de realizar el proyecto no se contó con un procedimiento normado para la determinación del pH del cemento, se debe verificar que el procedimiento planteado en el trabajo considera de manera adecuada las variables que pueden afectar el pH del cemento y concluir si en efecto se trata de un procedimiento apropiado, ya que se dispuso de una disolución para obtener esta característica.
- Para determinar la resistencia a la abrasión en superficies de concreto según la norma ASTM C944, se recomienda utilizar una carga doble (197 N) según se indica en la norma, ya que al aplicar una carga normal (98 N), tal como se hizo con el presente trabajo, se obtiene una diferencia mínima en los resultados entre cada uno de los concretos elaborados, dificultando el establecer una relación clara entre la resistencia a la abrasión de los concretos y las características de las muestras ensayadas.
- Profundizar en el tema de los cementos modificados con escoria, ya que estos tardan en reaccionar con el agua haciendo que al principio la mezcla este muy seca, pero posteriormente se vuelve muy líquida con la inclusión de poca agua.
- Se debe evitar la manipulación de las muestras por parte de diferentes personas a la hora de realizar ensayos, ya que esto podría implicar variaciones importantes en los resultados generados en cada ensayo. Aunque también se considera valioso el comparar los resultados de un ensayo realizado por parte de los técnicos del laboratorio con los resultados obtenidos por parte del estudiante para un mismo material y con ello evaluar la capacidad del estudiante a partir de la variabilidad.
- Debido a que los ensayos realizados en el cemento MM/A (E-C) – 28 se realizaron tomando muestras de un cemento almacenado un considerable tiempo, se deben realizar ensayos para medir las mismas características determinadas en el presente trabajo y con ello corroborar los resultados expuestos en el trabajo.

- Con el fin de obtener consistencias similares entre diferentes mezclas de concreto a partir de un rango de revenimientos establecidos, al elaborar estas se debe procurar que la primera medición de revenimiento en el concreto fresco sea cercana al límite inferior del rango establecido de revenimiento, ya que en caso de no obtenerse el asentamiento esperado del concreto, solo se deberá agregar una leve cantidad de agua para obtener la consistencia deseada, en caso contrario, al tratarse de cumplir con el límite superior existe la posibilidad que el revenimiento sea mayor al esperado, y por lo tanto la mezcla de concreto elaborada deba ser desechada.
- Se aconseja realizar dosificaciones por peso en la fabricación de mezclas de concreto para obtener un mayor control de los resultados, así como facilitar la preparación de los materiales antes de elaborar las mezclas de concreto.
- Para proyectos de índole similar, con el fin de reducir las desviaciones del cronograma establecido para el desarrollo del proyecto, el llevar a cabo una reunión previa con el comité asesor respecto a la metodología, cronograma y materiales que se requerirán es recomendable, ya que con esto se definen de manera más precisa las pautas para realizar el trabajo y facilita la interacción entre las diferentes partes involucradas. Asimismo, al establecer el cronograma de trabajo, el programar ensayos en fechas en las cuales se curan especímenes de concreto se aconseja para reducir el tiempo del desarrollo experimental.
- Se debe determinar la resistencia del concreto, fabricado con los cementos en estudio y los agregados utilizados, a la tensión, tracción, cortante y flexión; y a partir de ello definir una relación de la resistencia a la compresión de estos concretos con los otros tipos de fuerzas a las que puede verse sometidos elementos fabricados con estos materiales.
- Determinar curvas de desarrollo de la resistencia a la compresión para otros tipos de cementos comercializados en Costa Rica, siguiendo una metodología similar a la presentada en este trabajo, buscando medir cada una de las características identificadas en el proyecto.

## Referencias bibliográficas

- American Concrete Institute. (2014). *ACI 318S-14. Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-14) y Comentario a Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318SR-14)*. American Concrete Institute: Michigan, Estados Unidos de América.
- American Concrete Institute. (1982). *Informe del Comité ACI 116. Terminología del cemento y el hormigón*.
- American Concrete Institute. (2002). *ACI 211-91. Práctica estándar para la selección de las proporciones de concreto normal, pesado y masivo*.
- American Concrete Institute. (2002). *ACI 214R-02. Evaluación de los resultados de las pruebas de resistencia del concreto*.
- American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM C-29. Método de ensayo para determinar la densidad masiva (peso unitario) y porcentaje de vacíos en los agregados*.
- American Society for Testing and Materials. (2015). *ASTM C-31. Práctica normalizada para preparación y curado de especímenes de ensayo de concreto en obra*.
- American Society for Testing and Materials. (2016). *ASTM C-33/C33-M. Especificación normalizada para agregados para concreto*.
- American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM C-39. Método estándar de prueba para la resistencia a la compresión de elementos cilíndricos de concreto*.
- American Society for Testing and Materials. (2016). *ASTM C-40. Método de ensayo normalizado para la detección de impurezas orgánicas en el agregado fino para el concreto*.
- American Society for Testing and Materials. (2016). *ASTM C-42. Método de ensayo normalizado de obtención y ensayo de núcleos perforados y vigas aserradas de concreto*.
- American Society for Testing and Materials. (2016). *ASTM C-109. Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico*.
- American Society for Testing and Materials. (2013). *ASTM C-117. Método de ensayo normalizado para materiales más finos que una criba no. 200 (75  $\mu$ m) en agregados minerales mediante lavado*.

American Society for Testing and Materials. (2016). ASTM C-125. *Definición Estándar de términos relacionados con el concreto y agregados del concreto.*

American Society for Testing and Materials. (2015). ASTM C-127. *Método de ensayo normalizado para determinar la densidad, la densidad relativa o gravedad específica, y la absorción de agregados gruesos.*

American Society for Testing and Materials. (2015). ASTM C-128. *Método de ensayo normalizado para determinar la densidad, la densidad relativa o gravedad específica, y la absorción de agregados finos.*

American Society for Testing and Materials. (2014). ASTM C-131. *Método de ensayo estándar para la resistencia a la degradación del agregado por abrasión en la Máquina de los Ángeles.*

American Society for Testing and Materials. (2014). ASTM C-136. *Método de ensayo normalizado para la determinación de granulométrica de agregados finos y gruesos.*

American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM C-138. *Método de ensayo normalizado de densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (gravimétrico) del concreto.*

American Society for Testing and Materials. (2015). ASTM C-143. *Método de ensayo normalizado para asentamiento de concreto de cemento hidráulico.*

American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM C-172. *Práctica normalizada para muestreo de concreto recién mezclado.*

American Society for Testing and Materials. (2016). ASTM C-183. *Práctica normalizada para muestreo y cantidad de pruebas de cemento hidráulico.*

American Society for Testing and Materials. (2016). ASTM C-187. *Método de ensayo estándar para la determinación de la cantidad de agua requerida para consistencia normal de una pasta de cemento hidráulico.*

American Society for Testing and Materials. (2016). ASTM C-188. *Método de ensayo estándar para la determinación de la densidad de un cemento hidráulico.*

American Society for Testing and Materials. (2013). ASTM C-191. *Método de ensayo estándar para la determinación del tiempo de fraguado por aguja de Vicat.*

American Society for Testing and Materials. (2016). ASTM C-192. *Práctica normalizada para preparación y curado de especímenes de concreto para ensayo en laboratorio.*



- American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM C-231. *Método de ensayo normalizado para la determinación del contenido de aire en mezcla de concreto fresca por medio del método de presión.*
- American Society for Testing and Materials. (2014). ASTM C-305. *Práctica normalizada para el mezclado mecánico de pasta y morteros de cemento hidráulico de consistencia plástica.*
- American Society for Testing and Materials. (2015). ASTM C-430. *Método de ensayo estándar para finura de cemento hidráulico por medio de tamiz de 45  $\mu\text{m}$  (Nº 325).*
- American Society for Testing and Materials. (2011). ASTM C-702. *Práctica normativa para reducir muestras de agregados a tamaño de prueba.*
- American Society for Testing and Materials. (2012). ASTM C-944. *Método de ensayo estándar para resistencia a la abrasión en superficies de concreto o mortero por el método de corte rotativo.*
- American Society for Testing and Materials. (2012). ASTM C-1064. *Método de ensayo normalizado de temperatura de concreto de cemento hidráulico recién mezclado.*
- American Society for Testing and Materials. (2015). ASTM C-1231. *Práctica normativa para el uso de capas no adheridas en la determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto endurecidos.*
- American Society for Testing and Materials. (2015). ASTM C-1437. *Método de ensayo estándar para el flujo de un mortero de cemento hidráulico.*
- American Society for Testing and Materials. (2014). ASTM D-75. *Práctica normativa para el muestreo de agregados.*
- American Society for Testing and Materials. (2013). *ASTM D5821. Método de prueba para determinar el porcentaje de partículas fracturadas en el agregado.*
- Anguiano, J. & Pérez, M. (2013, Febrero 4). *La importancia del concreto como material de construcción. Tecnología del concreto.* Instituto tecnológico de Tepic. Extraído el 10 de abril del 2017 de: [http://www.academia.edu/7037474/La\\_importancia\\_del\\_concreto\\_como\\_material\\_de\\_construccion](http://www.academia.edu/7037474/La_importancia_del_concreto_como_material_de_construccion)
- Angulo, Y. (2015, Marzo 23). *Cemento Sinocem cuestionado por el Instituto del Cemento resultó ser de mejor calidad que Holcim y CEMEX.* El mundo. Extraído el 10 de abril

- del 2017 de: <http://www.elmundo.cr/cemento-sinocem-cuestionado-por-el-instituto-del-cemento-resultado-ser-de-mejor-calidad-que-holcim-y-cemex/>
- Apuntes de clase: Estadística Aplicada IC-0606. Prof. Ing. Henry Hernández Vega. (2015). Universidad de Costa Rica.
- Apuntes de clase: Materiales de Construcción IC-0604. Prof. Ing. Flor de María Muñoz Umaña. (2015). Universidad de Costa Rica.
- Apuntes de clase: Propiedades físicas y mecánicas del concreto y acero de refuerzo. Estructuras de Concreto I IC-0801. Profesor: Ing. Guillermo González Beltrán. (2016). Universidad de Costa Rica.
- Andrade, C. & Macías, A. (1982). *Influencia del contenido en álcalis de los cementos sobre la corrosión de armaduras galvanizadas*. Madrid, España: Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento.
- Carvajal, L. (2016). *Determinación de las curvas características de resistencia a la compresión en función del tiempo para el cemento de uso general comercializado en San José, Costa Rica*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Celik, I. (2009). The Effects of Particle Size Distribution and Surface Area Upon Cement Strength Development. Estados Unidos de América: Powder Technology.
- Chinchilla, N. (2016). *Resistencia del mortero hidráulico a cinco edades diferentes utilizando cinco tipos de cemento nacional*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, Escuela de Ingeniería en Construcción, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Devore, J. (2008). *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*. Estados Unidos de América: Cengage Learning Editores.
- Elizondo, G. (2013). *Resistencia vs relación A/C del concreto a tres edades y con dos tipos de cemento (UG y MP-AR)*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, Escuela de Ingeniería en Construcción, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Gómez, M. (2009). *Elementos de estadística descriptiva*. San José, Costa Rica: Editorial Universidad Estatal a Distancia.

- Gómez, S. (2005). *Desgaste abrasivo de cuatro agregados nacionales y su relación con la resistencia a compresión de un concreto de mediana resistencia*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- González, F. (2004). *Manual de supervisión de obras de concreto*. México: Editorial Limusa.
- Gonzales, G. & Monge, A. (2011). *Recomendaciones para obtener resultados confiables de resistencia de cilindros de concreto. Métodos y materiales, Volumen 1(1)*, pág. 4.
- Herrera, M. (2015, Febrero). *MEIC prepara reglamento que abre las puertas a cementera china*. *La Nación*. Extraído el 10 de abril del 2017 de: [http://www.nacion.com/nacional/infraestructura/MEIC-prepara-reglamento-puertas-cementera\\_0\\_1467653255.html](http://www.nacion.com/nacional/infraestructura/MEIC-prepara-reglamento-puertas-cementera_0_1467653255.html)
- Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. (2015). INTE C147:2015. *Construcción. Cemento Hidráulico. Especificaciones y Requisitos*.
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W. & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Estados Unidos de América: Portland Cement Association.
- Kizilkanat, A., Oktay, D., Kabay, N. & Tufekci, M. (2015). *Comparative Experimental Study of Mortars Incorporating Pumice Powder or Fly Ash*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 04015119(7).
- Muñoz, F. (1999). *Componentes Principales de las Mezclas de Concreto*. San José, Costa Rica: Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- Montgomery, D. & Runger, G. (1996) *Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería*. Estados Unidos de América: McGraw-Hill.
- Neville, A. & Brooks, J. (2010). *Concrete Technology*. Estados Unidos de América: Longman Scientific & Technical.
- Orchard, D. (1973). *Concrete Technology (Vol. 2)*. Estados Unidos de América: John Wiley & Sons.
- Reglamento Técnico de Cementos Hidráulicos RTCR 479:2015.
- Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C. & Kiattikomol, K. (2009). *Compressive Strength and Expansion of Blended Cement Mortar Containing Palm Oil Fuel Ash*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(8), pág. 426-431.

- Thongsanitgarn, P., Wongkeo, W. & Chaipanich, A. (2014). *Hydratation and Compressive Strength of Blended Cement Containing Fly Ash and Limestone as Cement Replacement. Journal of Materials in Civil Engineering, 26(12), 04014088(5)*
- Villatoro, C. (2015, Abril 7). *Costa Rica genera batalla por el cemento*. Extraído el 10 de abril del 2017 de: <http://www.legiscomex.com/BancoConocimiento/C/cementos-costa-rica-clara-villatoro-actualizacion/cementos-costa-rica-clara-villatoro-actualizacion.asp?CodSubseccion=447&numarticulo=&CodSeccion=210>

## Apéndices y anexos

### Apéndice A. Descripción del trabajo experimental

Los ensayos realizados se llevaron a cabo conforme lo estipulado en las normas ASTM utilizadas, correspondientes a la caracterización de agregados (finos y gruesos), cementos y mezclas de concreto, así como falla a compresión de cilindros. Con respecto al diseño de mezcla, este se elaboró con base en los lineamientos de la ACI 211 (American Concrete Institute) para concretos de pesos ligero, normal y pesado. Por otra parte, para la sección de análisis estadístico de los datos obtenidos, se hizo uso del módulo de análisis estadístico del programa Microsoft Excel 2010.

En el presente apéndice se expone el procedimiento experimental que se siguió para la obtención de las diferentes variables de interés.

### Ensayos de caracterización agregados

#### ASTM D75. Muestreo de agregados

Muestreo desde una pila de almacenaje sin equipo mecánico:

1. Como se observa en la **Figura A.1**, el agregado fino de río se apiló en uno de los depósitos de la bodega del laboratorio (a), el agregado grueso de río fue almacenado en una cajuela (b) y el agregado de tajo fue almacenado en sacas (c). Antes de muestrear el agregado a ensayarse, se homogenizaba el material almacenado hasta formar montículos, esto mediante la mezcla manual con una pala para revertir el efecto causado por la segregación debido al apilamiento.



**Figura A.1** Almacenamiento de agregados en laboratorio

2. Se raspó la superficie externa del montículo del cual se tomó la muestra con la pala, posteriormente se insertó la pala perpendicularmente al ángulo del montículo en la

parte recién expuesta del material para obtener la muestra. Se tomaron muestras en tres incrementos, tomándolas del tercio superior, el punto medio y del tercio inferior del volumen de los montículos.

3. Se recolectaron para cada agregado muestras de forma aleatoria y representativa, dónde el número de muestras tomadas se definieron a partir del número de ensayos a realizar por agregado; y el tamaño de cada muestra se tomó de manera tentativa basándose en el tipo y número de ensayos a realizar.

#### ASTM C702. Reducción de muestras de agregados a tamaño de prueba

Procedimiento de cuarteo mecánico:

1. Se seleccionó el divisor mecánico adecuado según el tamaño de la muestra a ensayarse<sup>19</sup>. En la Figura A.2 se muestra el equipo empleado para la reducción de las muestras de agregados.



**Figura A.2** Equipo utilizado para reducción de muestras de agregados

2. Se colocó la muestra original en uno de los recipientes del divisor mecánico, distribuyéndola uniformemente en toda su longitud.
3. Se introdujo la muestra en la bandeja del divisor mecánico distribuida uniformemente, permitiendo que la muestra fluyera libremente en las aberturas hasta los recipientes ubicados por debajo del divisor mecánico.
4. Se introdujo nuevamente la muestra de uno de los recipientes reduciéndola varias veces hasta obtener las cantidades necesarias del material para el ensayo a realizarse.

---

<sup>19</sup> Se debió utilizar un divisor mecánico de mayor tamaño para las muestras del ensayo de densidad aparente (peso unitario) y vacíos en agregado.

## ASTM C29. Densidad aparente (peso unitario) y vacíos en agregado<sup>20</sup>

### Procedimiento de varillado:

1. Se obtuvo la muestra de acuerdo con la práctica ASTM D75, y se redujo a un tamaño de aproximadamente 6 kg (agregado fino) o 19 kg (agregado grueso), dependiendo del agregado a ensayar, de acuerdo a la práctica ASTM 702.
2. Se secó la muestra en el horno hasta obtener una masa constante a una temperatura de  $(110 \pm 5)$  °C.
3. Se registró el peso y volumen del recipiente limpio y vacío.
4. Se llenó el recipiente cilíndrico a un tercio de su altura y se procedió a acomodar el agregado (fino o grueso) con los dedos de la mano.
5. Se varilló dando 25 golpes a la capa de agregado con la varilla de apisonado, con el cuidado de no golpear muy fuertemente el fondo del molde y tratando de distribuir de manera uniforme los golpes.
6. Se procedió a llenar el segundo tercio de la altura del recipiente, se acomodó el agregado nuevamente y se varilló de la misma manera que para el primer tercio, donde ahora debió darse el cuidado de no golpear la primera capa de agregado ya varillada.
7. Se llenó el último tercio de la altura del molde hasta que el agregado sobresalió del recipiente y se volvió a varillar como se mencionó previamente, teniendo finalmente el cuidado de no golpear la segunda capa de agregado.
8. Finalmente se niveló la última capa con los dedos y empleado la varilla de apisonado en su eje longitudinal, tomándose la medida del peso del recipiente con el agregado.

### Procedimiento suelto:

1. Se obtuvo la muestra de acuerdo con la práctica ASTM D75, y se redujo a un tamaño de aproximadamente 6 kg (agregado fino) o 19 kg (agregado grueso), dependiendo del agregado a ensayar, de acuerdo a la práctica ASTM 702.
2. Se secó la muestra en el horno hasta obtener una masa constante a una temperatura de  $(110 \pm 5)$  °C.
3. Se registró el peso y volumen del recipiente limpio y vacío.

---

<sup>20</sup> Mismo procedimiento para los dos tipos de agregados, con la única diferencia que se emplea un molde diferente según sea el agregado ensayado.

4. Se llenó el molde cilíndrico de agregado con un cucharón descargando desde una altura que no excediera los 50 mm sobre el borde del recipiente, evitando la segregación de los materiales.
5. Se niveló la superficie del agregado con los dedos y un enrasador. En la **Figura A.3** se presenta un ejemplo de este acabado del agregado antes de ser pesado.
6. Se tomó la medida del peso del recipiente con el agregado.



**Figura A.3** Nivelación de superficie de muestras ensayo de densidad masiva (agregado fino a la izquierda, agregado grueso a la derecha)

Para determinar la densidad masiva se utilizó la ecuación siguiente:

$$M = (G - T)/V \quad \text{(A-1)}$$

Donde  $M$  es la densidad masiva del agregado ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $G$  es la masa del agregado con el recipiente (kg),  $T$  es la masa del recipiente (kg) y  $V$  es el volumen del recipiente ( $\text{m}^3$ ).

Para determinar el porcentaje de vacíos en el agregado se utilizó la ecuación siguiente:

$$\% \text{ Vacíos} = 100 [(S \cdot W) - M]/(S \cdot W) \quad \text{(A-2)}$$

Donde  $M$  es la densidad masiva del agregado ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $S$  es la gravedad específica del agregado determinada de acuerdo a los métodos de prueba ASTM C127 o ASTM C128 y  $W$  es la densidad del agua ( $998 \text{ kg}/\text{m}^3$ ).



#### ASTM C40. Impurezas orgánicas en agregado fino para concreto

1. Se seleccionó la muestra de acuerdo con la práctica ASTM D75.
2. Se tomó una muestra de aproximadamente 450 g de una muestra más grande de agregado de acuerdo con la práctica ASTM C702.
3. Se llenó una botella de vidrio hasta el nivel de 130 ml con la muestra de agregado fino.
4. Se añadió la solución de hidróxido de sodio<sup>21</sup> hasta que el volumen de agregado fino con la solución, después de la agitación, fuese de 200 mL aproximadamente.
5. Se tapó la botella, agitó vigorosamente y dejó en reposo por 24 horas.
6. Se definió el color del líquido de la muestra de ensayo utilizando cinco vidrios de colores estándar. Se comparó el color del líquido que sobrenada de la muestra de ensayo con los colores de los cinco vidrios de color estándar.
7. Se registró si el color de la muestra es más claro, más oscuro o igual al de referencia (Se reportó el número de la placa orgánica con el color más cercano al color del líquido sobrenadante arriba del espécimen). Un ejemplo de la comparación de la coloración de la muestra con los colores del vidrio de color estándar se muestra en la **Figura A.4**.



**Figura A.4** Ensayo de impurezas orgánicas en agregado fino

<sup>21</sup> Solución de hidróxido de sodio de líquido con 97 partes de agua y 3 partes de hidróxido de sodio (NaOH).

ASTM C117. Materiales más finos que un tamiz No. 200 (75  $\mu$ m) en agregados minerales mediante lavado<sup>22</sup>

1. Se secó el espécimen en el horno hasta obtener una masa constante a una temperatura de  $(110 \pm 5)$  °C.
2. Se determinó la masa seca del espécimen.
3. Se colocó el espécimen en un contenedor y se agregó suficiente agua para cubrirlo (no se agregó al agua ningún detergente, agente dispersante u otra sustancia).
4. Se agitó el espécimen con suficiente vigor, para obtener una completa separación de todas las partículas más finas que el tamiz No. 200 de las partículas gruesas; y para poner todo el material fino en suspensión.
5. Se vertió el agua conteniendo el suspendido y los sólidos disueltos sobre los tamices anidados, con el tamiz para gruesos arriba (evitando la decantación de partículas gruesas del espécimen). El juego de tamices anidados consistió en el uso de un tamiz No. 16 colocada por encima de la malla No. 200.
6. Se agregó una segunda capa de agua al espécimen en el contenedor, se agitó y decantó como antes.
7. Se repitió la operación hasta que el agua de lavado fuese clara. En la **Figura A.5** se presenta un ejemplo del estado del agua una vez que los agregados han sido lavados correctamente.



**Figura A.5** Lavado de material más fino que la malla No. 200 (agregado fino a la izquierda, agregado grueso a la derecha)

8. Se retornó todo el material retenido en los tamices anidados por enjuague del espécimen lavado.

<sup>22</sup> Se aplicó el mismo procedimiento para el agregado grueso como para el fino.

9. Se secó el agregado lavado en el horno hasta obtener una masa constante a una temperatura de  $(110 \pm 5)$  °C y se determinó la masa del espécimen.

Para calcular la cantidad de material pasando el tamiz No. 200 por lavado se utilizó la ecuación siguiente:

$$A = [(B - C)/B] \cdot 100 \quad (A-3)$$

Dónde  $A$  es el porcentaje de material más fino que la malla de 75 micrómetros (No. 200) por lavado (%),  $B$  es la masa original seca de la muestra (g) y  $C$  es la masa seca de la muestra después de haber sido lavada (g).

#### ASTM C127. Densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregados gruesos

1. Se muestreó el agregado de acuerdo con la práctica ASTM D75.
2. Se mezcló completamente la muestra y se redujo para obtener un espécimen de aproximadamente 3 kg (por tratarse de piedra con un tamaño máximo nominal de 16 mm), usando el procedimiento aplicable descrito en la práctica ASTM C702.
3. Se lavó la muestra para eliminar el polvo y otros recubrimientos de la superficie.
4. Se secó la muestra en horno hasta obtener una masa constante a una temperatura de  $(110 \pm 5)$  °C.
5. Se enfrió la muestra en el aire a temperatura ambiente hasta que la muestra fuese cómoda de manipular (aproximadamente durante 1 hora).
6. Se sumergió el agregado en agua a temperatura ambiente por un período de  $24 \text{ h} \pm 4 \text{ h}$ .
7. Se removió la muestra del agua y se envolvió en un paño absorbente hasta que todas las películas visibles de agua fuesen removidas individualmente.
8. Se determinó la masa de la muestra de ensayo en la condición saturada superficie seca. En la **Figura A.6** se presenta un ejemplo del agregado grueso en condición saturada con superficie seca.



**Figura A.6** Condición saturada superficie seca en agregado grueso

9. Después de determinar la masa, se colocó inmediatamente la muestra en condición saturada con superficie seca en un recipiente y se determinó su masa aparente en el agua a  $(23 \pm 2)$  °C (se removi6 todo el aire atrapado en la muestra sacudiendo el recipiente mientras se mantuvo sumergido).
10. Se sec6 la muestra en el horno hasta obtener una masa constante a una temperatura de  $(110 \pm 5)$  °C, se enfri6 a temperatura ambiente hasta que la muestra fuese c6moda para manipular (aproximadamente 50 °C), y se determin6 su masa.

Para calcular la gravedad espec6fica del agregado seco al horno se utiliz6 la ecuaci6n siguiente:

$$\text{Gravedad espec6fica (seca al horno)} \ G_{BS} = A/(B - C) \quad \text{(A-4)}$$

Para calcular la gravedad espec6fica del agregado en condici6n saturada con superficie seca se utiliz6 la ecuaci6n siguiente:

$$\text{Gravedad espec6fica (saturada superficie seca)} \ G_{BSSS} = B/(B - C) \quad \text{(A-5)}$$

Para calcular la gravedad espec6fica del agregado aparente se utiliz6 la ecuaci6n siguiente:

$$\text{Gravedad espec6fica (aparente)} \ G_S = A/(A - C) \quad \text{(A-6)}$$

Para calcular el porcentaje de absorci6n del agregado se utiliz6 la ecuaci6n siguiente:

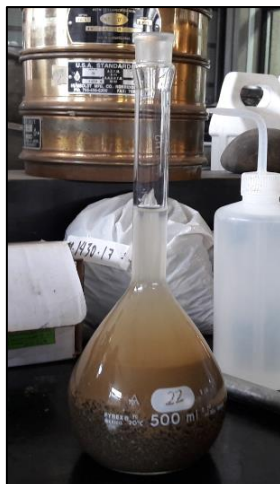
$$\text{Absorci6n, \%} = [(B - A)/A] \cdot 100 \quad \text{(A-7)}$$

Dónde  $A$  es la masa de la muestra seca al horno en aire (g),  $B$  es la masa de la muestra en condición saturada con superficie seca en aire (g), y  $C$  es la masa aparente saturada de la muestra en agua (g).

ASTM C128. Densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregados finos

1. Se muestreó el agregado de acuerdo con la práctica ASTM D75.
2. Se mezcló completamente la muestra y se redujo para obtener un espécimen de aproximadamente 1 kg, usando el procedimiento aplicable descrito en la práctica ASTM C702.
3. Se secó en el horno la muestra hasta obtener una masa constante a una temperatura de  $(110 \pm 5)$  °C.
4. Se enfrió la muestra en el aire a temperatura ambiente hasta que la muestra fuese cómoda de manipular (aproximadamente hasta 50 °C).
5. Se sumergió el agregado en agua a temperatura ambiente por un período de  $(24 \pm 4)$  horas.
6. Se decantó el exceso de agua con el cuidado de evitar la pérdida de finos.
7. Se esparció la muestra en una superficie plana no absorbente, y se expuso a una ligera corriente de aire, removiendo la muestra frecuentemente para asegurar un secado homogéneo.
8. Se realizó el primer intento de la prueba de humedad superficial cuando se observó una ligera humedad superficial aun presente en la muestra para asegurar que no ha sido secada pasando a la condición saturada superficialmente seca.
9. Para el ensayo de humedad superficial, se sujetó el molde firmemente sobre una superficie lisa y no absorbente con el diámetro mayor hacia abajo. Posteriormente se colocó una porción de agregado fino parcialmente seco y suelto dentro del molde, llenándolo hasta que se desbordara y apilando el material adicional por encima del borde superior del molde, sosteniéndolo con los dedos.
10. Ligeramente se apisonó el agregado fino dentro del molde con 25 golpes ligeros del pisón, procurando que cada caída fuese 5 mm por arriba de la superficie del agregado fino (ajustando la altura inicial a la elevación de la nueva superficie después de cada golpe), permitiendo que el pisón cayese libremente sobre la superficie después de cada golpe y distribuyendo los golpes sobre la superficie.

11. Se removió la arena suelta de la base y se levantó el molde verticalmente. Para los casos en que la humedad aún se encontraba presente se observó que el agregado fino retuvo la forma del molde, en tanto que se logró apreciar un desplome ligero del agregado moldeado cuando este había alcanzado la condición saturada superficie seca.
12. Después del primer intento de la prueba de humedad superficial, se retornó la muestra a la superficie plana no absorbente, secando con movimientos constantes la misma y se probó a intervalos constantes hasta que la muestra alcanzase la condición saturada superficialmente seca.
13. Seguidamente se seleccionó el procedimiento gravimétrico para determinar la gravedad específica y la absorción del agregado, por lo que se llenó parcialmente el picnómetro con agua.
14. Se introdujo al picnómetro (500 ± 10) g de agregado fino en la condición saturada superficie seca (SSS), y se llenó con agua adicional hasta aproximadamente el 90 % de su capacidad.
15. Se agitó el picnómetro manualmente, para lo cual se rodó, invirtió y agitó el picnómetro para eliminar burbujas de aire visibles (20 minutos aproximadamente).
16. Se usó la punta de una toalla de papel para eliminar la espuma y las burbujas de aire en las paredes del picnómetro.
17. Se ajustó el nivel de agua en el picnómetro a su capacidad calibrada, usando la temperatura del picnómetro y su contenido a (23 ± 2) °C, sumergiéndolo parcialmente en agua que circulara. En la **Figura A.7** se muestra un ejemplo del picnómetro conteniendo la muestra y agua hasta a su capacidad calibrada antes de ser sumergida en agua.



**Figura A.7** Picnómetro conteniendo muestra de agregado fino en condición saturada

18. Se determinó la masa total del picnómetro, el espécimen y el agua.
19. Se removió el agregado fino del picnómetro y se secó en el horno a una temperatura  $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta alcanzar una masa constante.
20. Se enfrió a temperatura ambiente durante aproximadamente 1 hora y se determinó su masa.
21. Se determinó la masa del picnómetro lleno con agua a  $(23 \pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta su capacidad calibrada.

Para calcular la gravedad específica del agregado seco al horno se utilizó la ecuación siguiente:

$$\text{Gravedad específica (seca al horno)} G_{BS} = A/(B + S - C) \quad (\text{A-8})$$

Para calcular la gravedad específica del agregado en condición saturada con superficie seca se utilizó la ecuación siguiente:

$$\text{Gravedad específica (saturada superficie seca)} G_{BSSS} = S/(B + S - C) \quad (\text{A-9})$$

Para calcular la gravedad específica del agregado aparente se utilizó la ecuación siguiente:

$$\text{Gravedad específica (aparente)} G_S = A/(B + A - C) \quad (\text{A-10})$$

Para calcular el porcentaje de absorción del agregado se utilizó la ecuación siguiente:

$$\text{Absorción, \%} = 100[(S - A)/A] \quad (\text{A-11})$$

Dónde  $A$  es la masa del espécimen seco al horno (g),  $B$  es la masa del picnómetro lleno con agua hasta la marca de calibración (g),  $C$  es la masa del picnómetro lleno con el espécimen y agua hasta la marca de calibración (g) y  $S$  es la masa del espécimen en condición saturada con superficie seca (g).

ASTM C131. Resistencia a la degradación del agregado grueso de pequeño tamaño por abrasión e impacto en la Máquina de los Ángeles

1. Se muestreó el agregado de acuerdo con la práctica ASTM D75 y se redujo la muestra para obtener especímenes de un tamaño adecuado en concordancia con el procedimiento descrito en la práctica ASTM C702.
2. Se lavó la muestra reducida y se secó en el horno el espécimen hasta obtener una masa constante a una temperatura de  $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ .
3. Se separó la muestra en fracciones de tamaños individuales que posteriormente se recombinaron a la graduación indicada en el Cuadro A.1. Se escogió el tipo de graduación a ensayar de acuerdo a los resultados obtenidos con el ensayo de granulometría del agregado, escogiéndose aquella graduación que más representase al material.

**Cuadro A.1** Graduaciones de muestras para prueba de abrasión de agregado grueso en Máquina de los Ángeles

Tamaño del tamiz (abertura cuadrada)		Masa de los tamaños indicados, g			
Pasando	Retenido	Graduaciones			
		A	B	C	D
37.5 mm (1½ in.)	25.0 mm (1 in.)	1 250 ± 25	...	...	...
25.0 mm (1 in.)	19.0 mm (¾ in.)	1 250 ± 25	...	...	...
19.0 mm (¾ in.)	12.5 mm (½ in.)	1 250 ± 10	2 500 ± 10	...	...
12.5 mm (½ in.)	9.5 mm (⅜ in.)	1 250 ± 10	2 500 ± 10	...	...
9.5 mm (⅜ in.)	6.3 mm (1¼ in.)	...	...	2 500 ± 10	...
6.3 mm (1¼ in.)	4.75-mm (No. 4)	...	...	2 500 ± 10	...
4.75-mm (No. 4)	2.36-mm (No. 8)	...	...	...	5 000 ± 10
Total		5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10

**Fuente:** ASTM C131, 2014



4. Se registró la masa de la muestra antes de ser ensayada en la máquina de Los Ángeles.
5. Se colocó la muestra y la carga abrasiva correspondiente en la máquina de Los Ángeles. La carga (esferas de acero) se seleccionó dependiendo de la graduación a partir de lo indicado en el Cuadro A.2.

**Cuadro A.2** Carga abrasiva a utilizar por tipo de graduación para prueba de abrasión de agregado grueso en Máquina de los Ángeles

Graduación	Número de esferas	Masa de carga, g
A	12	5000 ± 25
B	11	4580 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

**Fuente:** ASTM C131, 2014

6. Se rotó el tambor de la máquina a una velocidad entre 30 rpm y 33 rpm por 500 revoluciones. La máquina de Los Ángeles empleada para el ensayo se muestra en la Figura A.8.



**Figura A.8** Máquina de Los Ángeles utilizada en el desarrollo del proyecto

7. Se descargó el material de la máquina y se hizo una separación preliminar de la muestra en un tamiz mayor que 1.70 mm (No. 12).

8. Se tamizó la porción fina en un tamiz de 1.70 (No. 12) mm conforme al procedimiento indicado en la norma ASTM C136.
9. Se lavó el material más grueso que el tamiz 1.70 mm (No. 12).
10. Se secó la muestra en el horno a una temperatura entre de  $(110 \pm 5)$  °C hasta obtener una masa constante.
11. Finalmente se registró la masa de la muestra seca.

Se calculó la pérdida como porcentaje de la masa original de la muestra de prueba utilizando la ecuación siguiente:

$$\text{Porcentaje perdido (\% desgaste)} = [(C - Y)/C] \cdot 100 \quad \text{(A-12)}$$

Donde  $C$  es la masa original de la muestra antes de ser ensayada (g), y  $Y$  es la masa final de la muestra ensayada (g).

#### ASTM C136. Determinación de granulometría de agregados finos y gruesos

1. Se muestreó el agregado de acuerdo con la práctica ASTM D75. Por cada ensayo realizado se muestrearon aproximadamente 20 kg de agregado grueso (por tratarse de piedra con un tamaño máximo nominal de 16 mm), o 1500 g de agregado fino.
2. Se mezclaron y redujeron las muestras para obtener especímenes de aproximadamente 5 kg de agregado grueso o 300 g de agregado fino, usando el procedimiento descrito en la práctica ASTM C702.
3. Se procedió a lavar el espécimen a ensayarse de acuerdo a la práctica ASTM C117.
4. Se secó en el horno el espécimen hasta obtener una masa constante a una temperatura de  $(110 \pm 5)$  °C.
5. Se seleccionaron las mallas con aberturas adecuadas para obtener la información requerida por las especificaciones que cubren el material que fue ensayado.
6. Se acomodaron las mallas en orden de tamaño de abertura decreciente de arriba hacia abajo y se colocó el espécimen en la malla superior.
7. Para el caso de agregado fino se utilizó un agitador mecánico, definiendo un tiempo de tamizado no mayor a 10 minutos y tratando de evitar una sobrecarga de material en cualquier tamiz individual. En la **Figura A.9** se presenta la tamizadora utilizada para el análisis granulométrico del agregado fino.



**Figura A.9** Tamizadora utilizada para análisis granulométrico de agregado fino

8. Para el caso de agregado grueso se agitaron las mallas manualmente. Se evitó la sobrecarga de material sobre una malla individual dividiendo el espécimen en dos o más porciones, tamizando cada porción individualmente (para que todas las partículas tuvieran la oportunidad de ponerse en contacto con las aberturas de la malla durante el tamizado).
9. Para el caso de agregado grueso se sostuvo cada malla individual con una charola por debajo, en una posición ligeramente inclinada en una mano. Se golpeó el lado opuesto de la malla firmemente y con un movimiento ascendente contra el talón de la otra mano, a razón de 150 veces por minuto aproximadamente, girando la malla alrededor de un sexto de vuelta en intervalos de 25 golpes.
10. Para cada muestra ensayada se tamizó el tiempo necesario de manera tal que después de terminar el tamizado, no más del 1 % en masa del material retenido en cualquier malla individual pudiese pasar esa malla, durante un minuto adicional de tamizado manual continuo.
11. Se determinó la masa de cada incremento de tamaño del tamiz.
12. Finalmente se verificó que la masa total de material después de pasar por las mallas no difiriera por más de un 0.3 % con la masa seca del espécimen original.

Para el cálculo del módulo de finura se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Modulo de finura} = \frac{\sum_{\text{No. } 4}^{\text{No. } 100} W_{\text{Retenido acumulado}}}{100} \quad (\text{A-13})$$

Dónde  $\sum_{\text{No. } 4}^{\text{No. } 100} W_{\text{Retenido acumulado}}$  es la sumatoria del porcentaje de material retenido acumulado entre la malla No. 100 y la malla No.4 (No.  $\frac{3}{4}$  para agregado grueso).

#### ASTM D5821. Porcentaje de partículas fracturadas en el agregado

1. Se muestreó el agregado de acuerdo con la práctica ASTM D75.
2. Se secó la muestra por horno para obtener una clara separación del material grueso del fino por tamizado, empleando la malla No. 4 de acuerdo a la práctica ASTM C136, descartando el resto de la muestra.
3. Se redujo la muestra para obtener un espécimen de aproximadamente 1500 kg (por tratarse de piedra con un tamaño máximo nominal de 16 mm), usando el procedimiento aplicable descrito en la práctica ASTM C702.
4. Se lavó la muestra para remover el material fino restante y se secó en el horno hasta obtener una masa constante.
5. Se determinó la masa de la muestra completa seca.
6. Se extendió la muestra sobre una superficie plana y limpia para inspeccionar cada partícula. Para verificar que una partícula cumple con los criterios de partícula fracturada, se sostuvo la partícula del agregado de forma tal que la cara fracturada pudiese verse directamente. Si la cara constituía al menos un cuarto del área máxima de la sección transversal de la partícula, esta se consideraba como una partícula fracturada. Como segundo criterio de que una partícula se encontrase fracturada se inspeccionó si la partícula presentaba bordes redondeados - superficies suaves (partícula no fracturada) o si presentaba una combinación de bordes afilados - superficies ásperas, bordes redondeados - superficies ásperas, bordes afilados - superficies suaves (partículas fracturadas). En la **Figura A.10** se presentan algunas de las partículas que se calificaron como partículas no fracturadas (izquierda) y como partículas fracturadas (derecha).



**Figura A.10** Partículas no fracturadas (izquierda) y partículas fracturadas (derecha)

7. Empleando dos recipientes, se separaron las partículas redondeadas de las partículas fracturadas. Para la separación de las partículas se tomó como criterio que al menos una cara de la partícula debía encontrarse fracturada.
8. Se determinó la masa de las partículas fracturadas y la masa de las partículas que no cumplían con los criterios de partículas fracturadas.
9. Finalmente se usó la masa de cada determinación para calcular el porcentaje de partículas fracturadas.

Para calcular el porcentaje en masa de partículas con al menos una cara fracturada se utilizó la siguiente ecuación:

$$P = [F / (F + N)] \cdot 100 \quad \text{(A-14)}$$

Dónde  $P$  es el porcentaje de partículas con al menos una cara fracturada (%),  $F$  es la masa de las partículas con al menos una cara fracturada (g), y  $N$  es la masa de las partículas que no cumplieron con los criterios de partícula fractura (g).

#### Ensayo de preparación de muestras: corrección del agregado fino de tajo

1. Se verificó que el agregado cumpliera con los límites granulométricos establecidos en la norma ASTM C33, realizando una prueba preliminar de granulometría al agregado fino de río y al agregado fino de tajo, de acuerdo al método de ensayo ASTM C136.
2. Se concluyó que el agregado fino de tajo no cumplía con lo establecido en la norma ASTM C33, por lo que se corrigió eliminando todo el material retenido en la malla No. 8.
3. Se corrigió todo el material fino de tajo obtenido utilizando un agitador mecánico, para el cual se acopló la malla No. 8 y se colocó una porción del agregado encima de

la malla. Luego se tamizó por 10 minutos, y se almacenó el material pasando la malla No. 8 (se descartó el resto). La operación se repitió hasta que todo el material hubiese sido corregido. El equipo utilizado para la corrección del agregado fino de tajo se presenta en la **Figura A.11**.



**Figura A.11** Agitador mecánico utilizado para corrección de agregado de tajo

4. Se empleó el material corregido para todos los ensayos de caracterización del agregado y la elaboración de las mezclas de concreto correspondientes.

### **Ensayos de caracterización cementos**

#### ASTM C183. Muestreo y cantidad de pruebas de cemento hidráulico

Muestreo de cemento empaquetado por medio de un tubo de muestra:

1. Se verificó que el cemento fuese almacenado de manera adecuada (cubiertos por bolsas selladas, colocado sobre tarimas y apilado en columnas de no más de un saco por encima de otro), prestando atención a que en el espacio donde se encontraban los sacos se evitara la aireación o la absorción de humedad del cemento. En la **Figura A.12** se muestra lo mencionado anteriormente.



**Figura A.12** Almacenamiento de cemento en laboratorio

2. Se verificó que la edad del cemento a ensayarse fuese la adecuada<sup>23</sup>, inspeccionándose la fecha de fabricación contra la fecha en que se ensayó el cemento y el intervalo de días en que el cemento podía ser almacenado según reglamento de referencia (RTCR 479:2015 Materiales de Construcción, cementos hidráulicos).
3. Posteriormente se seleccionó de manera aleatoria el saco del cual se obtendrían las muestras de cemento.
4. Se insertó el tubo de muestra en el saco de cemento, cubriendo con el dedo pulgar el orificio en un costado del tubo cercano a la ubicación de la agarradera del tubo. El tubo utilizado para el muestreo del cemento se muestra en la **Figura A.13**.



**Figura A.13** Tubo de muestra de cemento

5. Se extrajo el tubo del saco de cemento, y se depositó la porción de la muestra en un recipiente adecuado, posicionando el tubo verticalmente sobre el recipiente, con la abertura transversal dirigida hacia el recipiente, y retirando el dedo pulgar del orificio antes mencionado.

---

<sup>23</sup> Este aspecto no se logró cumplir para el cemento tipo ME-28 debido al procedimiento para su obtención.

6. Se repitió la operación anterior hasta obtener una muestra compuesta de un tamaño adecuado según el tipo y el número de ensayos a realizar con la muestra (no inferior a 5 kg).
7. Se revisó que la muestra compuesta no presentase grumos o material exterior.
8. Se mezcló la muestra compuesta empleando una cuchara.
9. Para evitar la aireación o la absorción de humedad de las muestras, se inició con el ensayo respectivo inmediatamente después de obtener la muestra.

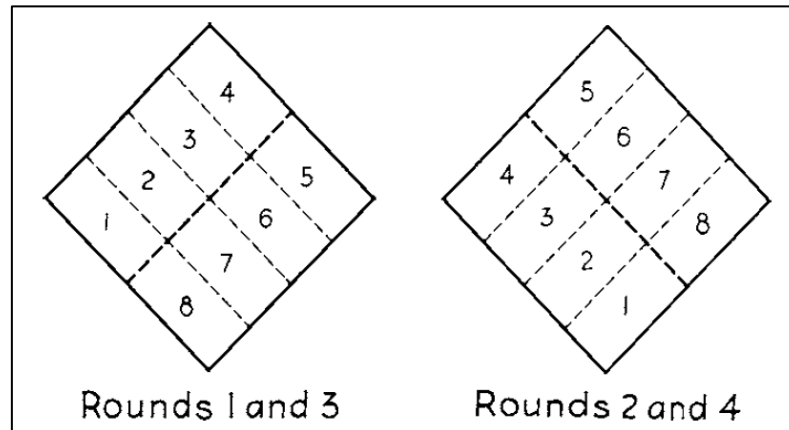
ASTM C109. Resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico (Usando especímenes cúbicos de 50 mm)

1. Se seleccionó una proporción de materiales para el mortero estándar de una parte de cemento por 2.75 partes por peso de arena graduada normalizada (arena Ottawa). Se empleó además una relación de agua-cemento entre 0.49 y 0.51 dependiendo del cemento utilizado para producir un flujo de  $(110 \pm 5) \%$ .
2. Para hacer 12 especímenes cúbicos de mortero por cemento utilizado, se fabricaron 6 especímenes en 2 ensayos para cada cemento, por lo que se pesaron dos muestras de cemento de 500 g, dos muestras de arena Ottawa de 1350 g y una cantidad de agua definida según la relación agua-cemento determinada para cada cemento.
3. Se aplicó una capa delgada de un material antiadherente a las caras interiores del molde y a los platos bases no absorbentes. Posteriormente se juntaron los moldes a su respectivo plato base a partir de tornillos y tuercas de mariposa.
4. Se inició con el mezclado mecánico del mortero de acuerdo al procedimiento dado en la práctica ASTM C305. Se colocaron la paleta y el tazón secos en la posición de mezclado en el mezclador.
5. Se colocó toda el agua de mezclado en el tazón.
6. Se añadió el cemento (500 g) al agua de mezcla y se mezclaron a una velocidad baja de  $(140 \pm 5)$  revoluciones por minuto durante 30 segundos.
7. Se añadió la cantidad de arena total (1350 g) lentamente en un lapso de 30 segundos a la mezcla mientras esta se mezclaba a la velocidad baja del paso anterior.
8. Se detuvo el mezclador y se comenzó a mezclar a una velocidad media de  $(285 \pm 10)$  revoluciones por minuto durante 30 segundos.



9. Se detuvo el mezclado y se dejó el mortero en reposo durante 90 segundos. Durante los primeros 15 segundos de este intervalo de tiempo, se raspó rápidamente el mortero seco de los lados del tazón.
10. Se volvió a mezclar a una velocidad media de  $(285 \pm 10)$  revoluciones por minuto durante 60 segundos.
11. Finalizado el mezclado del mortero se procedió a determinar el flujo del mortero según la práctica ASTM C1437, para lo cual se emplearon una tabla de flujo y un cono normados según la ASTM C230. Previó al moldeo del mortero en el cono, el cono se colocó en el centro de la tabla de flujo según las marcas en la tabla. Se compactó el mortero dentro del cono en dos capas de aproximadamente 25 mm de espesor con 20 golpes en cada capa de forma distribuida con el apisonador, y se raspó la muestra en la parte superior del cono hasta que la capa superior de mortero presentase una apariencia uniforme (lo anterior sin presionar el mortero).
12. Se levantó el molde del mortero (cono) un minuto después de haber completado la operación de mezclado e inmediatamente después se dejó caer la tabla de flujo 25 veces en 15 segundos a una altura de aproximadamente 13 mm . Posteriormente se midió el flujo del mortero midiendo el diámetro en cuatro sentidos distintos equidistantes con un vernier por medio de las marcas presentes en la tabla de flujo, verificando que el flujo producido fuese de  $(110 \pm 5)$  %.
13. Completado el ensayo de flujo, se regresó el mortero de la tabla de flujo al tazón de mezclar. Se rasparon rápidamente los lados del tazón y se re-mezcló el mortero por 15 segundos a una velocidad media. Una vez concluido el mezclado, la paleta de mezcla fue sacudida para remover el exceso de mortero dentro del tazón.
14. Se inició el moldeo de los especímenes con un tiempo total de no más de 2 minutos y 30 segundos después de haber completado el mezclado del mortero. Se colocó una capa de mortero de aproximadamente 25 mm a la mitad de la profundidad del molde en todos los compartimientos del molde.
15. Se apisonó el mortero en cada compartimiento cúbico 32 veces en 4 rondas en aproximadamente 10 segundos, donde cada ronda fue en un ángulo recto respecto a la anterior y consistieron de ocho golpes adjuntos y continuos sobre la superficie del espécimen, tal como se muestran en la **Figura A.14**. Las presiones de apisonamiento fueron lo suficiente para asegurar el llenado uniforme de los moldes y las 4 rondas de

apisonamiento (32 golpes) del mortero fueron completadas en un cubo antes de continuar con el siguiente.



**Figura A.14** Orden de compactación en moldeo de especímenes cúbicos de mortero  
**Fuente:** ASTM C109, 2016

16. Se llenó el compartimiento del molde restante con el mortero remanente y se apisonó como se especificó para la primera capa. Para este segundo apisonamiento se volvió a introducir el mortero que fue forzado a salir sobre la parte superior del molde después de cada ronda de apisonamiento, usando los dedos con guantes y se completó el apisonamiento de cada ronda antes de iniciar la siguiente.
17. Se introdujo el mortero que fue forzado a salirse de la parte superior de los moldes con la paleta plana, alisando los cubos por arrastre del lado plano de la paleta plana (con el borde ligeramente levantado) a través de la parte superior de cada cubo en un ángulo recto a la longitud del molde. Luego se arrastró ligeramente la paleta plana, un poco levantada del molde, una vez a lo largo de la longitud del molde.
18. Se cortó el mortero por arrastre de la paleta plana con un movimiento de corte de sierra sobre la longitud del molde.
19. Inmediatamente después de completado el moldeo se colocaron los especímenes cúbicos en el cuarto húmedo, donde se mantuvieron todos los especímenes sobre los platos base en el cuarto húmedo durante 24 horas.
20. Se repitió el procedimiento de mezclado, moldeo y almacenamiento explicados anteriormente para elaborar los 6 especímenes cúbicos de mortero restantes por cemento utilizado.

21. Se desmoldaron los especímenes y se inmergieron en agua saturada de cal en tanques de almacenamiento contruidos de material no corrosivo.
22. Se procedió a ensayar cada espécimen a diferentes edades de falla dentro de las tolerancias mostradas en el Cuadro A.3.

**Cuadro A.3** Tolerancia permisible por edad de falla en especímenes cúbicos de mortero

Edad de falla	Tolerancia permisible
3 días	$\pm 1$ h
7 días	$\pm 3$ h
14 días	$\pm 3$ h
28 días	$\pm 12$ h
56 días	$\pm 12$ h

**Fuente:** ASTM C109, 2016

23. Se procuró que cada espécimen se mantuviera húmedo hasta el momento de ser ensayado, empleándose 3 cubos de mortero por edad de falla.
24. Se limpió cada espécimen hasta una condición superficie seca, y se eliminó cualquier grano de arena suelto o incrustación presente en las caras en contacto con los bloques de apoyo de la máquina de ensayo. Se revisaron estas caras empleando una regla. Con un vernier se midieron la longitud de las caras restantes del espécimen para revisar el área transversal del cubo.
25. Para todos los especímenes se aplicó la carga en las caras del espécimen que estuvieron en contacto con las superficies planas verticales de los moldes, colocando el espécimen en la máquina de ensayo a la compresión por debajo del centro del bloque de apoyo superior de la máquina.
26. La carga se aplicó a una tasa de carga de 900 N/s a 1800 N/s, procurando no realizar algún ajuste conforme el espécimen cúbico comenzó a ceder antes de la falla. Un ejemplo de uno de los cubos ensayados hasta el momento que falló se presenta en la Figura A.15.
27. Finalmente se registró la carga máxima soportada por el espécimen durante la prueba.



**Figura A.15** Aplicación de carga hasta falla en cubo de mortero

Para el cálculo de la resistencia a la compresión del mortero se utilizó la ecuación siguiente:

$$f_m = P/A \quad \text{(A-15)}$$

Dónde  $f_m$  es la resistencia a la compresión (MPa),  $P$  es la carga máxima total (N), y  $A$  es el área de la superficie cargada ( $\text{mm}^2$ ).

#### ASTM C187. Cantidad de agua requerida para la consistencia normal de una pasta de cemento hidráulico

1. Se obtuvo la muestra de cemento de acuerdo con la práctica ASTM C183.
2. Se pesó el cemento a utilizar (650 g) y la cantidad de agua requerida por el ensayo (variable).
3. Se calibró el aparato de Vicat para que la marca del indicador móvil coincidiera con el cero de la marca superior de la escala, colocando el anillo cónico sobre el plato plástico y colocando la barra del aparato sobre uno de los extremos del anillo, presionando el tornillo del indicador móvil del aparato para mantener la marca de cero.
4. Se inició con la preparación de la pasta de cemento siguiendo el procedimiento descrito en la práctica ASTM C305. Se colocó la paleta y el tazón secos en la posición de mezclado en el mezclador.
5. Se procedió a colocar toda el agua de mezcla en el tazón.

6. Se colocó la muestra de cemento en el agua de mezcla y se dejó por 30 segundos en reposo para permitir la absorción del agua.
7. Seguidamente se mezcló a una velocidad baja de  $(140 \pm 5)$  rev/min durante 30 segundos.
8. Se detuvo el mezclado durante 15 segundos, tiempo en el cual se aprovechó para raspar la pasta seca adherida a las paredes del tazón.
9. Se volvió a mezclar a una velocidad media de  $(285 \pm 10)$  rev/min durante 60 segundos.
10. Seguidamente se moldeó la pasta de cemento en forma aproximada de bola con las manos enguantadas, para ello se lanzó la pasta de cemento seis veces a través de un espacio de aproximadamente 150 mm de una mano a otra hasta producir una masa esférica que fuese fácilmente insertada en el anillo de Vicat con una mínima cantidad de manipuleo adicional.
11. Se presionó la bola, apoyándola con la palma de una mano, en el lado más grande del anillo cónico (sostenido con la otra mano), hasta llenar completamente el anillo. Se removió el exceso de mortero en el lado más grande del anillo con un movimiento singular de la palma de la mano.
12. Se colocó el anillo sobre su lado más grande hacia la base del plato y se eliminó el exceso de pasta del lado más pequeño del anillo enrasando con una pasada de la paleta plana, con el cuidado de no comprimir la pasta.
13. Se procedió a centrar la pasta confinada en el anillo. Se colocó el anillo con la pasta y el plato sobre la base del aparato de Vicat y se colocó el embolo terminal de la aguja hasta hacer contacto con la superficie de la muestra.
14. Se volvió a ajustar a cero la marca superior de la escala.
15. Se soltó el tornillo lateral del aparato para liberar su barra y se registró la lectura del punto debajo de la superficie original, después de 30 segundos de haber sido liberada la barra. Se liberó la barra del aparato en un tiempo que no excediera los 30 segundos de haber completado la mezcla de la pasta.
16. Se realizaron varias pruebas variando los porcentajes de agua hasta obtener la consistencia normal, realizando cada prueba con cemento fresco. La consistencia normal se obtuvo cuando la aguja penetró  $(10 \pm 1)$  mm la muestra después de 30 segundos. Un ejemplo de lo anterior se presenta en la **Figura A.16**.



**Figura A.16** Consistencia normal en cemento ensayado

#### ASTM C188. Densidad del cemento hidráulico

1. Se obtuvo la muestra de cemento de acuerdo con la práctica ASTM C183.
2. Se llenó el frasco Le Chatelier con keroseno hasta un punto entre las marcas de 0.5 mL y 1 mL.
3. Se secó el interior del frasco sobre el nivel del keroseno.
4. Se pesó y registro la masa del frasco conteniendo el keroseno.
5. Se introdujo el frasco en un recipiente con agua hasta que no se presentasen variaciones significativas de temperatura.
6. Una vez que la temperatura permaneció estable, se retiró el frasco del recipiente con agua y se registró la primera lectura del nivel del keroseno (entre 0 mL y 1 mL), y la temperatura del agua.
7. Se introdujo aproximadamente 64 g de la muestra de cemento en pequeños incrementos por medio de un embudo al frasco. Se cuidó que el cemento no se adhiriera al cuello del frasco por encima del líquido ni que el embudo entrase en contacto con el líquido; evitando las salpicaduras.
8. Después de que todo el cemento fue introducido, se pesó y registro la masa del frasco conteniendo el keroseno y la muestra de cemento.
9. Se colocó el tapón del frasco y se rodó el frasco en una posición inclinada, hasta que todo el aire atrapado del cemento se liberase y no se apreciaran burbujas de aire en

la superficie del líquido. También se liberó el aire atrapado en las partículas del cemento girando el frasco en un círculo horizontal.

10. Se volvió a sumergir el frasco en el recipiente con agua, y se dejó en reposo hasta que la temperatura del agua no presentase una diferencia mayor a 0.2 °C de la temperatura inicial.
11. Se retiró el frasco del recipiente del recipiente con agua y se registró la lectura final del nivel del keroseno. El equipo utilizado para el ensayo de densidad del cemento se muestra en la **Figura A.17**.



**Figura A.17** Equipo empleado para ensayo de densidad del cemento

Se determinó la densidad del cemento según la ecuación siguiente:

$$\rho = (M_t - M_a)/V \quad \text{(A-16)}$$

Dónde  $\rho$  es la densidad del cemento ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $M_t$  es la masa del frasco conteniendo el líquido y el cemento (g),  $M_a$  es la masa del frasco con el líquido para la primera marca de graduación (g), y  $V$  es el volumen desplazado del líquido ( $\text{cm}^3$ ).

ASTM C191. Tiempo de fraguado del cemento hidráulico usando la aguja de Vicat.

1. Se obtuvo la muestra de cemento de acuerdo con la práctica ASTM C183.
2. Se pesó el cemento a utilizar (650 g) y la cantidad de agua requerida, conforme al porcentaje de agua de mezclado requerido para la consistencia normal según los resultados obtenidos del ensayo ASTM C187.
3. Se calibró el aparato de Vicat para que la marca del indicador movable coincidiera con el cero de la marca superior de la escala, colocando el anillo cónico sobre el plato

plástico y colocando la aguja del aparato sobre uno de los extremos del anillo, presionado el tornillo del indicador movable del aparato para mantener la marca de cero.

4. Se inició con la preparación de la pasta de cemento siguiendo el procedimiento descrito en la práctica ASTM C305. Se colocó la paleta y el tazón secos en la posición de mezclado en el mezclador.
5. Se procedió a colocar toda el agua de mezcla en el tazón.
6. Se colocó la muestra de cemento en el agua de mezcla y se dejó por 30 segundos en reposo para permitir la absorción del agua.
7. Seguidamente se mezcló a una velocidad baja de  $(140 \pm 5)$  rev/min durante 30 segundos.
8. Se detuvo el mezclado durante 15 segundos, tiempo en el cual se aprovechó para raspar la pasta seca adherida a las paredes del tazón.
9. Se volvió a mezclar a una velocidad media de  $(285 \pm 10)$  rev/min durante 60 segundos.
10. Seguidamente se moldeó la pasta de cemento en forma aproximada de bola con las manos enguantadas, para ello se lanzó la pasta de cemento seis veces a través de un espacio de aproximadamente 150 mm de una mano a otra hasta producir una masa esférica que fuese fácilmente insertada en el molde cónico.
11. Se tomó el anillo cónico en una mano y con la otra se presionó la bola hasta llenar completamente el anillo por su base mayor. Se removió el exceso de mortero en el lado más grande del anillo con un movimiento singular de la palma de la mano.
12. Se colocó el anillo sobre la base del plato por su base mayor y se eliminó el exceso de pasta del lado más pequeño del anillo enrasando con la paleta plana, teniendo cuidado de no comprimir la pasta.
13. Se le dió un acabado liso a la superficie de la muestra enrasando dos veces más con la paleta plana.
14. Inmediatamente después del moldeo se colocó el espécimen en el cuarto húmedo y se permitió el reposo del espécimen, el cual permaneció en el molde cónico sobre el plato plástico durante todo el período de ensayo.
15. Se permitió al espécimen permanecer en el cuarto húmedo por 1 hora después de ser moldeado sin sufrir alteraciones, luego se determinó la penetración de la aguja de 1



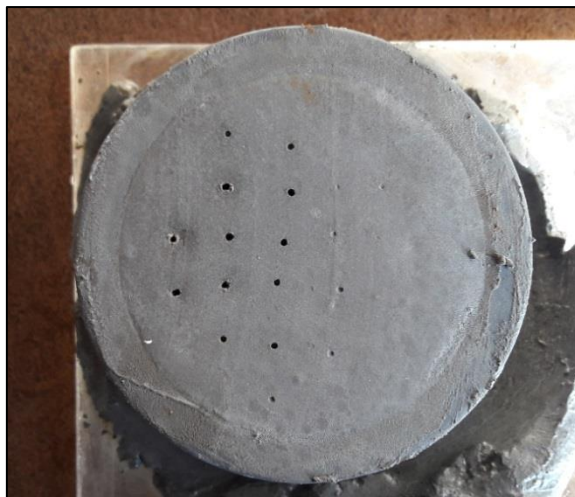
mm a ese tiempo y cada cierto lapso de tiempo considerado conveniente para la obtención de una penetración de 25 mm o menos (aproximadamente 15 minutos).

16. Para la lectura de la penetración, se bajó la aguja de la barra hasta que está descansará sobre la superficie de la pasta de cemento, se ajustaron los tornillos laterales del aparato de Vicat y se volvió a ajustar el indicador movable para que coincidiera con el cero de la marca superior de la escala. Se liberó la aguja rápidamente girando el tornillo lateral del aparato, se permitió a la aguja su asentamiento durante 30 segundos y se tomó la lectura que determinó la penetración. Cada penetración se realizó con una separación de al menos 5 mm de cualquier penetración previa y al menos 10 mm del lado interior del molde. El tiempo transcurrido entre el contacto inicial del cemento con el agua y la penetración de 25 mm es el tiempo de fraguado de Vicat inicial.
17. Si la pasta se mantenía suave, la caída de la barra se retardó para evitar el encorvamiento de la aguja de 1 mm, pero cuando la determinación del tiempo de fragua se realizó, la barra se liberó únicamente por el tornillo. Entre cada medición se limpió la aguja.
18. Se definió como tiempo de fragua final la primera medición cuando la aguja no dejó marca circular completa sobre la superficie de la pasta. Se verificó el tiempo de fragua final realizando dos penetraciones adicionales en áreas distintas de la superficie del espécimen, obteniendo las mediciones dentro de los 90 segundos de la primera medición de la fragua final (el tiempo transcurrido entre el contacto inicial del cemento con el agua, y la determinación del punto final descrito es el tiempo fragua final). En la **Figura A.18** se presenta el acabado final de una muestra ensayada una vez que esta alcanzó el tiempo de fragua final.

Para calcular el tiempo de fragua inicial se utilizó la ecuación siguiente:

$$T = \left( \frac{H-E}{C-D} \cdot (C - 25) \right) + E \quad \text{(A-17)}$$

Dónde  $E$  es el tiempo en minutos de la última penetración mayor a 25 mm (minutos),  $H$  es el tiempo en minutos de la primera penetración menor a 25 mm (minutos),  $C$  es la lectura de penetración en el tiempo  $E$  (mm), y  $D$  es la lectura de penetración en el tiempo  $H$  (mm).



**Figura A.18** Acabado en superficie de cemento ensayado que alcanzó la fragua final

ASTM C430. Finura del cemento hidráulico usando un tamiz de 45  $\mu\text{m}$  (No. 325)

1. Se obtuvo la muestra de cemento de acuerdo con la práctica ASTM C183.
2. Se colocó una muestra de 1.000 g del cemento sobre un tamiz No. 325 (45  $\mu\text{m}$ ) limpio y seco.
3. Se mojó la muestra completamente con un ligero flujo de agua.
4. Se ajustó la presión en el pulverizador a  $(69 \pm 4)$  kPa.
5. Se colocó el tamiz bajo el pulverizador y se lavó la muestra por 1 minuto, moviendo el tamiz en forma de círculo en un plano horizontal a velocidad de un movimiento por segundo de rociado.
6. Se verificó que la parte inferior del pulverizador se extendiera unos 12 mm bajo el borde superior del tamiz.
7. Se removió el tamiz del rociado, e inmediatamente después se lavó una sola vez con aproximadamente 50 mL de agua destilada, teniendo el cuidado de no perder algo del residuo y limpiando la superficie inferior con un paño húmedo.
8. Se secó el tamiz y el residuo en un horno (a 80 °C durante 1 hora).
9. Se enfrió el tamiz, luego se cepilló el residuo del tamiz y finalmente se pesó en una balanza analítica (capaz de reproducir resultados con una aproximación de 0.0005 g). En la **Figura A.19** se presenta el estado de las muestras antes y después de haber sido ensayadas.



**Figura A.19** Muestra de cemento antes (izquierda) y después (derecha) de ensayo de finura

Para calcular la finura del cemento se utilizó la ecuación siguiente:

$$F = 100 - R_s \quad \text{(A-18)}$$

Dónde  $F$  es la finura del cemento expresada como el porcentaje pasando el tamiz (No. 325) de 45 micrómetros (%), y  $R_s$  es el residuo de la masa retenida en el tamiz (No. 325) de 45 micrómetros (%).

#### Ensayo para la caracterización del cemento: pH del cemento

1. Empleando un cubilete (beaker), se recolectó una muestra de metanol de aproximadamente 100 mL.
2. Seguidamente se insertó en el cubilete una muestra de cemento de un tamaño suficiente para alcanzar una relación disolvente-cemento de 0.51. Se obtuvo la muestra de cemento de acuerdo con la práctica ASTM C183.
3. Se agitó la mezcla disolvente-cemento por un tiempo suficiente hasta que el color de la mezcla fuese homogéneo.
4. Posteriormente se calibró el pH-metro utilizando disoluciones de tampón nominales con valores de pH de 4, 7 y 10.
5. Se insertó un termómetro de mercurio en la base conteniendo el medidor del pH-metro.
6. Se colocó el cubilete conteniendo la muestra de cemento con metanol por debajo del medidor y el termómetro, y ajustando el brazo del pH-metro se introdujo en la

muestra el medidor y el termómetro. Un ejemplo de la medición del pH del cemento se muestra en la **Figura A.20**.



**Figura A.20** Medición pH de cemento ensayado

7. Se tomaron diferentes medidas de pH hasta que el valor de pH se estabilizara. Para esto se revisó que el indicador de pH del equipo indicara que la sustancia se encontraba estable, y que el valor de temperatura indicado por el pH-metro coincidiera con el valor de temperatura indicado por el termómetro de mercurio, haciendo incrementos adicionales de cemento en la muestra. Entre cada incremento de cemento en la muestra se volvió a agitar como se describió anteriormente.
8. Finalmente se registró como valor de pH del cemento ensayado aquel valor de pH que se mantuvo semi-constante hacia el final de la prueba (una variación no mayor de 0.03 en la indicación del pH-metro entre las últimas 4 lecturas).

### **Diseño de mezcla**

La metodología aplicada para el diseño de mezcla corresponde al procedimiento descrito en la ACI 211.1-91, 2002. Se realizó un diseño de mezcla para cada combinación de agregado, agregado fino de río con agregado grueso de río, y agregado fino de tajo con agregado grueso de tajo, respectivamente, como guía para determinar una proporción.

A continuación se presenta el procedimiento seguido, tomando como ejemplo de cálculo los resultados obtenidos de la caracterización del agregado de río. El detalle de las características

tomadas y las proporciones de los diseños de mezcla se muestran en el **Apéndice C**. Diseño de mezcla

#### Primer paso. Selección del revenimiento

Se determinó que para los cálculos siguientes se emplearía un revenimiento de 100 mm por dos motivos:

- Al definirse un revenimiento de  $(120 \pm 20)$  mm para el desarrollo del trabajo, un valor de 10 cm cumple con el límite inferior del rango dado para el trabajo.
- Tomando en cuenta el caso en que la mezcla no cumpliera con el revenimiento previsto, resultaría más sencillo adicionar agua a la mezcla hasta que cumpliera con el revenimiento; que descartar la mezcla debido a que el revenimiento fuese superior al indicado.

#### Segundo paso. Selección del tamaño máximo nominal del agregado grueso

Debido a que el material que se obtuvo para el desarrollo del trabajo correspondió a piedra con un tamaño máximo nominal de 16 mm, para el diseño de mezcla se determinó que lo más adecuado correspondía a interpolar entre los valores de un tamaño máximo nominal de 19 mm y 12.7 mm para las diferentes variables que se determinarían.

#### Tercer paso. Estimación del agua de mezcla y el contenido de aire

Posteriormente se calculó la cantidad de agua de mezclado y el contenido de aire. Así, para un tamaño máximo del agregado de 16 mm, un revenimiento de 100 mm y un concreto sin aire incluido se obtuvo lo siguiente:

$$\text{Cantidad de agua} = 200 - \frac{200 - 215}{19 - 12.5} (19 - 16) = 206.92 \text{ kg}$$

$$\text{Porcentaje de aire arrastrado} = 2 - \frac{2 - 2.5}{19 - 12.5} (19 - 16) = 2.23 \%$$

#### Cuarto paso. Selección de la relación agua – cemento

Se procedió a definir la relación agua – cemento, en función de la resistencia requerida por el concreto (24 MPa) y asumiendo un factor de seguridad de  $40 \text{ kg/cm}^2$  por realizarse el mezclado bajo condiciones controladas en laboratorio:

$$f'c \text{ planos} = 24 \text{ MPa} = 244 \text{ kg/cm}^2$$

$$F.S. = 40 \text{ kg/cm}^2$$

$$f'_{cr} = f'_{c \text{ planos}} + F.S. = 284 \text{ kg/cm}^2$$

$$a/c = 0.55 - \frac{0.55 - 0.62}{300 - 250} (300 - 284) = 0.57$$

Quinto paso. Calculo de la cantidad de cemento

Se calculó la cantidad de cemento requerido a partir de la cantidad de agua y la relación agua – cemento previamente determinadas en el tercer y cuarto pasos respectivamente.

A partir de los resultados obtenidos anteriormente:

$$\frac{a}{c} = 0.57 \rightarrow \text{Cantidad de cemento} = \frac{\text{Cantidad de agua}}{0.57}$$

$$\text{Cantidad de cemento} = \frac{206.92 \text{ kg}}{0.57} = 361.50 \text{ kg}$$

Sexto paso. Estimación del contenido del agregado grueso

Seguidamente se estimó el contenido de agregado grueso considerando, tal como lo especifica la ACI 211.1, el tamaño máximo nominal del agregado y el módulo de finura de la arena. De esta forma se obtuvo que:

$$V_{\text{masivo varillado de piedra}} = 0.6 - \frac{0.6 - 0.53}{19 - 12.5} (19 - 16) = 0.568 \text{ m}^3$$

$$\text{Cantidad de piedra} = V_{\text{masivo varillado de piedra}} \cdot \gamma_{\text{masivo varillado}}$$

$$\text{Cantidad de piedra} = 0.568 \text{ m}^3 \cdot 1557 \text{ kg/m}^3 = 883.90 \text{ kg}$$

$\gamma_{\text{masivo varillado}}$ : peso unitario varillado de piedra

Séptimo paso. Estimación del contenido de agregado fino

Se estimó la cantidad de agregado fino por diferencia, empleando el método del volumen absoluto descrito en la ACI 211.1. En este caso, el volumen total desplazado por los componentes conocidos (el agua, aire, cemento y agregado grueso) se restan del volumen unitario del concreto para obtener el volumen requerido de agregado fino.

Los volúmenes para los diferentes componentes del concreto son los que se muestran:

- Volúmenes de cada componente:

$$V_{\text{agua con agregado en SSS}} = \frac{206.92 \text{ kg}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0.207 \text{ m}^3$$

$$V_{s \text{ cemento}} = \frac{P_{\text{cemento}}}{G_s \cdot \gamma_{\text{agua}}} = \frac{361.50 \text{ kg}}{2.96 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3} = 0.122 \text{ m}^3$$

$$V_{aire\ arrastrado} = \frac{2.23\ \%}{100\ \%} \cdot 1\ m^3 = 0.022\ m^3$$

$$V_{B\ piedra} = \frac{P_{secopiedra}}{G_{BS} \cdot \gamma_{agua}} = \frac{883.90\ kg}{2.63 \cdot 1000\ kg/m^3} = 0.336\ m^3$$

- Volumen bruto de arena:

$$V_{Total} = V_{aire\ arrastrado} + V_{agua\ con\ agregado\ en\ SSS} + V_{s\ cemento} + V_{B\ piedra} + V_{B\ arena}$$

$$1\ m^3 = (0.022 + 0.207 + 0.122 + 0.336)\ m^3 + V_{B\ arena}$$

$$V_{B\ arena} = 0.313\ m^3$$

- Peso seco de arena:

$$Cantidad\ de\ arena = G_{BS} \cdot V_{B\ arena} \cdot \gamma_{agua}$$

$$Cantidad\ de\ arena = 2.49 \cdot 0.313\ m^3 \cdot 1000\ kg/m^3$$

$$Cantidad\ de\ arena = 778.27\ kg$$

#### Octavo paso. Ajuste por humedad de los agregados

Se ajustó el peso de los agregados así como el agua requerida para la mezcla por la humedad de los materiales, y con ello se obtuvo las proporciones por peso necesarias de cada uno de los materiales para un concreto bajo las condiciones particulares de uso. Nótese que los cálculos anteriores se desarrollan para la determinación de la cantidad de materiales necesaria para un metro cúbico de concreto.

Con un porcentaje de absorción de 4.0 % (resultado ensayo ASTM C128) y un porcentaje de humedad en sitio de 1.71 % (resultado ensayo ASTM C29) del agregado fino; así como un porcentaje de absorción de 1.8 % (resultado ensayo ASTM C127) y un porcentaje de humedad en sitio de 1.40 % (resultado ensayo ASTM C29) del agregado grueso, las proporciones por peso seco se presentan en el **Cuadro A.4**:

- Cantidad de agua libre

$$Agua\ aportada\ por\ piedra = 883.90\ kg \cdot \left( \frac{1.40 - 1.8}{100} \right) = -3.62\ kg$$

$$Agua\ aportada\ por\ arena = 778.27\ kg \cdot \left( \frac{1.71 - 4.0}{100} \right) = -17.67\ kg$$

$$Agua\ libre = -24.39\ kg$$

- Cantidad en masa, de agua y cada agregado:

$$Agua = 206.92\ kg - 21.29\ kg = 185.63\ kg$$

$$Arena = 778.27\ kg \cdot (1 + 0.0171) = 791.58\ kg$$

$$Piedra = 883.90 \text{ kg} \cdot (1 + 0.0140) = 896.27 \text{ kg}$$

**Cuadro A.4** Proporciones por peso seco (masa) de mezcla de concreto con agregado de río

	Sin corrección por humedad	Con corrección por humedad
Cemento (kg)	361.50	361.50
Agua (kg)	206.92 <sup>24</sup>	185.63 <sup>25</sup>
Arena (kg)	778.27	791.58
Piedra (kg)	883.90	896.27
<b>a/c</b>		
	<b>0.57</b>	<b>0.57</b>
<b>Proporción</b>		
	<b>1 : 2.15 : 2.45</b>	<b>1 : 2.19 : 2.48</b>

Noveno paso. Cálculo de cantidad de material requerido por batida

Finalmente se determinó la cantidad requerida de cada uno de los materiales a utilizar por batida tomando en consideración la cantidad de cilindros que se fabricaría por cada batida y que las cantidades obtenidas anteriormente correspondían a un metro cúbico de concreto.

Tomando en cuenta que por cada batida se fabricarían 32 cilindros de 150 mm x 300 mm, se debía fabricar un cilindro adicional de 100 mm x 200 mm para el ensayo ASTM C944 y un porcentaje de desperdicio del 15 %, las cantidades requeridas de material por batida se muestran en el Cuadro A.5:

- Determinación factor de corrección:

$$Volumen \text{ de cilindros de concreto} = 0.15 \cdot 0.3 = 0.0053 \text{ m}^3$$

$$Volumen \text{ muestras ensayo ASTM C944} = 0.08^3 = 0.0005 \text{ m}^3$$

$$Volumen \text{ de concreto requerido por batida} = 33 \cdot 0.0053 + 3 \cdot 0.0005 = 0.1765 \text{ m}^3$$

$$Volumen \text{ de concreto con dosificación base} = 1 \text{ m}^3$$

$$Factor \text{ de corrección} = \frac{0.1765 \text{ m}^3}{1 \text{ m}^3} = 0.18$$

- Determinación del material requerido por batida:

$$Material \text{ requerido} = Factor \text{ corrección} \cdot (1 + \% \text{ desperdicio}) \cdot Cantidad \text{ dosificación base}$$

$$Cemento = 0.18 \cdot (1 + 0.15) \cdot 361.50 \text{ kg} = 73.37 \text{ kg} \rightarrow \text{Ejemplo!!!}$$

<sup>24</sup> Agua de diseño

<sup>25</sup> Agua de dosificación



**Cuadro A.5** Cantidad de material requerido por batida de concreto con agregado de río

	Sin corrección por humedad	Con corrección por humedad
Cemento (kg)	73.37	73.37
Agua (kg)	42.00	37.68
Arena (kg)	157.95	160.66
Piedra (kg)	179.39	181.90

### **Ensayos de caracterización mezclas de concreto**

#### ASTM C192. Preparación y curado de especímenes de concreto para ensayo en laboratorio

1. Se prepararon los materiales respetando las cantidades determinadas en el diseño de mezcla. Se almacenó el cemento en cubetas con tapas, el agregado en sacos de tamaños iguales y el agua en cubetas. El material se tomó a temperatura ambiente, y el agregado fino se mantuvo en su condición de humedad de campo.
2. Se ubicaron los moldes (cilindros de 150 mm x 300 mm) que serían utilizados en un espacio cercano a la batidora, verificando que estuvieran limpios. Se aceitó la superficie interior de cada molde y se ajustaron las tuercas de los cilindros.
3. Se curó la mezcladora (batidora), introduciendo agregado fino y agua mientras esta se encontraba encendida. Al finalizar el curado se removió del tambor de la mezcladora el agregado fino y el agua, verificando que las aspas y la superficie interna de la batidora estuviesen humedecidas.
4. Al comprobarse que la batidora había sido curada, se colocó en la mezcladora el agregado grueso y parte del agua de mezclado con la batidora apagada.
5. Se encendió la batidora y se colocó el agregado fino. Después de mezclar los agregados, se adicionó el cemento y se agregó el resto del agua. Se mezcló el concreto por 3 minutos, después de que todos los materiales estuviesen en la mezcladora.
6. Se dejó reposar la mezcla durante 3 minutos.
7. Se volvió a mezclar por 2 minutos.
8. Posteriormente se realizó la prueba de revenimiento de acuerdo al método de ensayo ASTM C143, para verificar que se adecuaba a las condiciones de consistencia deseada. Una vez corroborado el cumplimiento del asentamiento del concreto con lo

estipulado ( $120 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ ), se procedió a moldear los cilindros. En algunos casos fue necesario adicionar agua hasta llegar al asentamiento indicado, una vez que se adicionó el agua, se mezcló por 3 minutos y se realizó nuevamente la prueba de revenimiento, repitiendo la operación hasta que el asentamiento del concreto fuese de ( $120 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ ). El concreto utilizado para la prueba de revenimiento se retornaba a la batea de mezclado y se re-mezclaba.

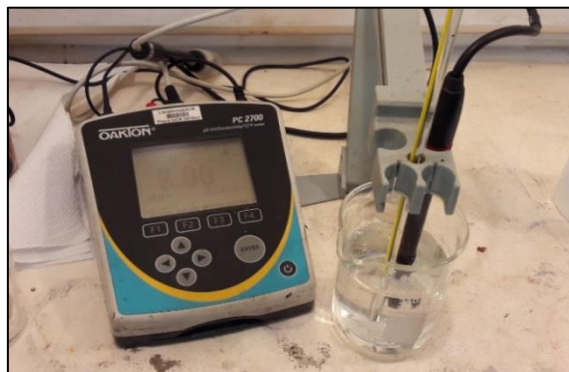
9. Para el moldeo de los cilindros se obtuvo el concreto directamente de la batidora empleando una cuchara de albañil, de acuerdo al procedimiento aplicable de la práctica ASTM C172. Durante el moldeo de los especímenes se re-mezcló el concreto para prevenir la segregación y endurecimiento de la mezcla.
10. Se colocó el concreto en cada molde en tres capas de aproximadamente igual volumen, moviendo la cuchara de albañil alrededor del borde superior para asegurar una distribución simétrica del concreto. Para cada capa se apisonó con 25 golpes de varilla distribuidos uniformemente, utilizando el extremo redondeado de la varilla, apisonando la capa del fondo en la totalidad de su profundidad sin golpear el fondo del recipiente, donde para las capas superiores se penetró aproximadamente 25 mm a la capa inferior. Después de apisonar cada capa, se golpeó suavemente los lados del recipiente 12 veces con un mazo de hule.
11. Se enrasó cada cilindro rodando la varilla compactadora sobre su superficie para remover el exceso de concreto, y se le dió un acabado liso utilizando una llaneta.
12. Se cubrieron los moldes con una bolsa plástica no reactiva, impermeable y durable, sellando las bolsas con una liga elástica. En la **Figura A.21** se muestra un ejemplo de lo anterior.
13. Se retiraron los especímenes de los moldes  $24 \text{ h} \pm 8 \text{ h}$  después de haber sido moldeados. Durante el tiempo que se dejaron endurecer los especímenes estos no se movilizaron del lugar donde fueron moldeados.
14. Finalmente se marcaron los cilindros y se ingresaron en el cuarto húmedo.



**Figura A.21** Ejemplo de cilindros de concreto cubiertos después de moldeo para una mezcla de concreto elaborada

Ensayo caracterización agua de mezcla: pH del agua

1. Empleando un cubilete (beaker), se recolectó una muestra del agua (retenida en cubetas) a emplearse para la elaboración de la mezcla de concreto respectiva.
2. Posteriormente se calibró el pH-metro utilizando disoluciones de tampón nominales con valores de pH de 4, 7 y 10.
3. Se insertó un termómetro de mercurio en la base conteniendo el medidor del pH-metro.
4. Se colocó el cubilete conteniendo la muestra de agua por debajo del medidor y el termómetro, y ajustando el brazo del pH-metro se introdujo en la muestra el medidor y el termómetro. En la **Figura A.22** se presenta un ejemplo de la medición del pH del agua utilizada para una mezcla de concreto.



**Figura A.22** Medición pH del agua

5. Se tomaron diferentes medidas de pH hasta que el valor de pH se estabilizara. Para esto se revisó que el indicador de pH del equipo indicara que la sustancia se encontraba estable y que el valor de temperatura indicado por el pH-metro coincidiera con el valor de temperatura indicado por el termómetro de mercurio.
6. Finalmente se registró como valor de pH del agua ensayada aquel valor de pH que se mantuvo semi-constante hacia el final de la prueba (una variación no mayor de 0.03 en la indicación del pH-metro entre las últimas 4 lecturas).

#### ASTM C172. Muestreo de concreto recién mezclado

Muestreo de un mezclador estacionario:

1. Se recolectaron, transportaron y mezclaron las porciones de la muestra compuesta de concreto con una cuchara (para asegurar su uniformidad), procurando que el tiempo entre la obtención de la primera y última porción de la muestra no excediera los 15 minutos.
2. Se obtuvo la muestra de concreto de varios intervalos de espacios durante la mitad de la descarga del concreto, procurando no obtener dichas porciones de la muestra compuesta de la primera y última descarga (después del 10 % y antes del 90 % de la descarga del concreto). El tamaño de la muestra compuesta se adecuó al ensayo a realizar.
3. Se iniciaron las pruebas de revenimiento, densidad, temperatura y contenido de aire dentro de los 5 minutos siguientes a la obtención de la última porción de la muestra compuesta. Además se inició el moldeo de cilindros dentro de los 15 minutos siguientes a la fabricación de la muestra compuesta. Para los ensayos mencionados se procuró proteger la muestra de causantes de su rápida evaporación y de contaminación (sol, aire y otros).

#### ASTM C138. Densidad (peso unitario), revenimiento y contenido de aire (gravimétrico), del concreto

1. Previo al inicio del ensayo se determinó el volumen del recipiente de acuerdo al método aplicable de la prueba ASTM C29 para este propósito.
2. Para la determinación del volumen del recipiente primeramente se tomó las medidas del peso del plato del vidrio y del recipiente limpio y vacío. Posteriormente se cubrió

con una ligera capa de grasa el borde del recipiente, se llenó el mismo con agua a temperatura ambiente y se cubrió empleando el plato de vidrio, procurando eliminar burbujas y el exceso de agua, así como cualquier cantidad de agua que se hubiese adherido al plato de vidrio.

3. Continuando con la determinación del volumen del recipiente, se tomó la medida del peso del recipiente con el plato de vidrio y el agua, se midió la temperatura del agua con la cual se determinó la densidad del agua; y finalmente se determinó el volumen del recipiente.
4. Se humedeció ligeramente todo el equipo que se empleó en el ensayo.
5. Se colocó el recipiente en una superficie plana, nivelada y firme.
6. Se obtuvo la muestra de concreto fresco de acuerdo con la práctica ASTM C172. A la hora de colocar el concreto en el recipiente, se movió la cuchara alrededor del perímetro de la abertura del recipiente (para asegurar una distribución pareja del concreto).
7. Se colocó el concreto en el recipiente en tres capas de aproximadamente igual volumen<sup>26</sup>. Para cada capa se apisonó con 25 golpes de varilla distribuidos uniformemente, apisonando la capa del fondo en la totalidad de su profundidad sin golpear el fondo del recipiente, donde para las capas superiores se penetró aproximadamente 25 mm a la capa inferior. Después de apisonar cada capa, se golpeó suavemente los lados del recipiente 12 veces con un mazo.
8. Se verificó que al completarse la consolidación del concreto se lograra apreciar un exceso de concreto de aproximadamente 3 mm por encima del borde del recipiente.
9. Se removió el exceso de concreto utilizando una placa de perfil-lado (placa de rasado), para lo cual se presionó la placa sobre la superficie del recipiente cubriendo dos terceras partes de la superficie y retirando la placa con un movimiento de serrucho del área cubierta, posteriormente se volvió a colocar la placa sobre los dos tercios originales de la superficie y se avanzó con la presión vertical y el movimiento de serrucho sobre toda la superficie hasta que deslizará por completo de la superficie del recipiente.
10. Se pasó varias veces la placa inclinada sobre el borde del recipiente para darle un acabado liso a la muestra.

---

<sup>26</sup> Se añadió la última capa evitando sobrellenar el recipiente.

11. Se limpió todo el exceso de concreto del recipiente y finalmente se determinó la masa del recipiente con el concreto. En la **Figura A.23** se presenta un ejemplo de una muestra lista antes de ser pesada.



**Figura A.23** Ejemplo de espécimen acabado en ensayo de densidad del concreto fresco

Para calcular el volumen del recipiente se utilizó la ecuación siguiente:

$$V = (W - M)/D \quad \text{(A-19)}$$

Dónde  $V$  es el volumen del recipiente ( $m^3$ ),  $W$  es la masa del agua, el plato de vidrio y el recipiente (kg),  $M$  es la masa del plato de vidrio y el recipiente (kg), y  $D$  es la densidad del agua para la temperatura medida al realizar el ensayo ( $kg/m^3$ ).

Para calcular la densidad del concreto fresco se utilizó la ecuación siguiente:

$$D = (M_c - M_m)/V_m \quad \text{(A-20)}$$

Dónde  $D$  es la densidad del concreto fresco ( $kg/m^3$ ),  $M_c$  es la masa del recipiente lleno con concreto (kg),  $M_m$  es la masa del recipiente (kg), y  $V_m$  es el volumen del recipiente ( $m^3$ ).

#### ASTM C143. Asentamiento de concreto de cemento hidráulico

1. Se humedeció el molde (cono) y se colocó junto con la placa sobre una superficie plana, húmeda y no absorbente, libre de vibración.
2. De pie sobre las dos pestañas del molde, este se sostuvo firmemente durante su llenado. Se obtuvo la muestra de acuerdo a la práctica ASTM C172, llenando el molde

en tres capas, cada una de aproximadamente un tercio del volumen del molde. Al colocar el concreto en el molde, se movió la cuchara alrededor del perímetro de la abertura del recipiente (para asegurar una distribución pareja del concreto con el mínimo de segregación).

3. Se apisonó cada capa 25 veces uniformemente con el borde redondeado de la varilla sobre el área transversal, apisonando la capa inferior en todo su espesor, donde para las capas superiores se apisonó penetrando ligeramente la capa inferior (aproximadamente 25 mm). Adicionalmente para la capa inferior se tuvo el cuidado de apisonar inclinando la varilla ligeramente y realizando la mitad de los golpes cerca del perímetro avanzado en forma de espiral hacia el centro; en tanto que para la capa superior se acumuló concreto sobre el molde antes de iniciar el apisonado, añadiendo concreto conforme este se asentaba bajo el borde del molde.
4. Se alisó la superficie de concreto rodando la varilla sobre el borde del molde, eliminando el exceso de concreto sobre el borde del molde.
5. Se limpió el exceso de concreto en la base del molde, manteniendo firmemente sostenido el molde.
6. Inmediatamente después se procedió a elevar el molde en un tiempo aproximado de 5 segundos (movimiento uniforme hacia arriba y sin movimiento lateral).
7. Se verificó que el ensayo completo desde el inicio del llenado hasta la remoción del molde se realizará en un lapso de tiempo de 2.5 minutos.
8. Se midió el revenimiento, posicionado el molde en forma invertida en un borde de la placa conteniendo la muestra de concreto ensayada, apoyando la varilla sobre el molde invertido y leyendo la diferencia vertical entre el borde del molde y el centro original desplazado de la cara superior del espécimen con una cinta métrica.
9. Finalmente se registró el asentamiento del espécimen. Un ejemplo de lo anterior se presenta en la **Figura A.24**.



**Figura A.24** Ejemplo de prueba de revenimiento para una mezcla de concreto elaborada

ASTM C231. Contenido de aire del concreto recién mezclado mediante el método por presión

1. Se humedeció ligeramente todo el equipo que se utilizó en el ensayo.
2. Se colocó el recipiente en una superficie plana, nivelada y firme.
3. Se obtuvo la muestra de concreto fresco de acuerdo con la práctica ASTM C172. A la hora de colocar el concreto en el recipiente, se movió la cuchara alrededor del perímetro de la abertura del recipiente (para asegurar una distribución pareja del concreto).
4. Se colocó el concreto en el recipiente en tres capas de aproximadamente igual volumen<sup>27</sup>. Para cada capa se apisonó con 25 golpes de varilla distribuidos uniformemente, apisonando la capa del fondo en la totalidad de su profundidad sin golpear el fondo del recipiente, donde para las capas superiores se penetró aproximadamente 25 mm a la capa inferior. Después de apisonar cada capa, se golpeó suavemente los lados del recipiente 12 veces con un mazo.
5. Se verificó que al completarse la consolidación del concreto se lograra apreciar un exceso de concreto de aproximadamente 3 mm por encima del borde del recipiente.
6. Se removió el exceso de concreto utilizando una placa de perfil-lado (placa de rasado), para lo cual se presionó la placa sobre la superficie del recipiente cubriendo dos terceras partes de la superficie y retirando la placa con un movimiento de serrucho del área cubierta, posteriormente se volvió a colocar la placa sobre los dos tercios originales de la superficie y se avanzó con la presión vertical y el movimiento de serrucho sobre toda la superficie hasta que deslizará por completo de la superficie del recipiente.

---

<sup>27</sup> Se añadió la última capa evitando sobrellenar el recipiente.



7. Se pasó varias veces la placa inclinada sobre el borde del recipiente para darle un acabado liso a la muestra.
8. Se limpiaron totalmente las pestañas y bordes del recipiente y de la cubierta de ensamble, removiendo el exceso de concreto presente.
9. Se ensambló el aparato, cerrando la válvula principal y procurando tener abiertas las válvulas de paso situadas en la tapa.
10. Se inyectó agua con una jeringa de látex, a través de una de las válvulas hasta que el agua surgiera en la válvula opuesta.
11. Se sacudió el medidor suavemente hasta que todo el aire saliera por la misma llave de purga.
12. Se cerraron ambas válvulas de paso colocadas en la cubierta.
13. Se cerró la válvula de purga de aire de la cámara de aire y se bombeó aire en la cámara hasta que la aguja del medidor de presión estuviese en línea con la presión inicial<sup>28</sup>. Se estabilizó la aguja del medidor de presión en la línea de presión inicial golpeando ligeramente el medidor de presión con un dedo, y dejando pasar unos segundos para que el aire comprimido se enfriase a temperatura normal.
14. Se abrió la válvula principal de aire entre la cámara de aire y el recipiente de presión.
15. Se leyó el porcentaje de aire de la carátula del indicador de presión. En la **Figura A.25** se muestra un ejemplo de la medición del contenido de aire.
16. Finalmente se liberó la presión abriendo la válvula de aire principal y las llaves de paso antes de quitar la tapa.

---

<sup>28</sup> Se debía calibrar la presión a -3 % ya que el equipo empleado presentaban un error de lectura notificado por los encargados del equipo en cuestión (Factor de corrección agregado).



**Figura A.25** Ejemplo medición del contenido de aire para una mezcla de concreto elaborada

ASTM C1064. Determinación de la temperatura del concreto de cemento hidráulico recién mezclado

1. Se colocó el dispositivo de medidor de temperatura en la mezcla de concreto fresco de modo que la porción del sensor de temperatura estuviese sumergido al menos 75 mm. La temperatura fue medida dentro de la mezcladora estacionaria (batidora de concreto).
2. Se presionó suavemente el concreto superficial alrededor del dispositivo, de modo tal que la temperatura ambiental no afectase la lectura.
3. Se dejó el dispositivo medidor de la temperatura en la mezcla de concreto fresco por un período de 2 minutos hasta que la temperatura se estabilizó.
4. Finalmente se registró la temperatura del concreto fresco, verificando que la medición se hubiese hecho dentro de los 5 minutos después de obtener la muestra (detener la batidora). En la **Figura A.26** se presenta un ejemplo de lo anterior.



**Figura A.26** Ejemplo de medición de temperatura para mezcla de concreto elaborada

### Ensayo de preparación de superficie (refrentado) de las muestras: por pulido de cilindros

1. Antes de usar, se inspeccionó la máquina y los cables en búsqueda de daños o desgaste excesivo. Asimismo se vació el tanque de agua, y se reemplazó el agua con depósitos con agua limpia. En la **Figura A.27** se presenta la máquina pulidora de cilindros utilizada en el desarrollo del proyecto.



**Figura A.27** Máquina pulidora de cilindros utilizada en el desarrollo del proyecto

2. Se encendió la máquina, luego se abrió la tapa, se deslizó el primer cilindro y se aseguró el cilindro en su posición usando el perno del cojinete. Para encender la máquina, se haló el interruptor de parada de emergencia y se presionó el botón verde, que encendía la luz verde.
3. Al instalar los cilindros en la máquina, se deslizó una muestra en la estación superior (anillo superior) y se colocó en contacto con el tope. Se colocó en posición con el cojinete usando una llave de 7/8". Se apretó la muestra con el perno de leva hexagonal.
4. Se giró el carrusel y se cargaron los cilindros restantes. Se tuvo cuidado con la manipulación del carrusel, ya que al momento de encontrarse el peso en su parte superior, este tendía a inclinarse hacia abajo.
5. Se cerró la tapa y se aseguró en su lugar.
6. Se presionó el botón de inicio (botón amarillo) para comenzar el proceso de rectificando. La bomba de agua se activó cuando los motores de la máquina comenzaron a trabajar.

7. Se esperó hasta que la máquina terminase el proceso de rectificado (la máquina se detenía automáticamente cuando se completaba el ciclo). El ciclo se completó cuando la luz amarilla se apagó y la rueda de diamante había vuelto a su posición inicial. Posteriormente se desactivó la bomba de agua.
8. Se abrió la tapa y se removieron los cilindros. Se limpió la máquina después de cada turno.
9. Se volvió a cargar el carrusel con los nuevos cilindros y se reinició el proceso hasta tener pulidos la totalidad de cilindros a ensayar. Por seguridad, se verificó que la luz amarilla estuviese apagada antes de colocar otro cilindro para pulir.

ASTM C1231. Uso de tapas no adheridas como método de refrentado de las muestras (almohadillas de neopreno)

Se examinó ambos lados de las almohadillas, reemplazando las almohadillas que presentaron grietas o roturas en cualquiera de sus superficies. Asimismo se definió que el máximo número de re-usos que se le podía dar a cada almohadilla de neopreno empleada era de 100, por tratarse de cilindros de concreto con una resistencia entre 28 MPa y 50 MPa.

1. Se insertó la almohadilla en el retenedor antes de colocarlo en el cilindro a ensayarse. Un ejemplo de las almohadillas utilizadas para determinar la resistencia del concreto y un retenedor se presenta en la **Figura A.28**.



**Figura A.28** Ejemplo de retenedor y almohadilla de neopreno utilizados

2. Se centró la tapa en el cilindro y se colocó el cilindro sobre el bloque de carga inferior de la máquina de ensayo a la compresión.

- Finalmente se completó la prueba, aplicación de la carga y verificación de perpendicularidad, y se calculó e informó los resultados de acuerdo a la práctica ASTM C39.

ASTM C39. Resistencia a la compresión de especímenes de concretos cilíndricos

- Las pruebas de resistencia a la compresión en especímenes curados en cámara húmeda se realizaron tan pronto se extrajeron de la cámara húmeda los cilindros. Como medida adicional se taparon los cilindros con un paño humedecido o se rociaban con agua, procurando que se mantuviesen húmedos hasta el momento de la falla.
- Todos los especímenes para una determinada edad de falla fueron ensayados dentro de las tolerancias de tiempo mostradas en el Cuadro A.6. Las edades de falla se definieron a partir del moldeo de los cilindros.

**Cuadro A.6** Tolerancia permisible por edad de falla en especímenes cilíndricos de concreto

Edad de falla	Tolerancia permisible
3 días	± 2 h o 2.8 %
7 días	± 6 h o 3.6 %
14 días	± 6 h o 3.6 %
28 días	± 20 h o 3.0 %
56 días	± 20 h o 3.0 %

**Fuente:** ASTM C39, 2017

- Antes de ensayarse los especímenes se verificó que cumplieran con los requisitos de alineamiento y paralelismo, por lo que se empleó una escuadra para determinar que los cilindros no se apartaban en un ángulo mayor a los 0.5° del eje vertical, así como una galga y una regla de planicidad para determinar que las caras de los especímenes fuesen planas dentro de 0.050 mm. Cuando los cilindros no cumplieron con estos requisitos, se aserraron o pulieron para cumplir con las especificaciones.
- Previo al ensayo de los cilindros, se les determinó la masa, la altura y el diámetro, haciendo tres medidas en diferentes locaciones de los especímenes tanto para la altura y el diámetro.

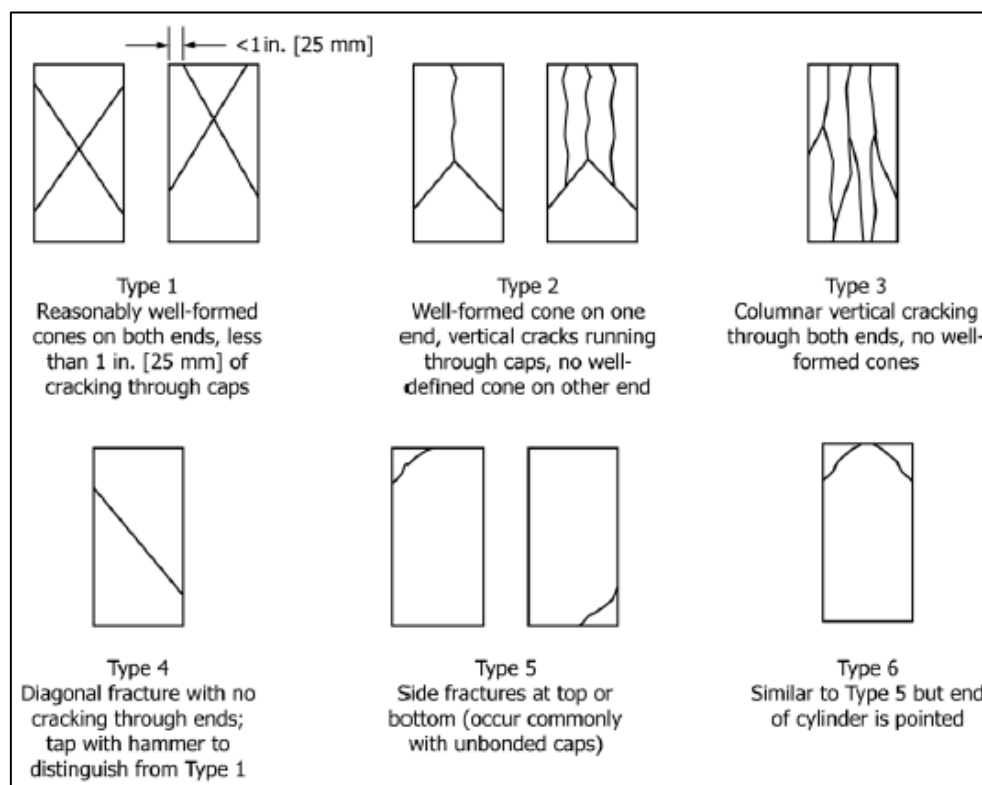
5. Se colocó el cabezal en la máquina de ensayo a la compresión según el refrentado de los cilindros, empleando un cabezal de menor tamaño cuando se utilizaron almohadillas de neopreno y un cabezal de mayor magnitud para los casos en que se usó el pulido.
6. Cuando se requirió, se limpiaron las caras de la platina (mesa) de la máquina de ensayo a la compresión y el cabezal, así como de la almohadilla de neopreno y el bloque de cojinete, antes de ser ensayados cada uno de los cilindros fabricados.
7. Para los casos en que se emplearon almohadillas de neopreno, se colocó en la cara superior endurecida del cilindro el bloque de cojinetes junto con la almohadilla de neopreno antes de alinearse el espécimen en la máquina de ensayo a la compresión.
8. Se colocó el espécimen cilíndrico de concreto sobre la platina de la máquina de ensayo a la compresión y se alineó el eje del espécimen cilíndrico con el centro de empuje de la platina y el cabezal. Un ejemplo de lo anterior se presenta en la **Figura A.29**.



**Figura A.29** Ejemplo de alineación de cilindro de concreto en máquina de ensayo a la compresión

9. Antes de aplicar la carga al espécimen se verificó que el indicador de carga estuviera establecido en cero, en caso contrario se procedió con el ajuste del indicador. Asimismo se inclinaba la porción móvil del cabezal para que la cara en contacto con el espécimen se mostrara alineada con la superficie superior del cilindro de concreto.

10. Se aplicó la carga de manera continua y sin golpes. La carga se aplicó a una tasa de esfuerzo en el cilindro de  $(0.25 \pm 0.05)$  MPa/s, procurando no realizar ajuste alguno conforme la carga última se iba alcanzando.
11. Se aplicó la carga de compresión hasta que el indicador de carga mostró que la carga comenzó a disminuir constantemente y el espécimen mostró un patrón de fractura bien definido (Tipos 1 a 4 de la **Figura A.30**).
12. Finalmente se registró la carga máxima soportada por el espécimen durante la prueba y el tipo de fractura según el patrón de fractura mostrado en la **Figura A.30**.



**Figura A.30** Esquema de patrones típicos de fractura en cilindros de concreto  
**Fuente:** ASTM C39, 2017

Para el cálculo de la resistencia a la compresión de los especímenes de concreto se utilizó la ecuación siguiente:

$$f_{cm} = \frac{4000P_{max}}{\pi D^2} \quad \text{(A-21)}$$

Dónde  $f_{cm}$  es la resistencia a la compresión (MPa),  $P_{max}$  es la carga máxima (kN), y  $D$  es el diámetro promedio medido (mm).

Para el cálculo de la densidad del concreto endurecido ( $\text{kg/m}^3$ ) se utilizó la ecuación siguiente:

$$\text{Densidad} = \frac{W}{V} \quad (\text{A-22})$$

Dónde  $W$  es la masa del espécimen (kg), y  $V$  es el volumen del espécimen determinado a partir del diámetro y altura promedio medidos ( $\text{m}^3$ ).

#### ASTM C42. Obtención y ensayo de núcleos perforados y vigas aserradas de concreto

1. Como parte del trabajo contempló la realización del ensayo ASTM C944 sobre resistencia a la abrasión del concreto por el método de corte rotativo, cuando se fabricaron los cilindros de concreto para determinar su resistencia a la compresión, también se elaboró un cilindro adicional de 100 mm x 200 mm por cada mezcla de concreto.
2. Se extrajo de la cámara húmeda el cilindro del cual se tomaron las muestras, teniendo como requisito el haber cumplido con al menos 14 días de haber sido elaborado (moldeado).
3. Primeramente se marcó sobre la sección longitudinal del cilindro las guías con las cuales se recortaría las muestras de concreto (muestras de aproximadamente 30 mm). Debido a que las muestras se trataron de adecuar al tamaño requerido para el ensayo ASTM C944, no se siguió la relación entre la longitud-diámetro de 1.0 indicado en el ensayo ASTM C42.
4. Se aseguró el cilindro sobre la sierra estacionaria. La sierra estacionaria que se utilizó se muestra en la **Figura A.31**.





**Figura A.31** Sierra estacionaria utilizada en el desarrollo del proyecto

5. Se aserró el cilindro por las marcas, haciéndose pasar una corriente de agua (minimizándose la duración de exposición al agua durante la preparación del espécimen).
6. Al obtenerse la muestra se verificó que el espécimen no presentase algún agrietamiento, rayado o daño significativo, así como que los extremos del espécimen fuesen planos y perpendiculares al eje longitudinal.
7. Se repitió la operación anterior hasta obtener el número de muestras necesarias.
8. Finalmente se dejaron las muestras secar para ser ensayadas.

ASTM C944. Resistencia a la abrasión en superficies de concreto por el método de corte rotativo

1. Se tomaron las muestras como núcleos de cilindros de 100 mm x 200 mm de las mezclas elaboradas, de acuerdo con el método de ensayo ASTM C42.
2. Utilizando una sierra estacionaria, se acondicionaron las muestras para que tuvieran un tamaño y forma adecuados para ser acomodados en el depósito de abrasión de la máquina (pastillas de aproximadamente 30 mm de espesor con dos extremos afilados).
3. Se determinó la masa del espécimen.
4. Se sujetó el espécimen en el dispositivo de abrasión, de manera tal que la superficie a ser ensayada fuese normal al eje.
5. Se verificó que el dispositivo de corte rotativo se encontrase montado en el aparato de abrasión.

6. Se arrancó el motor y se bajó el cortador lentamente, hasta que estuviera justo en contacto con la superficie del espécimen.
7. Se continuó con la abrasión con carga normal (98 N) sobre el espécimen por 2 minutos después del contacto entre el cortador y la superficie. En la **Figura A.32** se presenta un ejemplo del ensayo en ejecución.
8. Al finalizar el periodo, se removió el espécimen del dispositivo y se limpió usando una brocha suave.
9. Finalmente se determinó la masa del espécimen.



**Figura A.32** Ejemplo de ensayo en ejecución de corte rotativo en espécimen de concreto

## Apéndice B. Resultados experimentales

### Ensayos agregado fino de río

#### Granulometría

Datos de laboratorio		Dato	No. Muestra		Preliminar
Fecha		23/08/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		518.4
Temperatura ambiente (°C)		24.9	Masa antes del lavado (g)		504.6
Humedad relativa (%)		66.7	Masa después del lavado (g)		491.2
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
4	4.75	4.4	0.9	0.9	99.1
8	2.36	62.6	12.4	13.3	86.7
16	1.18	125.6	24.9	38.2	61.8
30	0.6	133.5	26.4	64.6	35.4
50	0.3	106.1	21.0	85.6	14.4
100	0.15	35.3	7.0	92.6	7.4
200	0.075	23.2	4.6	97.2	2.8
Charola	N/A	14.1	2.8	100.0	0.0
Masa total		504.8	<b>Módulo de finura</b>		2.95
Diferencia con masa inicial (g)		0.2	<b>% Pasando malla N° 200</b>		2.7
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.04			

## Agregado fino de río (cont.)

### Granulometría

Datos de laboratorio		Dato	No. Muestra		1
Fecha		25/08/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-052	Masa inicial (g)		605.2
Temperatura ambiente (°C)		23.6	Masa antes del lavado (g)		591.8
Humedad relativa (%)		64.3	Masa después del lavado (g)		583.0
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
4	4.75	4.6	0.8	0.8	99.2
8	2.36	93.5	15.8	16.6	83.4
16	1.18	156.2	26.4	43.1	56.9
30	0.6	149.7	25.3	68.4	31.6
50	0.3	116.7	19.8	88.2	11.8
100	0.15	32.9	5.6	93.7	6.3
200	0.075	27.6	4.7	98.4	1.6
Charola	N/A	9.4	1.6	100.0	0.0
Masa total		590.6	<b>Módulo de finura</b>		3.11
Diferencia con masa inicial (g)		1.2	<b>% Pasando malla N° 200</b>		1.5
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.21			

## Agregado fino de río (cont.)

### Granulometría

<b>Datos de laboratorio</b>		<b>Dato</b>	<b>No. Muestra</b>		2
Fecha		25/08/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		646.5
Temperatura ambiente (°C)		23.6	Masa antes del lavado (g)		632.1
Humedad relativa (%)		64.3	Masa después del lavado (g)		615.8
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
4	4.75	7.9	1.3	1.3	98.7
8	2.36	83.9	13.3	14.6	85.4
16	1.18	162.3	25.7	40.3	59.7
30	0.6	164.7	26.1	66.4	33.6
50	0.3	127.8	20.3	86.7	13.3
100	0.15	40.7	6.5	93.1	6.9
200	0.075	25.3	4.0	97.1	2.9
Charola	N/A	18.2	2.9	100.0	0.0
Masa total		630.8	<b>Módulo de finura</b>		3.02
Diferencia con masa inicial (g)		1.3	<b>% Pasando malla N° 200</b>		2.6
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.21			

## Agregado fino de río (cont.)

### Granulometría

Datos de laboratorio		Dato	No. Muestra		3
Fecha		25/08/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-052	Masa inicial (g)		675.4
Temperatura ambiente (°C)		23.6	Masa antes del lavado (g)		660.8
Humedad relativa (%)		64.3	Masa después del lavado (g)		651.3
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
4	4.75	5.6	0.8	0.8	99.2
8	2.36	85.3	12.9	13.8	86.2
16	1.18	142.8	21.7	35.5	64.5
30	0.6	161.8	24.5	60.0	40.0
50	0.3	153.1	23.2	83.2	16.8
100	0.15	57.3	8.7	91.9	8.1
200	0.075	34	5.2	97.1	2.9
Charola	N/A	19.3	2.9	100.0	0.0
Masa total		504.8	<b>Módulo de finura</b>		2.85
Diferencia con masa inicial (g)		0.2	<b>% Pasando malla N° 200</b>		1.4
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.04			

## Agregado fino de río (cont.)

### Granulometría

<b>Datos de laboratorio</b>		<b>Dato</b>	<b>No. Muestra</b>		4
Fecha		25/08/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		561.1
Temperatura ambiente (°C)		23.6	Masa antes del lavado (g)		549.0
Humedad relativa (%)		64.3	Masa después del lavado (g)		535.7
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
4	4.75	8.4	1.5	1.5	98.5
8	2.36	82.3	15.0	16.5	83.5
16	1.18	143.4	26.2	42.7	57.3
30	0.6	134.2	24.5	67.2	32.8
50	0.3	104.3	19.0	86.2	13.8
100	0.15	37	6.7	92.9	7.1
200	0.075	23.4	4.3	97.2	2.8
Charola	N/A	15.3	2.8	100.0	0.0
Masa total		548.3	<b>Módulo de finura</b>		3.07
Diferencia con masa inicial (g)		0.7	<b>% Pasando malla N° 200</b>		2.4
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.13			

## Agregado fino de río (cont.)

### Granulometría

<b>Datos de laboratorio</b>		<b>Dato</b>	<b>No. Muestra</b>		5
Fecha		25/08/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		621.6
Temperatura ambiente (°C)		23.6	Masa antes del lavado (g)		607.4
Humedad relativa (%)		64.3	Masa después del lavado (g)		591.3
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
4	4.75	6.1	1.0	1.0	99.0
8	2.36	67.4	11.1	12.1	87.9
16	1.18	137.6	22.7	34.8	65.2
30	0.6	154.4	25.5	60.3	39.7
50	0.3	137	22.6	82.9	17.1
100	0.15	56.9	9.4	92.3	7.7
200	0.075	30	4.9	97.2	2.8
Charola	N/A	16.9	2.8	100.0	0.0
Masa total		606.3	<b>Módulo de finura</b>		2.83
Diferencia con masa inicial (g)		1.1	<b>% Pasando malla N° 200</b>		2.7
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.19			



## Agregado fino de río (cont.)

### Granulometría

Datos de laboratorio		Dato	No. Muestra		6
Fecha		25/08/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		591.0
Temperatura ambiente (°C)		23.6	Masa antes del lavado (g)		577.9
Humedad relativa (%)		64.3	Masa después del lavado (g)		563.9
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
4	4.75	11	1.9	1.9	98.1
8	2.36	93.1	16.2	18.1	81.9
16	1.18	146.8	25.5	43.5	56.5
30	0.6	135.8	23.6	67.1	32.9
50	0.3	108.6	18.8	85.9	14.1
100	0.15	38.9	6.7	92.7	7.3
200	0.075	26.1	4.5	97.2	2.8
Charola	N/A	16	2.8	100.0	0.0
Masa total		576.3	<b>Módulo de finura</b>		3.09
Diferencia con masa inicial (g)		1.6	<b>% Pasando malla N° 200</b>		2.4
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.28			

## Agregado fino de río (cont.)

### Granulometría

<b>Datos de laboratorio</b>		<b>Dato</b>	<b>No. Muestra</b>		7
Fecha		25/08/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-052	Masa inicial (g)		551.3
Temperatura ambiente (°C)		23.6	Masa antes del lavado (g)		539.4
Humedad relativa (%)		64.3	Masa después del lavado (g)		524.5
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
4	4.75	2.8	0.5	0.5	99.5
8	2.36	72	13.4	13.9	86.1
16	1.18	126.7	23.6	37.5	62.5
30	0.6	135.9	25.3	62.7	37.3
50	0.3	117.1	21.8	84.5	15.5
100	0.15	36.3	6.7	91.2	8.8
200	0.075	31.8	5.9	97.2	2.8
Charola	N/A	15.3	2.8	100.0	0.0
Masa total		537.9	<b>Módulo de finura</b>		2.90
Diferencia con masa inicial (g)		1.5	<b>% Pasando malla N° 200</b>		2.8
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.29			

## Agregado fino de río (cont.)

### Granulometría

Datos de laboratorio		Dato	No. Muestra		8
Fecha		25/08/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-052	Masa inicial (g)		614.0
Temperatura ambiente (°C)		23.6	Masa antes del lavado (g)		600.6
Humedad relativa (%)		64.3	Masa después del lavado (g)		584.3
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
4	4.75	3.6	0.6	0.6	99.4
8	2.36	68	11.4	12.0	88.0
16	1.18	124.8	20.8	32.8	67.2
30	0.6	152.5	25.5	58.2	41.8
50	0.3	143.4	23.9	82.2	17.8
100	0.15	53.8	9.0	91.2	8.8
200	0.075	35.6	5.9	97.1	2.9
Charola	N/A	17.4	2.9	100.0	0.0
Masa total		599.1	<b>Módulo de finura</b>		2.77
Diferencia con masa inicial (g)		1.5	<b>% Pasando malla N° 200</b>		2.7
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.26			

## Agregado fino de río (cont.)

### Densidad relativa

<b>Datos de laboratorio</b>	<b>Dato</b>	<b>No. Muestra</b>	<b>1</b>
Fecha	30/08/2017	Fecha y hora de inicio de Inmersión	29/08/2017 - 11:20 a.m.
Balanza	BZ-009	Fecha y hora final de Inmersión	30/08/2017 - 11:50 a.m.
Temperatura ambiente (°C)	26.4	Temperatura del agua de Inmersión (°C)	21.1
Humedad relativa (%)	62.0	Densidad del agua (kg/m <sup>3</sup> )	997.5
<b>Densidad relativa ASTM C128</b>			
No. De picnómetro	48	Masa de la cápsula (g)	132.4
Masa del picnómetro (g)	161.7	Masa seca con cápsula (g)	618.1
Masa de la muestra (S)	506.7	Masa picnómetro con muestra y agua (g)	969.5
Temperatura del agua (°C)	23.4	Masa picnómetro con agua (g)	659.0
<b>Gravedad específica seca al horno</b>	2.48	Densidad aparente seca al horno (kg/m <sup>3</sup> )	2469
<b>Gravedad específica saturada con superficie seca</b>	2.58	Densidad aparente saturada con superficie seca (kg/m <sup>3</sup> )	2576
<b>Gravedad específica aparente</b>	2.77	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2765
<b>Absorción (%)</b>	4.3		

### Agregado fino de río (cont.)

#### Densidad relativa

<b>Datos de laboratorio</b>	<b>Dato</b>	<b>No. Muestra</b>	2
Fecha	30/08/2017	Fecha y hora de inicio de Inmersión	29/08/2017 - 11:20 a.m.
Balanza	BZ-009	Fecha y hora final de Inmersión	30/08/2017 - 8:20 a.m.
Temperatura ambiente (°C)	26.4	Temperatura del agua de Inmersión (°C)	22.1
Humedad relativa (%)	62.0	Densidad del agua (kg/m <sup>3</sup> )	997.5
<b>Densidad relativa ASTM C128</b>			
No. De picnómetro	48	Masa de la cápsula (g)	174.3
Masa del picnómetro (g)	161.1	Masa seca con cápsula (g)	656.9
Masa de la muestra (S)	500.4	Masa picnómetro con muestra y agua (g)	968.0
Temperatura del agua (°C)	23.9	Masa picnómetro con agua (g)	659.0
<b>Gravedad específica seca al horno</b>	2.52	Densidad aparente seca al horno (kg/m <sup>3</sup> )	2515
<b>Gravedad específica saturada con superficie seca</b>	2.61	Densidad aparente saturada con superficie seca (kg/m <sup>3</sup> )	2608
<b>Gravedad específica aparente</b>	2.78	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2773
<b>Absorción (%)</b>	3.7		

### Agregado fino de río (cont.)

#### Densidad relativa

<b>Datos de laboratorio</b>	<b>Dato</b>	<b>No. Muestra</b>	<b>3</b>
Fecha	30/08/2017	Fecha y hora de inicio de Inmersión	29/08/2017 - 11:20 a.m.
Balanza	BZ-009	Fecha y hora final de Inmersión	30/08/2017 - 8:05 a.m.
Temperatura ambiente (°C)	26.4	Temperatura del agua de Inmersión (°C)	21.6
Humedad relativa (%)	62.0	Densidad del agua (kg/m <sup>3</sup> )	997.5
<b>Densidad relativa ASTM C128</b>			
No. De picnómetro	42	Masa de la cápsula (g)	136.6
Masa del picnómetro (g)	164.3	Masa seca con cápsula (g)	621.4
Masa de la muestra (S)	503.8	Masa picnómetro con muestra y agua (g)	970.9
Temperatura del agua (°C)	23.4	Masa picnómetro con agua (g)	662.1
<b>Gravedad específica seca al horno</b>	2.49	Densidad aparente seca al horno (kg/m <sup>3</sup> )	2480
<b>Gravedad específica saturada con superficie seca</b>	2.58	Densidad aparente saturada con superficie seca (kg/m <sup>3</sup> )	2577
<b>Gravedad específica aparente</b>	2.75	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2748
<b>Absorción (%)</b>	3.9		

## Agregado fino de río (cont.)

### Densidad masiva

<b>Datos de laboratorio</b>	<b>Dato</b>			<b>Humedad (%)</b>		
Fecha	28/08/2017			Masa recipiente suelto (kg)	1.71	
Balanza	BZ-014			Volumen recipiente suelto (L)	3.48	
Temperatura ambiente (°C)	24.9			Masa recipiente varillado (kg)	2.95	
Humedad relativa (%)	62.7			Volumen recipiente varillado (L)	1.48	
<b>Densidad masiva ASTM C29</b>	<b>Peso unitario suelto</b>			<b>Peso unitario varillado</b>		
<b>No. Muestra</b>	1	2	3	1	2	3
Masa recipiente con muestra (kg)	8.02	8.10	7.98	6.20	6.10	6.16
Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )	1513	1539	1499	1628	1621	1642
<b>Densidad masiva (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1517			1630		
<b>% vacíos</b>	39.1			34.5		

### Impurezas orgánicas

<b>Datos de laboratorio</b>	<b>Dato</b>	<b>Impurezas orgánicas ASTM C40</b>	
Fecha	30/08/2017		
Temperatura ambiente (°C)	24.3	Fecha y hora de inicio	29/08/2017 - 10:20 a.m.
Humedad relativa (%)	64.3	Fecha y hora final	30/08/2017 - 10:55 a.m.
<b>No. Muestra</b>	1	2	3
<b>Vidrio estándar</b>	Placa orgánica No. 1	Placa orgánica No. 1	Placa orgánica No. 1

## Ensayos agregado grueso de río

### Granulometría

Datos de laboratorio		Dato	No. Muestra		1
Fecha		01/09/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-009	Masa inicial (g)		5320.0
Temperatura ambiente (°C)		21.8	Masa antes del lavado (g)		5216.3
Humedad relativa (%)		62.1	Masa después del lavado (g)		5201.9
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
3/4	19	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2	12.5	1064.9	20.4	20.4	79.6
3/8	9.5	2229.1	42.8	63.2	36.8
4	4.75	1883.6	36.1	99.3	0.7
8	2.36	8.5	0.2	99.5	0.5
16	1.18	0.6	0.0	99.5	0.5
30	0.6	1.1	0.0	99.5	0.5
50	0.3	2.7	0.1	99.5	0.5
100	0.15	3.6	0.1	99.6	0.4
200	0.075	4.4	0.1	99.7	0.3
Charola	N/A	15.6	0.3	100.0	0.0
Masa total		5214.1	<b>Módulo de finura</b>		6.60
Diferencia con masa inicial (g)		2.2	<b>% Pasando malla N° 200</b>		0.3
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.04			



## Agregado grueso de río (cont.)

### Granulometría

Datos de laboratorio		Dato	No. Muestra		2
Fecha		01/09/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		4820.0
Temperatura ambiente (°C)		21.8	Masa antes del lavado (g)		4734.4
Humedad relativa (%)		62.1	Masa después del lavado (g)		4720.8
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
3/4	19.0	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2	12.5	770.6	16.3	16.3	83.7
3/8	9.5	2061.5	43.5	59.8	40.2
4	4.75	1862.0	39.3	99.2	0.8
8	2.36	11.3	0.2	99.4	0.6
16	1.18	1.3	0.0	99.4	0.6
30	0.6	1.4	0.0	99.5	0.5
50	0.3	2.6	0.1	99.5	0.5
100	0.15	3.2	0.1	99.6	0.4
200	0.075	4.2	0.1	99.7	0.3
Charola	N/A	15.7	0.3	100.0	0.0
Masa total		4733.8	<b>Módulo de finura</b>		6.56
Diferencia con masa inicial (g)		0.6	<b>% Pasando malla N° 200</b>		0.3
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.01			

## Agregado grueso de río (cont.)

### Granulometría

Datos de laboratorio		Dato	No. Muestra		3
Fecha		01/09/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-009	Masa inicial (g)		4940.0
Temperatura ambiente (°C)		21.8	Masa antes del lavado (g)		4849.7
Humedad relativa (%)		62.1	Masa después del lavado (g)		4828.1
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
3/4	19.0	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2	12.5	632.1	13.1	13.1	86.9
3/8	9.5	2083.0	43.3	56.5	43.5
4	4.75	2045.9	42.5	99.0	1.0
8	2.36	11.3	0.2	99.2	0.8
16	1.18	1.8	0.0	99.3	0.7
30	0.6	1.4	0.0	99.3	0.7
50	0.3	2.4	0.0	99.4	0.6
100	0.15	4.3	0.1	99.5	0.5
200	0.075	4.0	0.1	99.5	0.5
Charola	N/A	22.2	0.5	100.0	0.0
Masa total		4808.4	<b>Módulo de finura</b>		6.52
Diferencia con masa inicial (g)		1.9	<b>% Pasando malla N° 200</b>		0.4
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.04			

## Agregado grueso de río (cont.)

### Granulometría

<b>Datos de laboratorio</b>		<b>Dato</b>	<b>No. Muestra</b>		4
Fecha		01/09/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-009	Masa inicial (g)		4920.0
Temperatura ambiente (°C)		21.8	Masa antes del lavado (g)		4821.7
Humedad relativa (%)		62.1	Masa después del lavado (g)		4805.5
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
3/4	19.0	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2	12.5	758.1	15.8	15.8	84.2
3/8	9.5	2212.8	46.0	61.7	38.3
4	4.75	1801.5	37.4	99.2	0.8
8	2.36	12.3	0.3	99.4	0.6
16	1.18	1.7	0.0	99.5	0.5
30	0.6	1.4	0.0	99.5	0.5
50	0.3	1.5	0.0	99.5	0.5
100	0.15	2.0	0.0	99.6	0.4
200	0.075	2.6	0.1	99.6	0.4
Charola	N/A	18.2	0.4	100.0	0.0
Masa total		4812.1	<b>Módulo de finura</b>		6.58
Diferencia con masa inicial (g)		9.6	<b>% Pasando malla N° 200</b>		0.3
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.20			

## Agregado grueso de río (cont.)

### Granulometría

Datos de laboratorio		Dato	No. Muestra		5
Fecha		07/09/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		6050.4
Temperatura ambiente (°C)		23.5	Masa antes del lavado (g)		5957.9
Humedad relativa (%)		61.4	Masa después del lavado (g)		5938.1
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
3/4	19.0	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2	12.5	800.3	13.4	13.4	86.6
3/8	9.5	2527.6	42.4	55.8	44.2
4	4.75	2558.1	42.9	98.7	1.3
8	2.36	26.5	0.4	99.1	0.9
16	1.18	8.3	0.1	99.3	0.7
30	0.6	6.2	0.1	99.4	0.6
50	0.3	6.5	0.1	99.5	0.5
100	0.15	5.0	0.1	99.6	0.4
200	0.075	4.0	0.1	99.6	0.4
Charola	N/A	21.2	0.4	100.0	0.0
Masa total		5963.7	<b>Módulo de finura</b>		6.51
Diferencia con masa inicial (g)		5.8	<b>% Pasando malla N° 200</b>		0.3
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.10			

## Agregado grueso de río (cont.)

### Granulometría

<b>Datos de laboratorio</b>		<b>Dato</b>	<b>No. Muestra</b>		6
Fecha		07/09/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		5605.3
Temperatura ambiente (°C)		23.5	Masa antes del lavado (g)		5522.3
Humedad relativa (%)		61.4	Masa después del lavado (g)		5503.3
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
3/4	19.0	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2	12.5	603.4	10.9	10.9	89.1
3/8	9.5	2169.7	39.3	50.2	49.8
4	4.75	2685.4	48.6	98.8	1.2
8	2.36	24.9	0.5	99.2	0.8
16	1.18	4.9	0.1	99.3	0.7
30	0.6	3.4	0.1	99.4	0.6
50	0.3	4.2	0.1	99.5	0.5
100	0.15	4.4	0.1	99.5	0.5
200	0.075	5.0	0.1	99.6	0.4
Charola	N/A	20.5	0.4	100.0	0.0
Masa total		5525.8	<b>Módulo de finura</b>		6.46
Diferencia con masa inicial (g)		3.5	<b>% Pasando malla N° 200</b>		0.3
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.06			

## Agregado grueso de río (cont.)

### Granulometría

Datos de laboratorio		Dato	No. Muestra		7
Fecha		07/09/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		5619.7
Temperatura ambiente (°C)		23.5	Masa antes del lavado (g)		5536.7
Humedad relativa (%)		61.4	Masa después del lavado (g)		5520.0
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
3/4	19.0	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2	12.5	761.9	13.7	13.7	86.3
3/8	9.5	2214.5	39.9	53.7	46.3
4	4.75	2527.2	45.6	99.3	0.7
8	2.36	12.1	0.2	99.5	0.5
16	1.18	1.4	0.0	99.5	0.5
30	0.6	0.9	0.0	99.5	0.5
50	0.3	1.3	0.0	99.6	0.4
100	0.15	2.0	0.0	99.6	0.4
200	0.075	5.0	0.1	99.7	0.3
Charola	N/A	17.8	0.3	100.0	0.0
Masa total		5544.1	<b>Módulo de finura</b>		6.51
Diferencia con masa inicial (g)		7.4	<b>% Pasando malla N° 200</b>		0.3
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.13			

## Agregado grueso de río (cont.)

### Granulometría

Datos de laboratorio		Dato	No. Muestra		8
Fecha		07/09/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		5933.9
Temperatura ambiente (°C)		23.5	Masa antes del lavado (g)		5844.7
Humedad relativa (%)		61.4	Masa después del lavado (g)		5827.9
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
3/4	19.0	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2	12.5	897.2	15.3	15.3	84.7
3/8	9.5	2664.8	45.5	60.9	39.1
4	4.75	2243.2	38.3	99.2	0.8
8	2.36	14.6	0.2	99.4	0.6
16	1.18	2.0	0.0	99.5	0.5
30	0.6	1.0	0.0	99.5	0.5
50	0.3	1.8	0.0	99.5	0.5
100	0.15	4.4	0.1	99.6	0.4
200	0.075	5.9	0.1	99.7	0.3
Charola	N/A	18.0	0.3	100.0	0.0
Masa total		5852.9	<b>Módulo de finura</b>		6.58
Diferencia con masa inicial (g)		8.2	<b>% Pasando malla N° 200</b>		0.3
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.14			

### Agregado grueso de río (cont.)

#### Densidad relativa

<b>Datos de laboratorio</b>	<b>Dato</b>	<b>No. Muestra</b>	<b>1</b>
Fecha	07/09/2017	Fecha y hora de inicio de Inmersión	06/09/2017 - 10:50 a.m.
Balanza	BZ-052	Fecha y hora final de Inmersión	07/09/2017 - 9:10 a.m.
Temperatura ambiente (°C)	24.3	Temperatura del agua de Inmersión (°C)	22.4
Humedad relativa (%)	64.3	Densidad del agua (kg/m <sup>3</sup> )	997.5
<b>Densidad relativa ASTM C127</b>			
Masa seca (g)	3485.7	Masa sumergida de muestra saturada (g)	2226.2
Masa superficie saturada seca (g)	3550.8	Temperatura del agua (°C)	22.8
<b>Gravedad específica seca al horno</b>	2.63	Densidad aparente seca al horno (kg/m <sup>3</sup> )	2625
<b>Gravedad específica saturada con superficie seca</b>	2.68	Densidad aparente saturada con superficie seca (kg/m <sup>3</sup> )	2674
<b>Gravedad específica aparente</b>	2.77	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2761
<b>Absorción (%)</b>	1.9		



### Agregado grueso de río (cont.)

#### Densidad relativa

<b>Datos de laboratorio</b>	<b>Dato</b>	<b>No. Muestra</b>	2
Fecha	07/09/2017	Fecha y hora de inicio de Inmersión	06/09/2017 - 10:50 a.m.
Balanza	BZ-052	Fecha y hora final de Inmersión	07/09/2017 - 9:20 a.m.
Temperatura ambiente (°C)	24.3	Temperatura del agua de Inmersión (°C)	22.2
Humedad relativa (%)	64.3	Densidad del agua (kg/m <sup>3</sup> )	997.5
<b>Densidad relativa ASTM C127</b>			
Masa seca (g)	3189.1	Masa sumergida de muestra saturada (g)	2033.6
Masa superficie saturada seca (g)	3246.7	Temperatura del agua (°C)	22.9
<b>Gravedad específica seca al horno</b>	2.63	Densidad aparente seca al horno (kg/m <sup>3</sup> )	2622
<b>Gravedad específica saturada con superficie seca</b>	2.68	Densidad aparente saturada con superficie seca (kg/m <sup>3</sup> )	2670
<b>Gravedad específica aparente</b>	2.76	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2753
<b>Absorción (%)</b>	1.8		

### Agregado grueso de río (cont.)

#### Densidad relativa

<b>Datos de laboratorio</b>	<b>Dato</b>	<b>No. Muestra</b>	<b>3</b>
Fecha	07/09/2017	Fecha y hora de inicio de Inmersión	06/09/2017 - 10:50 a.m.
Balanza	BZ-052	Fecha y hora final de Inmersión	07/09/2017 - 9:40 a.m.
Temperatura ambiente (°C)	24.3	Temperatura del agua de Inmersión (°C)	22.6
Humedad relativa (%)	64.3	Densidad del agua (kg/m <sup>3</sup> )	997.5
<b>Densidad relativa ASTM C127</b>			
Masa seca (g)	3035.7	Masa sumergida de muestra saturada (g)	1935.2
Masa superficie saturada seca (g)	3089.0	Temperatura del agua (°C)	22.9
<b>Gravedad específica seca al horno</b>	2.63	Densidad aparente seca al horno (kg/m <sup>3</sup> )	2624
<b>Gravedad específica saturada con superficie seca</b>	2.68	Densidad aparente saturada con superficie seca (kg/m <sup>3</sup> )	2671
<b>Gravedad específica aparente</b>	2.76	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2752
<b>Absorción (%)</b>	1.8		

## Agregado grueso de río (cont.)

### Densidad masiva

Datos de laboratorio	Dato			Humedad (%)	1.40	
Fecha	31/08/2017			Masa recipiente suelto (kg)	6.12	
Balanza	BZ-014			Volumen recipiente suelto (L)	9.13	
Temperatura ambiente (°C)	24.6			Masa recipiente varillado (kg)	6.08	
Humedad relativa (%)	63.4			Volumen recipiente varillado (L)	9.12	
<b>Densidad masiva ASTM C29</b>	<b>Peso unitario suelto</b>			<b>Peso unitario varillado</b>		
<b>No. Muestra</b>	1	2	3	1	2	3
Masa recipiente con muestra (kg)	19.46	19.86	19.62	20.50	20.44	20.50
Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )	1440	1483	1457	1559	1552	1559
<b>Densidad masiva (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1460			1557		
<b>% vacíos</b>	44.4			40.7		

## Agregado grueso de río (cont.)

### Abrasión en Máquina de Los Ángeles

<b>Datos de laboratorio</b>	<b>Dato</b>	<b>Abrasión ASTM C131</b>	
Fecha	12/09/2017		
Balanza	BZ-007	Graduación	Tipo B
Temperatura ambiente (°C)	28.0	Número de esferas	11
Humedad relativa (%)	65.1	Masa esferas (g)	4566.2
<b>No. Muestra</b>	1	2	3
Masa de agregado entre mallas N° 3/4 y 1/2 (g)	2499.0	2500.7	2500.4
Masa de agregado entre mallas N° 1/2 y 3/8 (g)	2498.9	2500.5	2498.8
Masa de agregado recuperado (g)	4252.7	4160.9	4234.1
<b>Pérdida por abrasión (%)</b>	15	17	15

### Porcentaje de partículas fracturas

<b>Datos de laboratorio</b>	<b>Dato</b>	<b>Datos de laboratorio</b>	<b>Dato</b>
Fecha	08/09/2017	Temperatura ambiente (°C)	25.3
Balanza	BZ-007	Humedad relativa (%)	64.7
<b>Partículas fracturadas ASTM D5821</b>			
<b>No. Muestra</b>	1	2	3
Masa muestra no fracturada (g)	16.7	13.2	18.5
Masa muestra fracturada (g)	1803.5	1544.3	1520.5
<b>Partículas fracturadas (%)</b>	99.1	99.2	98.8

## Ensayos agregado fino de tajo

### Granulometría

Datos de laboratorio		Dato	No. Muestra		Preliminar
Fecha		12/09/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		643.7
Temperatura ambiente (°C)		26.3	Masa antes del lavado (g)		630.3
Humedad relativa (%)		66.5	Masa después del lavado (g)		625.4
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
4	4.75	0.3	0.1	0.1	99.9
8	2.36	176.6	30.1	30.1	69.9
16	1.18	168.8	28.7	58.9	41.1
30	0.6	90.5	15.4	74.3	25.7
50	0.3	65.6	11.2	85.4	14.6
100	0.15	45.6	7.8	93.2	6.8
200	0.075	31.4	5.3	98.5	1.5
Charola	N/A	8.6	1.5	100.0	0.0
Masa total		587.4	<b>Módulo de finura</b>		3.42
Diferencia con masa inicial (g)		1.6	<b>% Pasando malla N° 200</b>		0.8
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.26			

## Agregado fino de tajo (cont.)

### Granulometría

Datos de laboratorio		Dato	No. Muestra		1
Fecha		21/09/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		777.6
Temperatura ambiente (°C)		25.3	Masa antes del lavado (g)		752.1
Humedad relativa (%)		60.2	Masa después del lavado (g)		746.5
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
4	4.75	0.0	0.0	0.0	100.0
8	2.36	7.8	1.1	1.1	98.9
16	1.18	286.0	38.7	39.8	60.2
30	0.6	168.4	22.8	62.5	37.5
50	0.3	128.8	17.4	80.0	20.0
100	0.15	75.6	10.2	90.2	9.8
200	0.075	57.0	7.7	97.9	2.1
Charola	N/A	15.5	2.1	100.0	0.0
Masa total		739.1	<b>Módulo de finura</b>		2.73
Diferencia con masa inicial (g)		1.8	<b>% Pasando malla N° 200</b>		0.7
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.24			

## Agregado fino de tajo (cont.)

### Granulometría

<b>Datos de laboratorio</b>		<b>Dato</b>	<b>No. Muestra</b>		2
Fecha		21/09/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		700.7
Temperatura ambiente (°C)		25.3	Masa antes del lavado (g)		678.6
Humedad relativa (%)		60.2	Masa después del lavado (g)		676.8
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
4	4.75	0.0	0.0	0.0	100.0
8	2.36	8.7	1.3	1.3	98.7
16	1.18	279.5	41.5	42.8	57.2
30	0.6	150.0	22.3	65.1	34.9
50	0.3	106.9	15.9	80.9	19.1
100	0.15	63.6	9.4	90.4	9.6
200	0.075	55.1	8.2	98.6	1.4
Charola	N/A	9.7	1.4	100.0	0.0
Masa total		673.5	<b>Módulo de finura</b>		2.80
Diferencia con masa inicial (g)		1.5	<b>% Pasando malla N° 200</b>		0.3
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.22			

## Agregado fino de tajo (cont.)

### Granulometría

<b>Datos de laboratorio</b>		<b>Dato</b>	<b>No. Muestra</b>		3
Fecha		21/09/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		771.8
Temperatura ambiente (°C)		25.3	Masa antes del lavado (g)		746.8
Humedad relativa (%)		60.2	Masa después del lavado (g)		742.8
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
4	4.75	0.0	0.0	0.0	100.0
8	2.36	7.9	1.1	1.1	98.9
16	1.18	296.6	40.2	41.2	58.8
30	0.6	164.3	22.3	63.5	36.5
50	0.3	116.4	15.8	79.3	20.7
100	0.15	81.4	11.0	90.3	9.7
200	0.075	60.9	8.2	98.5	1.5
Charola	N/A	10.8	1.5	100.0	0.0
Masa total		738.3	<b>Módulo de finura</b>		2.75
Diferencia con masa inicial (g)		0.5	<b>% Pasando malla N° 200</b>		0.5
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.07			



## Agregado fino de tajo (cont.)

### Granulometría

<b>Datos de laboratorio</b>		<b>Dato</b>	<b>No. Muestra</b>		4
Fecha		21/09/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		697.7
Temperatura ambiente (°C)		25.3	Masa antes del lavado (g)		675.3
Humedad relativa (%)		60.2	Masa después del lavado (g)		671
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
4	4.75	0.0	0.0	0.0	100.0
8	2.36	5.5	0.8	0.8	99.2
16	1.18	268.0	40.3	41.1	58.9
30	0.6	149.4	22.5	63.6	36.4
50	0.3	104.2	15.7	79.3	20.7
100	0.15	73.3	11.0	90.3	9.7
200	0.075	54.3	8.2	98.4	1.6
Charola	N/A	10.4	1.6	100.0	0.0
Masa total		665.1	<b>Módulo de finura</b>		2.75
Diferencia con masa inicial (g)		1.6	<b>% Pasando malla N° 200</b>		0.6
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.24			

## Agregado fino de tajo (cont.)

### Granulometría

<b>Datos de laboratorio</b>		<b>Dato</b>	<b>No. Muestra</b>		5
Fecha		21/09/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		675.1
Temperatura ambiente (°C)		25.3	Masa antes del lavado (g)		655.8
Humedad relativa (%)		60.2	Masa después del lavado (g)		653.7
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
4	4.75	0.0	0.0	0.0	100.0
8	2.36	7.9	1.2	1.2	98.8
16	1.18	265.3	40.8	42.1	57.9
30	0.6	148.5	22.9	64.9	35.1
50	0.3	104.9	16.1	81.1	18.9
100	0.15	60.9	9.4	90.4	9.6
200	0.075	53.2	8.2	98.6	1.4
Charola	N/A	9.0	1.4	100.0	0.0
Masa total		649.7	<b>Módulo de finura</b>		2.80
Diferencia con masa inicial (g)		1.9	<b>% Pasando malla N° 200</b>		0.3
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.29			

## Agregado fino de tajo (cont.)

### Granulometría

<b>Datos de laboratorio</b>		<b>Dato</b>	<b>No. Muestra</b>		6
Fecha		21/09/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		711.5
Temperatura ambiente (°C)		25.3	Masa antes del lavado (g)		690.4
Humedad relativa (%)		60.2	Masa después del lavado (g)		689.9
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
4	4.75	0.0	0.0	0.0	100.0
8	2.36	9.0	1.3	1.3	98.7
16	1.18	284.7	41.4	42.7	57.3
30	0.6	158.1	23.0	65.7	34.3
50	0.3	106.0	15.4	81.1	18.9
100	0.15	64.0	9.3	90.4	9.6
200	0.075	56.3	8.2	98.6	1.4
Charola	N/A	9.9	1.4	100.0	0.0
Masa total		688.0	<b>Módulo de finura</b>		2.81
Diferencia con masa inicial (g)		1.4	<b>% Pasando malla N° 200</b>		0.1
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.20			

## Agregado fino de tajo (cont.)

### Granulometría

Datos de laboratorio		Dato	No. Muestra		7
Fecha		21/09/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		737.7
Temperatura ambiente (°C)		25.3	Masa antes del lavado (g)		715.9
Humedad relativa (%)		60.2	Masa después del lavado (g)		714.5
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
4	4.75	0.0	0.0	0.0	100.0
8	2.36	6.3	0.9	0.9	99.1
16	1.18	293.1	41.2	42.1	57.9
30	0.6	155.9	21.9	64.0	36.0
50	0.3	109.5	15.4	79.4	20.6
100	0.15	77.9	10.9	90.3	9.7
200	0.075	58.4	8.2	98.5	1.5
Charola	N/A	10.6	1.5	100.0	0.0
Masa total		711.7	<b>Módulo de finura</b>		2.77
Diferencia con masa inicial (g)		1.4	<b>% Pasando malla N° 200</b>		0.2
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.20			

## Agregado fino de tajo (cont.)

### Granulometría

Datos de laboratorio		Dato	No. Muestra		8
Fecha		21/09/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		785.5
Temperatura ambiente (°C)		25.3	Masa antes del lavado (g)		762.4
Humedad relativa (%)		60.2	Masa después del lavado (g)		761.7
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
4	4.75	0.0	0.0	0.0	100.0
8	2.36	11.0	1.4	1.4	98.6
16	1.18	309.9	40.8	42.3	57.7
30	0.6	165.1	21.7	64.0	36.0
50	0.3	116.7	15.4	79.4	20.6
100	0.15	83.7	11.0	90.4	9.6
200	0.075	63.3	8.3	98.7	1.3
Charola	N/A	9.5	1.3	100.0	0.0
Masa total		759.2	<b>Módulo de finura</b>		2.78
Diferencia con masa inicial (g)		1.8	<b>% Pasando malla N° 200</b>		0.1
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.24			

## Agregado fino de tajo (cont.)

### Densidad relativa

<b>Datos de laboratorio</b>	<b>Dato</b>	<b>No. Muestra</b>	<b>1</b>
Fecha	27/09/2017	Fecha y hora de inicio de Inmersión	26/09/2017 - 9:20 a.m.
Balanza	BZ-009	Fecha y hora final de Inmersión	27/09/2017 - 9:00 a.m.
Temperatura ambiente (°C)	23.3	Temperatura del agua de Inmersión (°C)	22.5
Humedad relativa (%)	61.2	Densidad del agua (kg/m <sup>3</sup> )	997.5
<b>Densidad relativa ASTM C128</b>			
No. De picnómetro	25	Masa de la cápsula (g)	124.4
Masa del picnómetro (g)	159.9	Masa seca con cápsula (g)	615.7
Masa de la muestra (S)	500.9	Masa picnómetro con muestra y agua (g)	966.3
Temperatura del agua (°C)	22.2	Masa picnómetro con agua (g)	657.9
<b>Gravedad específica seca al horno</b>	2.55	Densidad aparente seca al horno (kg/m <sup>3</sup> )	2546
<b>Gravedad específica saturada con superficie seca</b>	2.60	Densidad aparente saturada con superficie seca (kg/m <sup>3</sup> )	2596
<b>Gravedad específica aparente</b>	2.69	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2679
<b>Absorción (%)</b>	2.0		

## Agregado fino de tajo (cont.)

### Densidad relativa

<b>Datos de laboratorio</b>	<b>Dato</b>	<b>No. Muestra</b>	2
Fecha	27/09/2017	Fecha y hora de inicio de Inmersión	26/09/2017 - 9:20 a.m.
Balanza	BZ-009	Fecha y hora final de Inmersión	27/09/2017 - 9:25 a.m.
Temperatura ambiente (°C)	23.3	Temperatura del agua de Inmersión (°C)	22.5
Humedad relativa (%)	61.2	Densidad del agua (kg/m <sup>3</sup> )	997.5
<b>Densidad relativa ASTM C128</b>			
No. De picnómetro	15	Masa de la cápsula (g)	131.5
Masa del picnómetro (g)	198.5	Masa seca con cápsula (g)	620.7
Masa de la muestra (S)	500	Masa picnómetro con muestra y agua (g)	1004.1
Temperatura del agua (°C)	22.4	Masa picnómetro con agua (g)	696.0
<b>Gravedad específica seca al horno</b>	2.55	Densidad aparente seca al horno (kg/m <sup>3</sup> )	2543
<b>Gravedad específica saturada con superficie seca</b>	2.61	Densidad aparente saturada con superficie seca (kg/m <sup>3</sup> )	2599
<b>Gravedad específica aparente</b>	2.70	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2695
<b>Absorción (%)</b>	2.2		

## Agregado fino de tajo (cont.)

### Densidad relativa

<b>Datos de laboratorio</b>	<b>Dato</b>	<b>No. Muestra</b>	<b>3</b>
Fecha	27/09/2017	Fecha y hora de inicio de Inmersión	26/09/2017 - 9:20 a.m.
Balanza	BZ-009	Fecha y hora final de Inmersión	27/09/2017 - 10:50 a.m.
Temperatura ambiente (°C)	23.3	Temperatura del agua de Inmersión (°C)	22.5
Humedad relativa (%)	61.2	Densidad del agua (kg/m <sup>3</sup> )	997.5
<b>Densidad relativa ASTM C128</b>			
No. De picnómetro	25	Masa de la cápsula (g)	117.9
Masa del picnómetro (g)	159.9	Masa seca con cápsula (g)	609.3
Masa de la muestra (S)	501.5	Masa picnómetro con muestra y agua (g)	966.8
Temperatura del agua (°C)	22.5	Masa picnómetro con agua (g)	657.9
<b>Gravedad específica seca al horno</b>	2.55	Densidad aparente seca al horno (kg/m <sup>3</sup> )	2545
<b>Gravedad específica saturada con superficie seca</b>	2.60	Densidad aparente saturada con superficie seca (kg/m <sup>3</sup> )	2597
<b>Gravedad específica aparente</b>	2.69	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2686
<b>Absorción (%)</b>	2.1		



## Agregado fino de tajo (cont.)

### Densidad masiva

<b>Datos de laboratorio</b>	<b>Dato</b>			<b>Humedad (%)</b>		
Fecha	22/09/2017			Masa recipiente suelto (kg)	2.13	
Balanza	BZ-014			Volumen recipiente suelto (L)	1.74	
Temperatura ambiente (°C)	25.4			Masa recipiente varillado (kg)	2.84	
Humedad relativa (%)	61.7			Volumen recipiente varillado (L)	1.74	
<b>Densidad masiva ASTM C29</b>	<b>Peso unitario suelto</b>			<b>Peso unitario varillado</b>		
<b>No. Muestra</b>	1	2	3	1	2	3
Masa recipiente con muestra (kg)	6.04	6.04	6.04	6.38	6.40	6.44
Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )	1516	1516	1516	1636	1643	1657
<b>Densidad masiva (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1516			1645		
<b>% vacíos</b>	40.4			35.4		

### Impurezas orgánicas

<b>Datos de laboratorio</b>	<b>Dato</b>	<b>Impurezas orgánicas ASTM C40</b>	
Fecha	21/09/2017		
Temperatura ambiente (°C)	27.6	Fecha y hora de inicio	20/09/2017 - 11:50 a.m.
Humedad relativa (%)	59.7	Fecha y hora final	21/09/2017 - 11:55 a.m.
<b>No. Muestra</b>	1	2	3
<b>Vidrio estándar</b>	Placa orgánica No. 1	Placa orgánica No. 1	Placa orgánica No. 1

## Ensayos agregado grueso de tajo

### Granulometría

<b>Datos de laboratorio</b>		<b>Dato</b>	<b>No. Muestra</b>		1
Fecha		14/09/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		5701.6
Temperatura ambiente (°C)		24.9	Masa antes del lavado (g)		5609.7
Humedad relativa (%)		66.9	Masa después del lavado (g)		5575.5
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
3/4	19	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2	12.5	415.6	7.4	7.4	92.6
3/8	9.5	1647.7	29.3	36.7	63.3
4	4.75	2910.4	51.8	88.5	11.5
8	2.36	438.3	7.8	96.3	3.7
16	1.18	75.8	1.3	97.7	2.3
30	0.6	32.5	0.6	98.3	1.7
50	0.3	21.7	0.4	98.6	1.4
100	0.15	18.2	0.3	99.0	1.0
200	0.075	18.8	0.3	99.3	0.7
Charola	N/A	39.6	0.7	100.0	0.0
Masa total		5618.6	<b>Módulo de finura</b>		6.15
Diferencia con masa inicial (g)		8.9	<b>% Pasando malla N° 200</b>		0.6
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.16			

## Agregado grueso de tajo (cont.)

### Granulometría

Datos de laboratorio		Dato	No. Muestra		2
Fecha		14/09/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		5325.6
Temperatura ambiente (°C)		24.9	Masa antes del lavado (g)		5248.6
Humedad relativa (%)		66.9	Masa después del lavado (g)		5173.8
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
3/4	19.0	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2	12.5	332.2	6.3	6.3	93.7
3/8	9.5	1440.1	27.4	33.7	66.3
4	4.75	2626.3	50.0	83.7	16.3
8	2.36	477.5	9.1	92.8	7.2
16	1.18	125.5	2.4	95.2	4.8
30	0.6	63.1	1.2	96.4	3.6
50	0.3	46.3	0.9	97.3	2.7
100	0.15	35.9	0.7	98.0	2.0
200	0.075	27.5	0.5	98.5	1.5
Charola	N/A	78.0	1.5	100.0	0.0
Masa total		5252.4	<b>Módulo de finura</b>		5.97
Diferencia con masa inicial (g)		3.8	<b>% Pasando malla N° 200</b>		1.4
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.07			

## Agregado grueso de tajo (cont.)

### Granulometría

Datos de laboratorio		Dato	No. Muestra		3
Fecha		14/09/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		5561.4
Temperatura ambiente (°C)		24.9	Masa antes del lavado (g)		5469.5
Humedad relativa (%)		66.9	Masa después del lavado (g)		5431.0
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
3/4	19.0	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2	12.5	386.0	7.0	7.0	93.0
3/8	9.5	1598.3	29.1	36.2	63.8
4	4.75	2672.8	48.7	84.9	15.1
8	2.36	487.3	8.9	93.8	6.2
16	1.18	122.1	2.2	96.0	4.0
30	0.6	64.2	1.2	97.2	2.8
50	0.3	47.4	0.9	98.1	1.9
100	0.15	36.2	0.7	98.7	1.3
200	0.075	27.5	0.5	99.2	0.8
Charola	N/A	42.4	0.8	100.0	0.0
Masa total		5484.2	<b>Módulo de finura</b>		6.05
Diferencia con masa inicial (g)		14.7	<b>% Pasando malla N° 200</b>		0.7
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.27			

## Agregado grueso de tajo (cont.)

### Granulometría

Datos de laboratorio		Dato	No. Muestra		4
Fecha		14/09/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		5486.8
Temperatura ambiente (°C)		24.9	Masa antes del lavado (g)		5404.1
Humedad relativa (%)		66.9	Masa después del lavado (g)		5400.0
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
3/4	19.0	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2	12.5	405.0	7.5	7.5	92.5
3/8	9.5	1611.7	29.8	37.3	62.7
4	4.75	2788.1	51.6	88.9	11.1
8	2.36	381.6	7.1	96.0	4.0
16	1.18	79.9	1.5	97.5	2.5
30	0.6	64.5	1.2	98.7	1.3
50	0.3	23.0	0.4	99.1	0.9
100	0.15	19.5	0.4	99.4	0.6
200	0.075	19.0	0.4	99.8	0.2
Charola	N/A	10.9	0.2	100.0	0.0
Masa total		5403.2	<b>Módulo de finura</b>		6.17
Diferencia con masa inicial (g)		0.9	<b>% Pasando malla N° 200</b>		0.1
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.02			

## Agregado grueso de tajo (cont.)

### Granulometría

Datos de laboratorio		Dato	No. Muestra		5
Fecha		21/09/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		6013.2
Temperatura ambiente (°C)		25.3	Masa antes del lavado (g)		5911.4
Humedad relativa (%)		60.2	Masa después del lavado (g)		5861.5
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
3/4	19.0	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2	12.5	500.1	8.5	8.5	91.5
3/8	9.5	1902.6	32.2	40.6	59.4
4	4.75	2806.4	47.5	88.1	11.9
8	2.36	417.3	7.1	95.2	4.8
16	1.18	91.0	1.5	96.7	3.3
30	0.6	51.3	0.9	97.6	2.4
50	0.3	37.8	0.6	98.2	1.8
100	0.15	21.0	0.4	98.6	1.4
200	0.075	26.9	0.5	99.0	1.0
Charola	N/A	56.5	1.0	100.0	0.0
Masa total		5910.9	<b>Módulo de finura</b>		6.15
Diferencia con masa inicial (g)		0.5	<b>% Pasando malla N° 200</b>		0.8
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.01			

## Agregado grueso de tajo (cont.)

### Granulometría

Datos de laboratorio		Dato	No. Muestra		6
Fecha		21/09/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		5846.4
Temperatura ambiente (°C)		25.3	Masa antes del lavado (g)		5748.0
Humedad relativa (%)		60.2	Masa después del lavado (g)		5702.5
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
3/4	19.0	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2	12.5	447.3	7.8	7.8	92.2
3/8	9.5	1948.5	34.0	41.8	58.2
4	4.75	2737.8	47.8	89.6	10.4
8	2.36	355.4	6.2	95.8	4.2
16	1.18	66.4	1.2	96.9	3.1
30	0.6	40.5	0.7	97.6	2.4
50	0.3	34.3	0.6	98.2	1.8
100	0.15	17.2	0.3	98.5	1.5
200	0.075	32.4	0.6	99.1	0.9
Charola	N/A	52.3	0.9	100.0	0.0
Masa total		5732.1	<b>Módulo de finura</b>		6.18
Diferencia con masa inicial (g)		15.9	<b>% Pasando malla N° 200</b>		0.8
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.28			

## Agregado grueso de tajo (cont.)

### Granulometría

Datos de laboratorio		Dato	No. Muestra		7
Fecha		21/09/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		5216.7
Temperatura ambiente (°C)		25.3	Masa antes del lavado (g)		5128.0
Humedad relativa (%)		60.2	Masa después del lavado (g)		5077.9
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
3/4	19.0	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2	12.5	300.7	5.9	5.9	94.1
3/8	9.5	1392.0	27.1	33.0	67.0
4	4.75	2657.1	51.7	84.7	15.3
8	2.36	477.0	9.3	94.0	6.0
16	1.18	121.1	2.4	96.3	3.7
30	0.6	53.3	1.0	97.4	2.6
50	0.3	30.8	0.6	98.0	2.0
100	0.15	25.5	0.5	98.5	1.5
200	0.075	23.6	0.5	98.9	1.1
Charola	N/A	54.6	1.1	100.0	0.0
Masa total		5135.7	<b>Módulo de finura</b>		6.02
Diferencia con masa inicial (g)		7.7	<b>% Pasando malla N° 200</b>		1.0
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.15			



## Agregado grueso de tajo (cont.)

### Granulometría

Datos de laboratorio		Dato	No. Muestra		8
Fecha		21/09/2017	<b>Lavado ASTM C117</b>		
Balanza		BZ-007	Masa inicial (g)		5176.5
Temperatura ambiente (°C)		25.3	Masa antes del lavado (g)		5089.4
Humedad relativa (%)		60.2	Masa después del lavado (g)		5039.5
<b>Granulometría ASTM C136</b>					
No. Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido en la malla	% Retenido acumulado	% Pasando acumulado
3/4	19.0	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2	12.5	341.1	6.7	6.7	93.3
3/8	9.5	1571.8	30.8	37.5	62.5
4	4.75	2562.3	50.2	87.8	12.2
8	2.36	379.6	7.4	95.2	4.8
16	1.18	78.2	1.5	96.7	3.3
30	0.6	38.6	0.8	97.5	2.5
50	0.3	28.9	0.6	98.1	1.9
100	0.15	23.7	0.5	98.5	1.5
200	0.075	22.4	0.4	99.0	1.0
Charola	N/A	52.7	1.0	100.0	0.0
Masa total		5099.3	<b>Módulo de finura</b>		6.11
Diferencia con masa inicial (g)		9.9	<b>% Pasando malla N° 200</b>		1.0
<b>Porcentaje de diferencia</b>		0.20			

## Agregado grueso de tajo (cont.)

### Densidad relativa

<b>Datos de laboratorio</b>	<b>Dato</b>	<b>No. Muestra</b>	<b>1</b>
Fecha	13/09/2017	Fecha y hora de inicio de Inmersión	12/09/2017 - 12:00 a.m.
Balanza	BZ-052	Fecha y hora final de Inmersión	13/09/2017 - 9:00 a.m.
Temperatura ambiente (°C)	24.8	Temperatura del agua de Inmersión (°C)	22.4
Humedad relativa (%)	68.6	Densidad del agua (kg/m <sup>3</sup> )	997.5
<b>Densidad relativa ASTM C127</b>			
Masa seca (g)	3620.0	Masa sumergida de muestra saturada (g)	2271.5
Masa superficie saturada seca (g)	3693.5	Temperatura del agua (°C)	22.8
<b>Gravedad específica seca al horno</b>	2.55	Densidad aparente seca al horno (kg/m <sup>3</sup> )	2539
<b>Gravedad específica saturada con superficie seca</b>	2.60	Densidad aparente saturada con superficie seca (kg/m <sup>3</sup> )	2591
<b>Gravedad específica aparente</b>	2.68	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2678
<b>Absorción (%)</b>	2.0		

### Agregado grueso de tajo (cont.)

#### Densidad relativa

<b>Datos de laboratorio</b>	<b>Dato</b>	<b>No. Muestra</b>	2
Fecha	13/09/2017	Fecha y hora de inicio de Inmersión	12/09/2017 - 12:00 a.m.
Balanza	BZ-052	Fecha y hora final de Inmersión	13/09/2017 - 9:00 a.m.
Temperatura ambiente (°C)	24.8	Temperatura del agua de Inmersión (°C)	22.4
Humedad relativa (%)	68.6	Densidad del agua (kg/m <sup>3</sup> )	997.5
<b>Densidad relativa ASTM C127</b>			
Masa seca (g)	3184.1	Masa sumergida de muestra saturada (g)	1960.2
Masa superficie saturada seca (g)	3186.2	Temperatura del agua (°C)	22.8
<b>Gravedad específica seca al horno</b>	2.60	Densidad aparente seca al horno (kg/m <sup>3</sup> )	2591
<b>Gravedad específica saturada con superficie seca</b>	2.60	Densidad aparente saturada con superficie seca (kg/m <sup>3</sup> )	2592
<b>Gravedad específica aparente</b>	2.60	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2595
<b>Absorción (%)</b>	0.1		

### Agregado grueso de tajo (cont.)

#### Densidad relativa

<b>Datos de laboratorio</b>	<b>Dato</b>	<b>No. Muestra</b>	<b>3</b>
Fecha	13/09/2017	Fecha y hora de inicio de Inmersión	12/09/2017 - 12:00 a.m.
Balanza	BZ-052	Fecha y hora final de Inmersión	13/09/2017 - 9:00 a.m.
Temperatura ambiente (°C)	24.8	Temperatura del agua de Inmersión (°C)	22.4
Humedad relativa (%)	68.6	Densidad del agua (kg/m <sup>3</sup> )	997.5
<b>Densidad relativa ASTM C127</b>			
Masa seca (g)	3417.6	Masa sumergida de muestra saturada (g)	2144.8
Masa superficie saturada seca (g)	3485.7	Temperatura del agua (°C)	22.6
<b>Gravedad específica seca al horno</b>	2.55	Densidad aparente seca al horno (kg/m <sup>3</sup> )	2542
<b>Gravedad específica saturada con superficie seca</b>	2.60	Densidad aparente saturada con superficie seca (kg/m <sup>3</sup> )	2593
<b>Gravedad específica aparente</b>	2.69	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2678
<b>Absorción (%)</b>	2.0		

## Agregado grueso de tajo (cont.)

### Densidad masiva

Datos de laboratorio	Dato			Humedad (%)	1.12	
Fecha	11/09/2017			Masa recipiente suelto (kg)	6.12	
Balanza	BZ-014			Volumen recipiente suelto (L)	9.13	
Temperatura ambiente (°C)	26.3			Masa recipiente varillado (kg)	6.08	
Humedad relativa (%)	66.5			Volumen recipiente varillado (L)	9.12	
<b>Densidad masiva ASTM C29</b>	<b>Peso unitario suelto</b>			<b>Peso unitario varillado</b>		
<b>No. Muestra</b>	1	2	3	1	2	3
Masa recipiente con muestra (kg)	19.74	19.54	19.18	20.14	20.32	19.94
Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )	1474	1453	1414	1524	1544	1502
<b>Peso unitario promedio (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1447			1523		
<b>% vacíos</b>	43.4			40.5		

## Agregado grueso de tajo (cont.)

### Abrasión en Máquina de Los Ángeles

<b>Datos de laboratorio</b>	<b>Dato</b>	<b>Abrasión ASTM C131</b>	
Fecha	20/09/2017		
Balanza	BZ-007	Graduación	Tipo C
Temperatura ambiente (°C)	27.6	Número de esferas	8
Humedad relativa (%)	59.7	Masa esferas (g)	3329.6
<b>No. Muestra</b>	1	2	3
Masa de agregado entre mallas N° 3/8 y 1/4 (g)	2500.1	2501.3	2499.9
Masa de agregado entre mallas N° 1/4 y 4 (g)	2500.9	2500.2	2500.2
Masa de agregado recuperado (g)	4047.8	4053.2	4078.2
<b>Pérdida por abrasión (%)</b>	19	19	18

### Porcentaje de partículas fracturas

<b>Datos de laboratorio</b>	<b>Dato</b>	<b>Datos de laboratorio</b>	<b>Dato</b>
Fecha	13/09/2017	Temperatura ambiente (°C)	24.8
Balanza	BZ-007	Humedad relativa (%)	68.6
<b>Partículas fracturadas ASTM D5821</b>			
<b>No. Muestra</b>	1	2	3
Masa muestra no fracturada (g)	0.0	0.0	0.0
Masa muestra fracturada (g)	1488.4	1656.3	1509.6
<b>Partículas fracturadas (%)</b>	100.0	100.0	100.0

## Ensayos Cemento MM/A (E-C) – 28

### Consistencia

Consistencia ASTM C187		Datos de laboratorio		Dato		Datos de laboratorio		Dato		
Agua de consistencia normal (g)	162.5	Fecha		28/11/2017		Temperatura ambiente (°C)		22.5		
Agua de consistencia normal (%)	25.0	Balanza		BZ-007		Humedad relativa (%)		69.4		
<b>No. Muestra</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cemento (g)	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0
Agua (g)	168.0	161.3	164.8	162.5	163.0	162.6	168.8	159.1	168.9	161.2
Agua (%)	25.8	24.8	25.4	25.0	25.1	25.0	26.0	24.5	26.0	24.8
Penetración medida en aguja de Vicat (mm)	12.0	8.5	11.5	10.0	11.0	10.0	12.0	6.5	12.5	8.0

### Cemento MM/A (E-C) – 28 (cont.)

#### Densidad

Densidad ASTM C188		Datos de laboratorio		Dato		Datos de laboratorio		Dato		
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	3083	Fecha		04/12/2017		Temperatura ambiente (°C)		24.9		
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	3.08	Balanza y No. Le Chantelier		BZ-007 45		Humedad relativa (%)		60.1		
<b>No. Muestra</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Masa del frasco con cemento y keroseno (g)	396.9	396.6	396.8	396.9	396.5	397.9	397.5	397.4	396.3	397.0
Masa del frasco con keroseno (g)	332.9	333.1	333.1	333.0	332.7	334.1	333.7	333.4	332.6	333.1
Cemento (g)	64.0	63.5	63.7	63.9	63.8	63.8	63.8	64.0	63.7	63.9
Volumen inicial medido (ml)	0.6	0.8	0.7	0.7	0.3	1.1	0.9	0.6	0.1	0.4
Volumen final medido (ml)	21.5	21.4	21.2	21.5	20.8	22.2	21.6	21.2	20.7	21.1
Temperatura inicial (°C)	22.6	22.9	23.1	23.3	23.3	20.9	21.6	21.6	22.0	22.3
Temperatura final (°C)	22.8	23.0	23.3	23.3	23.2	21.1	21.7	21.7	22.2	22.4
Densidad del cemento (kg/m <sup>3</sup> )	3062	3083	3107	3072	3112	3024	3082	3107	3092	3087
<b>Densidad del cemento (g/m<sup>3</sup>)</b>	3.06	3.08	3.11	3.07	3.11	3.02	3.08	3.11	3.09	3.09



### Cemento MM/A (E-C) – 28 (cont.)

Tiempo de fraguado

<b>Tiempo de fragua ASTM C191</b>										
<b>No. Muestra</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fecha	08/12/2017	08/12/2017	18/12/2017	18/12/2017	08/01/2018	08/01/2018	08/01/2018	10/01/2018	10/01/2018	10/01/2018
Balanza	BZ-007	BZ-007	BZ-007	BZ-007	BZ-007	BZ-007	BZ-007	BZ-007	BZ-007	BZ-007
Temperatura (°C)	23.2	23.3	23.3	23.3	22.9	22.9	22.8	23.1	23.2	23.2
Humedad relativa (%)	59.7	59.7	62.5	62.5	60.5	60.7	60.7	58.5	58.4	58.2
Cemento (g)	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650
Agua (g)	162.5	162.5	162.5	162.5	162.5	162.5	162.5	162.5	162.5	162.5
<b>Fragua inicial (min)</b>	151	153	163	162	176	204	200	190	178	202
<b>Fragua final (min)</b>	280	275	295	293	316	332	325	318	323	328
<b>Tiempo de fragua inicial: 180 minutos</b>										
<b>Tiempo de fragua final: 310 minutos</b>										

**Cemento MM/A (E-C) – 28 (cont.)**

Finura por tamiz N° 325 ASTM

<b>Finura ASTM C430</b>		<b>Datos de laboratorio</b>		<b>Dato</b>		<b>Datos de laboratorio</b>		<b>Dato</b>		
Masa pasando tamiz No. 325 (%)	96.9	Fecha		11/12/2017		Temperatura ambiente (°C)		22.3		
Masa retenido tamiz No. 325 (%)	3.1	Balanza		BZ-059		Humedad relativa (%)		60.2		
<b>No. Muestra</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Masa de muestra inicial (g)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Masa de cápsula (g)	46.610	46.610	46.610	46.610	46.610	46.610	46.610	46.610	43.168	43.168
Masa de cápsula más muestra seca (g)	46.640	46.635	46.644	46.639	46.642	46.645	46.644	46.635	43.197	43.200
Masa de muestra final (g)	0.030	0.025	0.034	0.029	0.033	0.035	0.035	0.026	0.029	0.032
Masa pasando tamiz No. 325 (%)	97.0	97.5	96.6	97.1	96.7	96.5	96.5	97.4	97.1	96.8

### Cemento MM/A (E-C) – 28 (cont.)

#### Resistencia a la compresión en mortero

Datos de laboratorio	Dato	Resistencia a compresión simple cubos de mortero ASTM C109		
Fecha	09/10/2017	Nº muestra	1	2
Balanza	BZ-007	Agua (%)	49.7	49.7
Temperatura ambiente (°C)	23.2	Flujo observado (%)	111.5	113.0
Humedad relativa (%)	52.9	Cubos fabricados	6	6
No. Muestra	Edad de falla (días)	Fuerza aplicada (kN)	Resistencia a la compresión (MPa)	Porcentaje de resistencia ganado (%)
1	3	50.82	20.2	71.7
2	3	50.69	20.0	71.3
3	3	50.02	19.7	70.1
4	8	63.00	25.0	88.9
5	8	63.00	24.9	88.5
6	8	66.00	26.3	93.5
7	28	72.00	28.4	101.3
8	28	71.00	28.2	100.4
9	28	70.00	27.6	98.3
10	56	90.00	35.6	126.9
11	56	93.00	36.8	130.9
12	56	91.00	35.5	126.6
<b>Resistencia a los 28 días (MPa)</b>	28.1			

## Cemento MM/A (E-C) – 28 (cont.)

### Determinación pH cemento

<b>Datos de laboratorio</b>	<b>Dato</b>	<b>Determinación pH</b>	
Fecha	12/12/2017		
Balanza	BZ-064	Disolvente	Metanol
Temperatura ambiente (°C)	22.0	Razón disolvente/cemento	0.55
Humedad relativa (%)	58.0	pH	12.25
<b>No. Muestra</b>	1	2	3
Cantidad disolvente (g)	90.48	99.12	73.24
Cantidad cemento (g)	164.56	180.54	132.72
<b>No. Lectura</b>	<b>pH</b>	<b>pH</b>	<b>pH</b>
1	12.42	12.15	12.09
2	12.31	12.18	12.13
3	12.27	12.18	12.15
4	12.25	12.21	12.18
5	12.25	12.23	12.20
6	12.25	12.23	12.22
7	12.25	12.23	12.24
8	12.25	12.23	12.26
9	12.25	12.23	12.26
10	12.25	12.23	12.26

## Ensayos Cemento MM/B (P-C) – 28

### Consistencia

Consistencia ASTM C187		Datos de laboratorio		Dato		Datos de laboratorio		Dato		
Agua de consistencia normal (g)	173.5	Fecha		01/12/2017		Temperatura ambiente (°C)		22.8		
Agua de consistencia normal (%)	26.7	Balanza		BZ-007		Humedad relativa (%)		61.8		
<b>No. Muestra</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cemento (g)	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0
Agua (g)	172.9	175.9	176.5	176.5	171.4	172.5	174.1	172.3	173.5	174.8
Agua (%)	26.6	27.1	27.2	27.2	26.4	26.5	26.8	26.5	26.7	26.9
Penetración medida en aguja de Vicat (mm)	9.0	11.0	12.0	12.0	8.0	9.5	10.5	8.5	10.0	11.0

**Cemento MM/B (P-C) – 28 (cont.)**

Densidad

<b>Densidad ASTM C188</b>		<b>Datos de laboratorio</b>		<b>Dato</b>		<b>Datos de laboratorio</b>		<b>Dato</b>		
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2982	Fecha		06/12/2017		Temperatura ambiente (°C)		22.3		
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2.98	Balanza y No. Le Chantelier		BZ-004 45		Humedad relativa (%)		55.9		
<b>No. Muestra</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Masa del frasco con cemento y keroseno (g)	397.4	396.5	397.2	397.1	396.9	396.3	396.7	397.0	397.1	397.2
Masa del frasco con keroseno (g)	333.0	332.7	333.2	333.2	332.9	332.5	332.7	333.1	333.2	333.3
Cemento (g)	64.4	63.8	64.0	63.9	64.0	63.8	64.0	63.9	63.9	63.9
Volumen inicial medido (ml)	0.1	0.0	0.8	0.4	0.5	0	0.5	0.8	0.8	0.8
Volumen final medido (ml)	21.7	21.5	22.2	21.9	22.0	21.5	21.9	22.3	22.0	22.2
Temperatura inicial (°C)	20.9	21.2	21.5	22.2	22.2	22.5	22.9	23.6	23.6	23.2
Temperatura final (°C)	21.0	21.3	21.6	22.1	22.3	22.7	23.1	23.8	23.4	23.3
Densidad del cemento (kg/m <sup>3</sup> )	2981	2967	2991	2972	2977	2967	2991	2972	3014	2986
<b>Densidad del cemento (g/m<sup>3</sup>)</b>	2.98	2.97	2.99	2.97	2.98	2.97	2.99	2.97	3.01	2.99

### Cemento MM/B (P-C) – 28 (cont.)

Tiempo de fraguado

<b>Tiempo de fragua ASTM C191</b>										
<b>No. Muestra</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fecha	14/12/2017	14/12/2017	14/12/2017	14/12/2017	19/12/2017	19/12/2017	19/12/2017	19/12/2017	09/01/2018	09/01/2018
Balanza	BZ-007	BZ-007	BZ-007	BZ-007	BZ-007	BZ-007	BZ-007	BZ-007	BZ-007	BZ-007
Temperatura (°C)	23.1	23.0	22.9	23.1	23.1	23.3	23.1	23.1	22.8	22.9
Humedad relativa (%)	61.3	61.4	61.2	61.3	59.3	58.8	59.3	59.3	60.2	59.9
Cemento (g)	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0
Agua (g)	173.5	173.5	173.5	173.5	173.5	173.5	173.5	173.5	173.5	173.5
<b>Fragua inicial (min)</b>	114	105	98	96	92	82	101	90	99	90
<b>Fragua final (min)</b>	195	198	210	210	226	219	195	212	224	219
<b>Tiempo de fragua inicial: 95 minutos</b>										
<b>Tiempo de fragua final: 210 minutos</b>										

**Cemento MM/B (P-C) – 28 (cont.)**

Finura por tamiz N° 325 ASTM

<b>Finura ASTM C430</b>		<b>Datos de laboratorio</b>		<b>Dato</b>		<b>Datos de laboratorio</b>		<b>Dato</b>		
Masa pasando tamiz No. 325 (%)	92.5	Fecha		11/12/2017		Temperatura ambiente (°C)		20.8		
Masa retenido tamiz No. 325 (%)	7.5	Balanza		BZ-059		Humedad relativa (%)		62.9		
<b>No. Muestra</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Masa de muestra inicial (g)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Masa de cápsula (g)	43.168	43.168	43.168	43.168	43.168	43.168	43.168	43.168	43.168	43.168
Masa de cápsula más muestra seca (g)	43.243	43.238	43.242	43.245	43.249	43.237	43.244	43.253	43.249	43.233
Masa de muestra final (g)	0.075	0.069	0.074	0.077	0.080	0.069	0.075	0.084	0.081	0.065
Masa pasando tamiz No. 325 (%)	92.5	93.1	92.6	92.3	92.0	93.1	92.5	91.6	91.9	93.5



### Cemento MM/B (P-C) – 28 (cont.)

#### Resistencia a la compresión en mortero

<b>Datos de laboratorio</b>		<b>Resistencia a compresión simple cubos de mortero ASTM C109</b>		
Fecha	18/10/2017	Nº muestra	1	2
Balanza	BZ-007	Agua (%)	51.0	51.3
Temperatura ambiente (°C)	25.6	Flujo observado (%)	105.5	107.5
Humedad relativa (%)	62.3	Cubos fabricados	6	6
<b>No. Muestra</b>	Edad de falla (días)	Fuerza aplicada (kN)	Resistencia a la compresión (MPa)	Porcentaje de resistencia ganado (%)
1	7	51.00	20.2	72.9
2	7	51.00	19.7	70.9
3	7	49.00	19.7	70.8
4	14	53.20	21.2	76.2
5	14	52.05	20.8	74.8
6	14	55.25	22.1	79.6
7	28	72.00	28.0	100.7
8	28	69.00	27.6	99.4
9	28	72.00	27.7	99.9
10	56	78.00	31.2	112.2
11	56	74.00	29.6	106.5
12	56	74.00	29.6	106.5
<b>Resistencia a los 28 días (MPa)</b>	27.8			

## Cemento MM/B (P-C) – 28 (cont.)

### Determinación pH cemento

<b>Datos de laboratorio</b>	<b>Dato</b>	<b>Determinación pH</b>	
Fecha	12/12/2017		
Balanza	BZ-064	Disolvente	Metanol
Temperatura ambiente (°C)	23.0	Razón disolvente/cemento	0.56
Humedad relativa (%)	57.0	pH	12.34
<b>No. Muestra</b>	1	2	3
Cantidad disolvente (g)	88.46	76.93	89.83
Cantidad cemento (g)	155.10	140.53	163.97
<b>No. Lectura</b>	<b>pH</b>	<b>pH</b>	<b>pH</b>
1	12.07	12.27	12.27
2	12.16	12.30	12.27
3	12.19	12.30	12.27
4	12.22	12.32	12.29
5	12.25	12.32	12.32
6	12.28	12.34	12.32
7	12.30	12.34	12.34
8	12.33	12.34	12.34
9	12.33	12.34	12.34
10	12.33	12.34	12.34

## Ensayos Cemento MP A – AR

### Consistencia

Consistencia ASTM C187		Datos de laboratorio		Dato		Datos de laboratorio		Dato		
Agua de consistencia normal (g)	170.5	Fecha		01/12/2017		Temperatura ambiente (°C)		22.5		
Agua de consistencia normal (%)	26.2	Balanza		BZ-007		Humedad relativa (%)		62.4		
<b>No. Muestra</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cemento (g)	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0
Agua (g)	171.0	181.4	176.5	177.8	174.8	175.2	170.2	172.2	171.5	170.7
Agua (%)	26.3	27.9	27.2	27.4	26.9	27.0	26.2	26.5	26.4	26.3
Penetración medida en aguja de Vicat (mm)	11.0	19.0	13.5	16.5	14.0	14.5	9.0	12.0	11.0	10.5

### Cemento MP A – AR (cont.)

Densidad

Densidad ASTM C188		Datos de laboratorio		Dato		Datos de laboratorio		Dato		
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	3082	Fecha		07/12/2017		Temperatura ambiente (°C)		26.0		
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	3.08	Balanza y No. Le Chantelier		BZ-004 13		Humedad relativa (%)		59.0		
<b>No. Muestra</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Masa del frasco con cemento y keroseno (g)	399.2	399.5	399.5	399.2	399.7	399.9	400.1	399.6	399.1	399.6
Masa del frasco con keroseno (g)	335.4	335.7	335.8	335.8	335.8	336.1	336.1	335.6	335.2	335.6
Cemento (g)	63.8	63.8	63.7	63.4	63.9	63.8	64.0	64.0	63.9	64.0
Volumen inicial medido (ml)	0.3	0.8	0.5	0.2	0.3	0.6	0.8	0.3	0.0	0.4
Volumen final medido (ml)	21.1	21.2	21.1	20.8	20.9	21.3	21.7	21.2	20.8	21.2
Temperatura inicial (°C)	22.6	23.1	22.4	21.6	21.2	21.1	21.3	21.8	22.3	22.8
Temperatura final (°C)	22.8	22.9	22.2	21.4	21.1	21.3	21.5	22.0	22.5	23.0
Densidad del cemento (kg/m <sup>3</sup> )	3067	3127	3092	3078	3102	3082	3062	3062	3072	3077
<b>Densidad del cemento (g/m<sup>3</sup>)</b>	3.07	3.13	3.09	3.08	3.10	3.08	3.06	3.06	3.07	3.08

### Cemento MP A – AR (cont.)

Tiempo de fraguado

<b>Tiempo de fragua ASTM C191</b>										
<b>No. Muestra</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fecha	15/12/2017	15/12/2017	15/12/2017	15/12/2017	20/12/2017	20/12/2017	20/12/2017	20/12/2017	09/01/2017	09/01/2017
Balanza	BZ-007	BZ-007	BZ-007	BZ-007	BZ-007	BZ-007	BZ-007	BZ-007	BZ-007	BZ-007
Temperatura (°C)	23.3	23.3	22.9	22.9	23.0	23.2	23.3	23.3	22.7	23.1
Humedad relativa (%)	58.2	58.4	61.5	61.5	61.9	61.9	61.8	61.7	59.5	58.1
Cemento (g)	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0	650.0
Agua (g)	170.5	170.5	170.5	170.5	170.5	170.5	170.5	170.5	170.5	170.5
<b>Fragua inicial (min)</b>	103	110	117	113	101	113	124	129	143	146
<b>Fragua final (min)</b>	250	245	240	237	242	239	240	247	233	235
<b>Tiempo de fragua inicial: 120 minutos</b>										
<b>Tiempo de fragua final: 240 minutos</b>										

### Cemento MP A – AR (cont.)

Finura por tamiz N° 325 ASTM

Finura ASTM C430		Datos de laboratorio		Dato		Datos de laboratorio		Dato		
Masa pasando tamiz No. 325 (%)	96.7	Fecha		12/12/2017		Temperatura ambiente (°C)		20.5		
Masa retenido tamiz No. 325 (%)	3.3	Balanza		BZ-059		Humedad relativa (%)		64.6		
No. Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Masa de muestra inicial (g)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Masa de cápsula (g)	43.167	43.167	43.167	43.167	46.611	46.611	46.611	46.611	46.611	46.611
Masa de cápsula más muestra seca (g)	43.201	43.201	43.202	43.190	46.646	46.646	46.645	46.641	46.641	46.643
Masa de muestra final (g)	0.034	0.035	0.035	0.023	0.035	0.035	0.035	0.031	0.030	0.033
Masa pasando tamiz No. 325 (%)	96.6	96.5	96.5	97.7	96.5	96.5	96.5	97.0	97.0	96.7

## Cemento MP A – AR (cont.)

### Resistencia a la compresión en mortero

<b>Datos de laboratorio</b>		<b>Dato</b>	<b>Resistencia a compresión simple cubos de mortero ASTM C109</b>		
Fecha	23/10/2017	Nº muestra	1	2	
Balanza	BZ-007	Agua (%)	51.4	50.8	
Temperatura ambiente (°C)	26.0	Flujo observado (%)	115.0	113.5	
Humedad relativa (%)	60.0	Cubos fabricados	6	6	
<b>No. Muestra</b>	Edad de falla (días)	Fuerza aplicada (kN)	Resistencia a la compresión (MPa)	Porcentaje de resistencia ganado (%)	
1	3	61.00	23.5	60.6	
2	3	62.00	23.9	61.5	
3	3	64.00	24.5	63.0	
4	7	83.00	31.8	81.8	
5	7	81.00	31.1	80.0	
6	7	83.00	31.7	81.6	
7	28	101.00	38.6	99.2	
8	28	102.00	39.1	100.7	
9	28	101.00	38.9	100.1	
10	56	108.00	41.4	106.4	
11	56	109.00	42.1	108.4	
12	56	109.00	41.9	107.7	
<b>Resistencia a los 28 días (MPa)</b>		38.9			

## Cemento MP A – AR (cont.)

### Determinación pH cemento

<b>Datos de laboratorio</b>	<b>Dato</b>	<b>Determinación pH</b>	
Fecha	13/12/2017		
Balanza	BZ-064	Disolvente	Metanol
Temperatura ambiente (°C)	20.0	Razón disolvente/cemento	0.55
Humedad relativa (%)	62.0	pH	12.22
<b>No. Muestra</b>	1	2	3
Cantidad disolvente (g)	78.51	72.58	86.74
Cantidad cemento (g)	143.19	132.83	158.97
<b>No. Lectura</b>	<b>pH</b>	<b>pH</b>	<b>pH</b>
1	12.01	12.13	12.09
2	12.05	12.16	12.13
3	12.09	12.19	12.17
4	12.13	12.19	12.17
5	12.15	12.21	12.21
6	12.17	12.21	12.21
7	12.20	12.23	12.24
8	12.20	12.23	12.24
9	12.20	12.23	12.24
10	12.20	12.23	12.24



## Ensayos Mezcla N° 1: Cemento MM/A (E-C) – 28 con agregado de río

### Caracterización mezcla de concreto

Datos mezcla de concreto		Densidad concreto fresco ASTM C138	
Cemento utilizado	MM/A (E-C) - 28	Masa del recipiente (kg)	3.86
Agregado utilizado	Agregado de río	Masa del recipiente más concreto (kg)	20.52
Cantidad de cemento utilizado (kg)	73.40	Volumen del recipiente (L)	7.08
Cantidad de agua utilizada (kg)	44.00	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2352
Cantidad de arena utilizada (kg)	160.16	<b>Temperatura del concreto ASTM 1064</b>	
Cantidad de piedra utilizada (kg)	181.86	Temperatura (°C)	24.8
Datos laboratorio		Contenido de aire ASTM C231	
Fecha	09/10/2017	Contenido de aire (%)	1.4
Temperatura (°C)	23.2	Revenimiento ASTM C143	
Humedad relativa (%)	52.1	Revenimiento (mm)	125
pH agua	7.45	Adición de agua (kg)	0.00
Resistencia a la abrasión por el método de corte rotativo ASTM C944			
Fecha	06/11/2017		
Edad del concreto	28 días		
Descripción superficie	Concreto elaborado con cemento MM/A (E-C) - 28 y agregado de río		
Tipo de acabado	Superficies cortadas con sierra		
No. Muestra	1	2	3
Tamaño del espécimen (cm)	2.73	2.84	2.80
Masa antes del ensayo (g)	406.54	410.96	415.52
Resistencia promedio (MPa)	34.2		
Superficie ensayada	Cara superior de los especímenes		
Tiempo de abrasión	1 Lapso de 2 minutos por espécimen		
Carga de abrasión (N)	89.2		
Masa después del ensayo (g)	406.16	410.68	415.14
Masa pérdida (g)	0.38	0.28	0.38
Pérdida promedio (g)	0.35		

### Mezcla N° 1: Cemento MM/A (E-C) – 28 con agregado de río (cont.)

#### Resistencia a la compresión simple en cilindros de concreto

No. Muestra	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Edad (días)	Peso (kg)	Resistencia (kN)	Tipo de falla observada	Resistencia a la compresión (MPa)	Porcentaje de resistencia (%)
1	302.68	151.87	3	12.84	239.30	3	13.21	38.59
2	300.82	151.57	3	12.80	240.10	3	13.31	38.87
3	299.02	151.64	3	12.66	252.15	3	13.96	40.79
4	299.68	151.54	3	12.70	233.50	3	12.95	37.82
5	300.52	151.54	3	12.72	220.50	3	12.22	35.71
6	300.40	151.68	3	12.76	248.50	3	13.75	40.18
7	298.84	151.43	3	12.68	252.50	3	14.02	40.96
8	300.56	151.49	3	12.74	248.25	3	13.77	40.24
9	300.67	151.65	8	12.74	395.80	2	21.91	64.02
10	299.52	151.64	8	12.68	449.55	2	24.89	72.73
11	303.92	151.80	8	12.86	378.60	2	20.92	61.12
12	301.85	151.58	8	12.84	447.55	2	24.80	72.46
13	301.52	151.53	8	12.80	389.70	2	21.61	63.13
14	303.28	151.40	8	12.88	428.15	2	23.78	69.48
15	301.45	151.54	8	12.74	442.55	2	24.54	71.68
16	302.29	151.61	8	12.78	419.90	2	23.26	67.95
<b>Resistencia a los 28 días (MPa)</b>	34.23							

### Mezcla N° 1: Cemento MM/A (E-C) – 28 con agregado de río (cont.)

Resistencia a la compresión simple en cilindros de concreto

No. Muestra	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Edad (días)	Peso (kg)	Resistencia (kN)	Tipo de falla observada	Resistencia a la compresión (MPa)	Porcentaje de resistencia (%)
17	302.35	151.27	28	12.88	597.45	2	33.24	97.12
18	300.62	151.50	28	12.82	645.75	2	35.82	104.65
19	303.39	151.46	28	12.92	573.80	2	31.85	93.04
20	300.78	151.49	28	12.80	603.55	2	33.49	97.83
21	303.28	151.56	28	12.94	592.95	2	32.87	96.02
22	302.23	151.70	28	12.82	640.15	2	35.42	103.47
23	301.08	151.40	28	12.84	676.65	2	37.59	109.81
24	300.63	151.65	28	12.80	606.30	2	33.57	98.07
25	300.92	151.61	56	12.90	753.60	2	41.74	121.96
26	301.37	151.50	56	12.82	781.40	3	43.35	126.64
27	301.84	151.76	56	12.94	733.15	4	40.53	118.41
28	299.90	151.47	56	12.78	768.30	2	42.64	124.56
29	303.65	151.67	56	13.02	720.75	2	39.89	116.55
30	302.97	151.42	56	12.92	767.65	2	42.63	124.55
31	303.24	151.58	56	12.90	772.65	2	42.82	125.09
32	302.77	152.08	56	12.98	773.15	2	42.56	124.35
<b>Resistencia a los 28 días (MPa)</b>	34.23							

## Ensayos Mezcla N° 2: Cemento MM/A (E-C) – 28 con agregado de tajo

### Caracterización mezcla de concreto

Datos mezcla de concreto		Densidad concreto fresco ASTM C138	
Cemento utilizado	MM/A (E-C) - 28	Masa del recipiente (kg)	3.86
Agregado utilizado	Agregado de tajo	Masa del recipiente más concreto (kg)	20.02
Cantidad de cemento utilizado (kg)	73.40	Volumen del recipiente (L)	7.08
Cantidad de agua utilizada (kg)	42.84	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2281
Cantidad de arena utilizada (kg)	156.48	<b>Temperatura del concreto ASTM 1064</b>	
Cantidad de piedra utilizada (kg)	185.30	Temperatura (°C)	24.9
Datos laboratorio		Contenido de aire ASTM C231	
Fecha	23/10/2017	Contenido de aire (%)	1.3
Temperatura (°C)	26.0	Revenimiento ASTM C143	
Humedad relativa (%)	60.0	Revenimiento (mm)	120
pH agua	7.44	Adición de agua (kg)	0.00
Resistencia a la abrasión por el método de corte rotativo ASTM C944			
Fecha	20/11/2017		
Edad del concreto	28 días		
Descripción superficie	Concreto elaborado con cemento MM/A (E-C) - 28 y agregado de tajo		
Tipo de acabado	Superficies cortadas con sierra		
No. Muestra	1	2	3
Tamaño del espécimen (cm)	2.85	2.82	2.77
Masa antes del ensayo (g)	478.84	478.32	471.14
Resistencia promedio (MPa)	34.2		
Superficie ensayada	Cara superior de los especímenes		
Tiempo de abrasión	1 Lapso de 2 minutos por espécimen		
Carga de abrasión (N)	98.4		
Masa después del ensayo (g)	478.66	478.18	470.94
Masa pérdida (g)	0.18	0.14	0.20
Pérdida promedio (g)	0.17		

## Mezcla N° 2: Cemento MM/A (E-C) – 28 con agregado de tajo (cont.)

### Resistencia a la compresión simple en cilindros de concreto

No. Muestra	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Edad (días)	Peso (kg)	Resistencia (kN)	Tipo de falla observada	Resistencia a la compresión (MPa)	Porcentaje de resistencia (%)
1	306.51	151.44	3	12.72	329.75	2	18.31	53.51
2	305.26	151.78	3	12.66	343.10	2	18.96	55.43
3	305.78	151.38	3	12.66	320.90	2	17.83	52.12
4	304.65	151.62	3	12.66	345.65	2	19.14	55.96
5	306.00	151.29	3	12.66	351.10	2	19.53	57.09
6	306.02	151.43	3	12.68	336.50	2	18.68	54.61
7	305.52	151.66	3	12.70	329.45	2	18.24	53.31
8	306.77	151.45	3	12.70	357.95	2	19.87	58.08
9	303.66	151.73	7	12.70	459.70	2	25.42	74.32
10	302.50	151.42	7	12.58	436.65	2	24.25	70.88
11	302.48	151.46	7	12.58	447.85	2	24.86	72.66
12	302.76	151.70	7	12.58	424.55	2	23.49	68.66
13	304.96	151.24	7	12.68	440.65	2	24.53	71.70
14	302.25	151.34	7	12.62	473.05	2	26.30	76.87
15	302.71	151.52	7	12.66	441.95	2	24.51	71.64
16	304.36	151.66	7	12.64	449.25	2	24.87	72.69
<b>Resistencia a los 28 días (MPa)</b>	34.21							

## Mezcla N° 2: Cemento MM/A (E-C) – 28 con agregado de tajo (cont.)

### Resistencia a la compresión simple en cilindros de concreto

No. Muestra	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Edad (días)	Peso (kg)	Resistencia (kN)	Tipo de falla observada	Resistencia a la compresión (MPa)	Porcentaje de resistencia (%)
17	303.83	151.70	28	12.70	603.85	2	33.41	97.65
18	304.67	151.25	28	12.66	648.85	4	36.11	105.56
19	302.52	151.74	28	12.60	629.45	2	34.81	101.74
20	303.64	151.44	28	12.64	657.15	4	36.48	106.64
21	303.57	151.70	28	12.66	585.40	4	32.39	94.67
22	303.85	151.35	28	12.64	596.25	2	33.14	96.88
23	304.07	151.73	28	12.72	567.65	2	31.39	91.76
24	303.72	151.52	28	12.62	648.30	4	35.95	105.09
25	305.22	151.43	56	12.72	649.70	2	36.07	105.45
26	305.38	151.24	56	12.70	651.95	3	36.29	106.08
27	305.55	151.47	56	12.76	687.40	4	38.15	111.51
28	305.72	151.38	56	12.68	688.35	2	38.24	111.79
29	304.05	151.34	56	12.66	689.35	4	38.32	112.01
30	305.73	151.32	56	12.70	642.90	2	35.75	104.50
31	305.42	151.60	56	12.70	645.15	3	35.74	104.47
32	304.41	151.42	56	12.68	669.90	3	37.20	108.75
<b>Resistencia a los 28 días (MPa)</b>	34.21							

### Ensayos Mezcla N° 3: Cemento MM/B (P-C) – 28 con agregado de río

#### Caracterización mezcla de concreto

Datos mezcla de concreto		Densidad concreto fresco ASTM C138	
Cemento utilizado	MM/B (P-C) - 28	Masa del recipiente (kg)	3.86
Agregado utilizado	Agregado de río	Masa del recipiente más concreto (kg)	20.40
Cantidad de cemento utilizado (kg)	73.42	Volumen del recipiente (L)	7.08
Cantidad de agua utilizada (kg)	42.06	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2335
Cantidad de arena utilizada (kg)	160.06	<b>Temperatura del concreto ASTM 1064</b>	
Cantidad de piedra utilizada (kg)	181.86	Temperatura (°C)	26.0
Datos laboratorio		Contenido de aire ASTM C231	
Fecha	02/10/2017	Contenido de aire (%)	1.6
Temperatura (°C)	26.0	Revenimiento ASTM C143	
Humedad relativa (%)	60.0	Revenimiento (mm)	110
pH agua	7.44	Adición de agua (kg)	3.36
Resistencia a la abrasión por el método de corte rotativo ASTM C944			
Fecha	30/10/2017		
Edad del concreto	28 días		
Descripción superficie	Concreto elaborado con cemento MM/B (P-C) - 28 y agregado de río		
Tipo de acabado	Superficies cortadas con sierra		
No. Muestra	1	2	3
Tamaño del espécimen (cm)	2.82	2.58	2.75
Masa antes del ensayo (g)	392.93	361.44	406.17
Resistencia promedio (MPa)	29.7		
Superficie ensayada	Cara superior de los especímenes		
Tiempo de abrasión	1 Lapso de 2 minutos por espécimen		
Carga de abrasión (N)	89.2		
Masa después del ensayo (g)	392.25	360.92	405.09
Masa pérdida (g)	0.68	0.52	1.08
Pérdida promedio (g)	0.76		

### Mezcla N° 3: Cemento MM/B (P-C) – 28 con agregado de río (cont.)

#### Resistencia a la compresión simple en cilindros de concreto

No. Muestra	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Edad (días)	Peso (kg)	Resistencia (kN)	Tipo de falla observada	Resistencia a la compresión (MPa)	Porcentaje de resistencia (%)
1	301.13	151.70	7	12.72	381.00	4	21.08	70.97
2	304.66	151.64	7	12.90	396.80	3	21.97	73.97
3	305.20	151.83	7	12.90	400.00	3	22.09	74.39
4	302.10	151.13	7	12.74	346.00	3	19.29	64.94
5	301.65	151.52	7	12.74	440.90	3	24.45	82.32
6	303.73	151.84	7	12.84	457.80	3	25.28	85.12
7	301.04	152.14	7	12.74	367.55	3	20.22	68.07
8	304.75	151.75	7	12.94	437.90	3	24.21	81.52
9	304.62	151.71	15	12.90	503.15	4	27.83	93.71
10	304.40	151.63	15	12.88	433.90	4	24.03	80.90
11	302.23	151.70	15	12.74	492.85	4	27.27	91.80
12	301.60	152.28	15	12.84	559.75	4	30.73	103.47
13	305.55	151.76	15	12.94	469.85	4	25.98	87.46
14	303.58	151.59	15	12.84	529.85	4	29.36	98.84
15	300.55	151.54	15	12.72	470.30	2	26.08	87.79
16	303.01	151.64	15	12.78	485.90	4	26.90	90.58
<b>Resistencia a los 28 días (MPa)</b>	29.70							



### Mezcla N° 3: Cemento MM/B (P-C) – 28 con agregado de río (cont.)

#### Resistencia a la compresión simple en cilindros de concreto

No. Muestra	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Edad (días)	Peso (kg)	Resistencia (kN)	Tipo de falla observada	Resistencia a la compresión (MPa)	Porcentaje de resistencia (%)
17	304.30	151.69	28	12.86	561.50	4	31.07	104.61
18	303.61	151.55	28	12.84	539.70	2	29.92	100.73
19	302.41	151.70	28	12.80	512.35	2	28.35	95.44
20	303.34	151.42	28	12.82	538.20	2	29.89	100.62
21	302.08	151.32	28	12.86	515.15	2	28.65	96.45
22	303.58	151.27	28	12.90	530.40	2	29.51	99.37
23	302.08	152.10	28	12.82	536.60	2	29.53	99.43
24	304.87	151.79	28	12.92	555.50	2	30.70	103.35
25	306.60	151.48	56	12.94	603.90	3	33.51	112.82
26	304.41	151.45	56	12.88	664.35	2	36.88	124.16
27	306.64	151.47	56	12.96	633.00	2	35.13	118.27
28	306.98	151.36	56	13.00	589.95	2	32.79	110.39
29	304.71	151.57	56	12.90	589.10	2	32.65	109.93
30	305.27	151.41	56	12.88	651.40	2	36.18	121.81
31	306.28	151.27	56	12.88	623.90	1	34.72	116.88
32	307.80	151.54	56	13.00	588.50	2	32.63	109.85
<b>Resistencia a los 28 días (MPa)</b>	29.70							

## Ensayos Mezcla N° 4: Cemento MM/B (P-C) – 28 con agregado de tajo

### Caracterización mezcla de concreto

Datos mezcla de concreto		Densidad concreto fresco ASTM C138	
Cemento utilizado	MM/B (P-C) - 28	Masa del recipiente (kg)	3.86
Agregado utilizado	Agregado de tajo	Masa del recipiente más concreto (kg)	19.94
Cantidad de cemento utilizado (kg)	73.40	Volumen del recipiente (L)	7.08
Cantidad de agua utilizada (kg)	43.00	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2270
Cantidad de arena utilizada (kg)	156.48	<b>Temperatura del concreto ASTM 1064</b>	
Cantidad de piedra utilizada (kg)	185.30	Temperatura (°C)	24.9
Datos laboratorio		Contenido de aire ASTM C231	
Fecha	18/10/2017	Contenido de aire (%)	1.7
Temperatura (°C)	25.6	Revenimiento ASTM C143	
Humedad relativa (%)	62.3	Revenimiento (mm)	100
pH agua	7.38	Adición de agua (kg)	2.00
Resistencia a la abrasión por el método de corte rotativo ASTM C944			
Fecha	15/11/2017		
Edad del concreto	28 días		
Descripción superficie	Concreto elaborado con cemento MM/B (P-C) - 28 y agregado de tajo		
Tipo de acabado	Superficies cortadas con sierra		
No. Muestra	1	2	3
Tamaño del espécimen (cm)	2.82	2.95	2.87
Masa antes del ensayo (g)	483.34	485.29	491.01
Resistencia promedio (MPa)	27.7		
Superficie ensayada	Cara superior de los especímenes		
Tiempo de abrasión	1 Lapso de 2 minutos por espécimen		
Carga de abrasión (N)	98.4		
Masa después del ensayo (g)	482.86	485.14	490.69
Masa pérdida (g)	0.48	0.15	0.32
Pérdida promedio (g)	0.32		

### Mezcla N° 4: Cemento MM/B (P-C) – 28 con agregado de tajo (cont.)

Resistencia a la compresión simple en cilindros de concreto

No. Muestra	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Edad (días)	Peso (kg)	Resistencia (kN)	Tipo de falla observada	Resistencia a la compresión (MPa)	Porcentaje de resistencia (%)
1	302.95	151.60	7	12.56	421.55	2	23.35	84.25
2	304.31	151.53	7	12.58	396.50	2	21.99	79.31
3	302.22	151.58	7	12.50	424.25	2	23.51	84.81
4	303.55	151.33	7	12.54	412.40	2	22.93	82.71
5	303.96	151.50	7	12.64	406.00	2	22.52	81.25
6	303.17	151.42	7	12.54	421.00	2	23.38	84.34
7	304.94	151.30	7	12.62	389.65	4	21.67	78.18
8	302.89	151.68	7	12.62	411.30	2	22.76	82.11
9	304.41	151.68	14	12.54	424.00	2	23.46	84.65
10	304.77	151.88	14	12.60	454.30	2	25.07	90.46
11	306.65	151.77	14	12.70	419.00	2	23.16	83.56
12	306.33	151.49	14	12.66	437.40	2	24.27	87.54
13	305.01	151.53	14	12.66	416.80	4	23.11	83.38
14	304.90	151.37	14	12.62	433.50	2	24.09	86.90
15	305.14	151.50	14	12.60	455.95	2	25.29	91.24
16	305.03	151.52	14	12.60	422.30	4	23.42	84.49
<b>Resistencia a los 28 días (MPa)</b>	27.72							

### Mezcla N° 4: Cemento MM/B (P-C) – 28 con agregado de tajo (cont.)

Resistencia a la compresión simple en cilindros de concreto

No. Muestra	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Edad (días)	Peso (kg)	Resistencia (kN)	Tipo de falla observada	Resistencia a la compresión (MPa)	Porcentaje de resistencia (%)
17	301.65	151.38	28	12.48	511.95	2	28.44	102.61
18	303.74	151.62	28	12.60	502.10	2	27.81	100.32
19	302.96	151.27	28	12.54	495.85	2	27.59	99.53
20	302.64	151.60	28	12.52	510.70	2	28.29	102.07
21	304.69	151.46	28	12.64	505.55	2	28.06	101.22
22	303.40	151.45	28	12.58	485.60	2	26.96	97.24
23	303.77	151.49	28	12.58	491.25	2	27.25	98.32
24	302.57	151.42	28	12.56	492.60	2	27.36	98.68
25	305.55	151.52	56	12.64	525.15	2	29.12	105.06
26	305.19	151.56	56	12.64	529.00	2	29.32	105.78
27	305.78	151.92	56	12.72	519.85	4	28.68	103.46
28	305.70	151.58	56	12.64	539.25	2	29.88	107.80
29	304.67	151.57	56	12.60	537.30	2	29.78	107.42
30	306.86	151.49	56	12.72	518.05	2	28.74	103.69
31	306.95	151.58	56	12.70	522.45	2	28.95	104.45
32	304.18	151.57	56	12.54	529.00	4	29.32	105.77
<b>Resistencia a los 28 días (MPa)</b>	27.72							

## Ensayos Mezcla N° 5: Cemento MP AR – A con agregado de río

### Caracterización mezcla de concreto

Datos mezcla de concreto		Densidad concreto fresco ASTM C138	
Cemento utilizado	MP A – AR	Masa del recipiente (kg)	3.86
Agregado utilizado	Agregado de río	Masa del recipiente más concreto (kg)	20.06
Cantidad de cemento utilizado (kg)	73.40	Volumen del recipiente (L)	7.08
Cantidad de agua utilizada (kg)	44.00	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2287
Cantidad de arena utilizada (kg)	160.06	<b>Temperatura del concreto ASTM 1064</b>	
Cantidad de piedra utilizada (kg)	182.34	Temperatura (°C)	24.5
Datos laboratorio		Contenido de aire ASTM C231	
Fecha	20/11/2017	Contenido de aire (%)	2.0
Temperatura (°C)	21.6	Revenimiento ASTM C143	
Humedad relativa (%)	67.7	Revenimiento (mm)	140
pH agua	7.63	Adición de agua (kg)	0.00
Resistencia a la abrasión por el método de corte rotativo ASTM C944			
Fecha	18/12/2017		
Edad del concreto	28 días		
Descripción superficie	Concreto elaborado con cemento MP A - AR y agregado de río		
Tipo de acabado	Superficies cortadas con sierra		
No. Muestra	1	2	3
Tamaño del espécimen (cm)	3.31	3.26	2.99
Masa antes del ensayo (g)	487.86	479.22	449.99
Resistencia promedio (MPa)	39.7		
Superficie ensayada	Cara superior de los especímenes		
Tiempo de abrasión	1 Lapso de 2 minutos por espécimen		
Carga de abrasión (N)	98.4		
Masa después del ensayo (g)	487.36	478.90	449.77
Masa pérdida (g)	0.50	0.32	0.22
Pérdida promedio (g)	0.35		

### Mezcla N° 5: Cemento MP AR – A con agregado de río (cont.)

#### Resistencia a la compresión simple en cilindros de concreto

No. Muestra	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Edad (días)	Peso (kg)	Resistencia (kN)	Tipo de falla observada	Resistencia a la compresión (MPa)	Porcentaje de resistencia (%)
1	303.12	151.78	3	12.82	431.95	2	23.87	60.12
2	304.22	151.94	3	12.84	423.05	2	23.33	58.76
3	303.69	151.51	3	12.76	420.45	2	23.32	58.73
4	303.91	151.72	3	12.80	373.50	2	20.66	52.03
5	304.02	152.13	3	12.82	378.60	2	20.83	52.45
6	304.10	151.82	3	12.78	425.85	2	23.52	59.24
7	305.26	151.47	3	12.82	403.65	2	22.40	56.42
8	304.70	151.43	3	12.84	380.60	2	21.13	53.22
9	305.35	151.66	7	12.88	543.70	2	30.10	75.80
10	304.87	151.31	7	12.84	522.05	2	29.03	73.11
11	305.44	151.58	7	12.86	556.30	2	30.83	77.64
12	306.79	151.45	7	12.90	582.35	2	32.32	81.41
13	305.48	151.67	7	12.82	572.90	2	31.71	79.86
14	307.08	151.61	7	12.90	549.30	2	30.43	76.63
15	306.15	151.68	7	12.86	545.20	3	30.17	75.98
16	305.48	151.73	7	12.84	561.86	2	31.08	78.26
<b>Resistencia a los 28 días (MPa)</b>	39.71							

### Mezcla N° 5: Cemento MP AR – A con agregado de río (cont.)

#### Resistencia a la compresión simple en cilindros de concreto

No. Muestra	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Edad (días)	Peso (kg)	Resistencia (kN)	Tipo de falla observada	Resistencia a la compresión (MPa)	Porcentaje de resistencia (%)
17	303.54	151.74	28	12.82	742.75	4	41.07	103.43
18	303.85	151.36	28	12.80	735.35	3	40.87	102.92
19	302.23	151.33	28	12.76	739.65	4	41.12	103.56
20	304.64	151.48	28	12.86	692.60	2	38.43	96.78
21	302.93	151.72	28	12.82	710.75	2	39.31	99.01
22	303.79	151.36	28	12.76	706.30	2	39.25	98.85
23	304.45	151.38	28	12.84	694.00	4	38.56	97.11
24	304.66	151.44	28	12.82	703.45	2	39.05	98.35
25	302.50	151.75	56	12.78	796.50	4	44.04	110.91
26	303.72	151.15	56	12.74	786.85	2	43.85	110.44
27	302.83	151.48	56	12.74	772.85	2	42.88	108.00
28	303.01	151.44	56	12.80	728.80	2	40.46	101.90
29	304.08	151.39	56	12.82	734.50	4	40.80	102.76
30	302.34	151.42	56	12.76	789.60	2	43.85	110.43
31	304.36	151.55	56	12.86	727.75	3	40.34	101.60
32	303.37	151.42	56	12.78	775.20	4	43.05	108.41
<b>Resistencia a los 28 días (MPa)</b>	39.71							

## Ensayos Mezcla N° 6: Cemento MP AR – A con agregado de tajo

### Caracterización mezcla de concreto

Datos mezcla de concreto		Densidad concreto fresco ASTM C138	
Cemento utilizado	MP A – AR	Masa del recipiente (kg)	3.86
Agregado utilizado	Agregado de tajo	Masa del recipiente más concreto (kg)	19.92
Cantidad de cemento utilizado (kg)	73.40	Volumen del recipiente (L)	7.08
Cantidad de agua utilizada (kg)	42.36	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2267
Cantidad de arena utilizada (kg)	156.48	<b>Temperatura del concreto ASTM 1064</b>	
Cantidad de piedra utilizada (kg)	185.30	Temperatura (°C)	25.1
Datos laboratorio		Contenido de aire ASTM C231	
Fecha	13/11/2017	Contenido de aire (%)	1.9
Temperatura (°C)	27.3	<b>Revenimiento ASTM C143</b>	
Humedad relativa (%)	62.3	Revenimiento (mm)	100
pH agua	7.43	Adición de agua (kg)	0.00
Resistencia a la abrasión por el método de corte rotativo ASTM C944			
Fecha	11/12/2017		
Edad del concreto	28 días		
Descripción superficie	Concreto elaborado con cemento MP A - AR y agregado de tajo		
Tipo de acabado	Superficies cortadas con sierra		
No. Muestra	1	2	3
Tamaño del espécimen (cm)	3.06	3.23	3.29
Masa antes del ensayo (g)	447.86	474.69	474.92
Resistencia promedio (MPa)	36.0		
Superficie ensayada	Cara superior de los especímenes		
Tiempo de abrasión	1 Lapso de 2 minutos por espécimen		
Carga de abrasión (N)	98.4		
Masa después del ensayo (g)	447.86	474.69	474.92
Masa pérdida (g)	0.20	0.24	0.36
Pérdida promedio (g)	0.27		



### Mezcla N° 6: Cemento MP AR – A con agregado de tajo (cont.)

#### Resistencia a la compresión simple en cilindros de concreto

No. Muestra	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Edad (días)	Peso (kg)	Resistencia (kN)	Tipo de falla observada	Resistencia a la compresión (MPa)	Porcentaje de resistencia (%)
1	305.33	151.59	3	12.56	396.40	2	21.96	60.96
2	304.80	151.49	3	12.58	412.25	3	22.87	63.47
3	305.59	151.68	3	12.60	402.00	2	22.25	61.75
4	304.54	151.18	3	12.52	421.75	2	23.50	65.21
5	305.45	151.61	3	12.64	390.60	2	21.64	60.05
6	305.19	151.63	3	12.56	399.20	3	22.11	61.35
7	306.33	151.74	3	12.62	390.65	3	21.60	59.95
8	305.62	151.63	3	12.62	397.20	2	22.00	61.04
9	306.31	151.59	7	12.58	541.10	4	29.98	83.21
10	306.98	151.77	7	12.68	520.95	2	28.80	79.92
11	307.75	151.56	7	12.66	484.75	2	26.87	74.57
12	308.93	151.38	7	12.70	512.85	2	28.49	79.08
13	307.42	151.56	7	12.66	535.55	2	29.69	82.38
14	306.83	151.50	7	12.64	499.50	2	27.71	76.90
15	307.04	151.46	7	12.62	525.60	2	29.17	80.96
16	305.76	151.63	7	12.60	538.00	2	29.79	82.68
<b>Resistencia a los 28 días (MPa)</b>	36.03							

### Mezcla N° 6: Cemento MP AR – A con agregado de tajo (cont.)

#### Resistencia a la compresión simple en cilindros de concreto

No. Muestra	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Edad (días)	Peso (kg)	Resistencia (kN)	Tipo de falla observada	Resistencia a la compresión (MPa)	Porcentaje de resistencia (%)
17	304.24	151.36	28	12.58	669.20	2	37.19	103.21
18	304.63	151.34	28	12.58	693.45	2	38.55	106.99
19	305.31	151.39	28	12.60	623.95	2	34.66	96.20
20	303.80	151.48	28	12.54	626.00	3	34.74	96.41
21	303.83	151.42	28	12.56	627.75	2	34.86	96.75
22	305.04	151.45	28	12.58	643.15	2	35.70	99.09
23	304.08	151.50	28	12.54	661.95	3	36.72	101.91
24	303.81	151.50	28	12.60	645.95	3	35.83	99.44
25	303.19	151.36	56	12.52	673.70	3	37.44	103.92
26	304.24	151.40	56	12.58	653.30	3	36.29	100.71
27	303.37	151.53	56	12.60	649.80	3	36.03	100.00
28	303.60	151.74	56	12.58	655.45	2	36.25	100.59
29	303.60	151.44	56	12.54	656.95	2	36.47	101.22
30	302.39	151.23	56	12.50	646.90	2	36.01	99.94
31	303.22	151.44	56	12.54	664.95	3	36.92	102.46
32	304.43	151.85	56	12.64	692.10	2	38.22	106.07
<b>Resistencia a los 28 días (MPa)</b>	36.03							

## Apéndice C. Diseño de mezcla

### Mezclas de concreto con agregado de río

Características agregado grueso	
Peso suelto (kg/m <sup>3</sup> )	1460
Peso envarillado (kg/m <sup>3</sup> )	1557
Gs	2.77
GBss	2.68
Gbs	2.63
% Absorción	1.8
Humedad (%)	1.71
Tamaño máximo nominal (mm)	16

Características agregado fino	
Peso suelto (kg/m <sup>3</sup> )	1517
Peso envarillado (kg/m <sup>3</sup> )	1630
Gs	2.77
GBss	2.59
Gbs	2.49
% Absorción	4.0
Humedad (%)	1.40
Módulo de finura	2.96

Diseño de mezcla para 1 m <sup>3</sup> de concreto		
	Sin corrección por humedad	Con corrección por humedad
Cemento (kg)	361.50	361.50
Agua (kg)	206.92	185.63
Arena (kg)	778.27	791.58
Piedra (kg)	883.90	896.27

Cantidad de material requerido por batida		
	Sin corrección por humedad	Con corrección por humedad
Cemento (kg)	73.37	73.37
Agua (kg)	42.00	37.68
Arena (kg)	157.95	160.66
Piedra (kg)	179.39	181.90

### Mezcla de concreto con agregado de tajo

<b>Características agregado grueso</b>	
Peso suelto (kg/m <sup>3</sup> )	1447
Peso envarillado (kg/m <sup>3</sup> )	1523
Gs	2.66
GBss	2.60
Gbs	2.56
% Absorción	1.4
Humedad (%)	1.12
Tamaño máximo nominal (mm)	16

<b>Características agregado fino</b>	
Peso suelto (kg/m <sup>3</sup> )	1516
Peso envarillado (kg/m <sup>3</sup> )	1645
Gs	2.69
GBss	2.60
GBs	2.55
% Absorción	2.1
Humedad (%)	2.13
Módulo de finura	2.77

<b>Diseño de mezcla para 1 m<sup>3</sup> de concreto</b>		
	Sin corrección por humedad	Con corrección por humedad
Cemento (kg)	361.50	361.50
Agua (kg)	206.92	205.21
Arena (kg)	754.89	770.97
Piedra (kg)	902.67	912.78

<b>Cantidad de material requerido por batida</b>		
	Sin corrección por humedad	Con corrección por humedad
Cemento (kg)	73.37	73.37
Agua (kg)	42.00	41.65
Arena (kg)	153.21	156.47
Piedra (kg)	183.20	185.25

## Apéndice D. Equivalencias normas ASTM - INTECO

<b>Norma ASTM</b>	<b>Norma INTECO</b>
ASTM C29	INTE C58
ASTM C31	INTE C19
ASTM C33	INTE C15
ASTM C39	INTE C39
ASTM C40	INTE C59
ASTM C42	INTE C47
ASTM C109	INTE C57
ASTM C117	INTE C49
ASTM C125	INTE C20
ASTM C127	INTE C68
ASTM C128	INTE C69
ASTM C131	INTE C64
ASTM C136	INTE C46
ASTM C138	INTE C72
ASTM C143	INTE C41
ASTM C172	INTE C17
ASTM C187	INTE C139
ASTM C188	INTE C141
ASTM C191	INTE C137
ASTM C192	INTE C18
ASTM C231	INTE C42
ASTM C305	INTE C144
ASTM C430	INTE C142
ASTM C1064	INTE C43
ASTM C1231	INTE C22
ASTM C1437	INTE C143
ASTM D75	INTE C67
ASTM D5821	INTE C29