

Universidad de Costa Rica

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

**Evaluación de las propiedades de concretos de mediana resistencia producidos
con insumos disponibles en Costa Rica.**

Trabajo de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Bryan Solís Madrigal

Director del Proyecto de Graduación:

Ing. Alejandro Navas Carro, MSc.

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

**Miembros del comité asesor
y sustentante**



Director: Ing. Alejandro Navas Carro, MSc.



Asesor: Ing. Luis Carlos Meseguer Quesada, MBA.



Asesor: Ing. Erich Neurohr Bustamante, M.S.E., M.Sc.



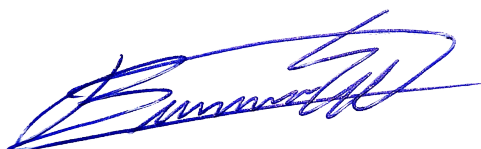
Sustentante: Bryan Solís Madrigal

Derechos de autor

Fecha: 2021, febrero, 18

El suscrito, Bryan Alberto Solís Madrigal, cédula 1-1668-0686, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné B57033, manifiesta que es autor (a) del Proyecto Final de Graduación **Evaluación de las propiedades de concretos de mediana resistencia producidos con insumos disponibles en Costa Rica**, bajo la Dirección del Ing. Alejandro Navas Carro 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 el 02 de julio de 2001); "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.

Dedicatoria

A mi familia, grandes personas quienes con su esfuerzo, dedicación y apoyo continuo me han ayudado a cumplir todas mis metas y a convertirme en una mejor persona.

Agradecimientos

A Dios, por la oportunidad de estudiar, la salud, el entendimiento, la fuerza de voluntad y las personas que puso en mi camino para guiarme y apoyarme en mi vida.

A mis padres, Gustavo Solís Sandí y M^a del Rocío Madrigal Madrigal por su esfuerzo diario y darme el apoyo y la educación que me ayudaron con la conclusión de esta etapa de mi vida.

A mi novia, Dayana Vásquez Mata, por su paciencia, constante motivación y apoyo incondicional durante toda mi vida universitaria.

A los miembros del Comité Asesor, el Ing. Alejandro Navas Carro, el Ing. Luis Carlos Meseguer Quesada y el Ing. Erich Neurohr Bustamante, quienes con su experiencia y conocimiento guiaron mi investigación brindando sus recomendaciones y aportes para elaborar un buen trabajo de investigación.

A mis compañeros de carrera y amigos con quienes compartí esta experiencia y quienes me ayudaron desinteresadamente para hacer frente a los retos que se nos presentaron durante la carrera.

Al LanammeUCR y su personal técnico del Laboratorio de Concreto y Agregados por su colaboración, disposición, y consejos brindados para asegurar la ejecución correcta de los ensayos y la validez de los resultados de esta investigación.

Finalmente, a Luis Ernesto Baltodano Segura de la empresa Cemex, a Andrés Haug de Agregados Guápiles y a Olman Araya de agregados Cerro Minas, por la donación de los materiales utilizados para la elaboración de esta investigación.

Índice

1	Introducción.....	1
1.1	Justificación.....	1
1.1.1	Problema específico	1
1.1.2	Importancia	2
1.2	Antecedentes.....	2
1.3	Objetivos.....	5
1.3.1	Objetivo general.....	5
1.3.2	Objetivos específicos.....	5
1.4	Delimitación del Problema.....	5
1.4.1	Alcances	5
1.4.2	Limitaciones.....	6
1.5	Descripción de la metodología a utilizar	8
2	Marco Teórico	12
2.1	Componentes del concreto.....	12
2.1.1	Cemento hidráulico.....	12
2.1.2	Cemento hidráulico en Costa Rica	13
2.1.3	Agregados	15
2.1.4	Agua de mezcla.....	16
2.1.5	Aditivos	17
2.2	Propiedades del concreto fresco	17
2.2.1	Asentamiento.....	17
2.2.2	Peso Unitario.....	18
2.2.3	Contenido de aire	19
2.2.4	Temperatura.....	19
2.3	Propiedades del concreto endurecido.....	20

2.3.1	Resistencia a la compresión.....	20
2.3.2	Desarrollo de la resistencia en el tiempo.....	21
2.3.3	Resistencia a la tracción.....	22
2.3.4	Módulo de elasticidad	23
2.3.5	Durabilidad del concreto	24
3	Desarrollo Experimental	25
3.1	Agregados gruesos.....	25
3.2	Agregados finos	29
3.3	Cemento	33
3.4	Diseño de mezcla.....	34
3.5	Mezclas de concreto.....	36
3.6	Ensayos a concreto endurecido	39
3.6.1	Concreto de 210 kg/cm ² con agregados de Guápiles.....	41
3.6.2	Concreto de 210 kg/cm ² con agregados de Cerro Minas.....	45
3.6.3	Concreto de 280 kg/cm ² con agregados de Guápiles.....	48
3.6.4	Concreto de 280 kg/cm ² con agregados de Cerro Minas.....	56
3.6.5	Concreto de 350 kg/cm ² con agregados de Guápiles.....	59
3.6.6	Concreto de 350 kg/cm ² con agregados de Cerro Minas.....	63
3.6.7	Concreto de 420 kg/cm ² con agregados de Guápiles.....	67
3.6.8	Concreto de 420 kg/cm ² con agregados de Cerro Minas.....	70
4	Análisis de Resultados.....	73
4.1	Concreto fresco.....	73
4.2	Resistencia a la compresión	77
4.2.1	Variación de resultados	77
4.2.2	Resistencia a la compresión según relación agua/cemento	78
4.2.3	Desarrollo de resistencia	84

4.2.4	Eficiencia de dosificación	87
4.3	Resistencia a la tracción	90
4.4	Módulo de elasticidad	94
5	Conclusiones y recomendaciones	101
5.1	Conclusiones	101
5.2	Recomendaciones	103
6	Anexos	107
	Anexo A. Caracterización de agregados.....	107
	Anexo A.1. Resultados de gravedad específica y absorción de agregados gruesos según INTE C68.....	107
	Anexo A.2. Resultados de gravedad específica y absorción de agregados finos según INTE C69	108
	Anexo A.3. Resultados de densidad masiva de agregados según INTE C58.....	109
	Anexo A.4. Granulometría de agregados gruesos según INTE C46	110
	Anexo A.5. Granulometría de agregados finos según INTE C46.....	111
	Anexo B. Caracterización del cemento	112
	Anexo B.1. Densidad del cemento hidráulico según INTE C141.....	112
	Anexo B.2. Consistencia normal del cemento hidráulico según INTE C139	112
	Anexo B.3. Tiempo de fragua por Aguja de Vicat según INTE C137.....	112
	Anexo B.4. Flujo de mortero de cemento hidráulico según INTE C143.....	113
	Anexo B.5. Resistencia a la compresión de cubos de mortero según INTE C57.....	113
	Anexo C. Diseños de mezcla	114
	Anexo C.1. Detalle de diseño de concreto tipo G210	114
	Anexo C.2. Detalle de diseño de concreto tipo G280	115
	Anexo C.3. Detalle de diseño de concreto tipo G350	116
	Anexo C.4. Detalle de diseño de concreto tipo G420	117

Anexo C.5. Detalle de diseño de concreto tipo CM210 Mezcla 1	118
Anexo C.6. Detalle de diseño de concreto tipo CM210 Mezcla 2	119
Anexo C.7. Detalle de diseño de concreto tipo CM280 Mezcla 1	120
Anexo C.8. Detalle de diseño de concreto tipo CM280 Mezcla 2	121
Anexo C.9. Detalle de diseño de concreto tipo CM350 Mezcla 1	122
Anexo C.10. Detalle de diseño de concreto tipo CM350 Mezcla 2	123
Anexo C.11. Detalle de diseño de concreto tipo CM420	124
Anexo D. Resultados de resistencia a la compresión de cilindros	124
Anexo D.1. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto producidos con agregados de Guápiles	124
Anexo D.2. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto producidos con agregados de Cerro Minas	129
Anexo E. Resultados de resistencia a la tracción	133
Anexo E.1. Resultados de resistencia a la tracción de concretos producidos con agregados de Guápiles	133
Anexo E.2. Resistencia a la tracción para concretos producidos con agregados de Cerro Minas	134
Anexo F. Resultados de ensayo de módulo de elasticidad	135
Anexo F.1. Resultados de módulo de elasticidad para concretos producidos con agregados de Guápiles	135
Anexo F.2. Resultados de módulo de elasticidad para concretos producidos con agregados de Cerro Minas	138
Anexo G. Detalle de resultados de regresiones	141
Anexo G.1. Regresión múltiple de Asentamiento en función del contenido de agua y la relación agua/cemento de la mezcla	141
Anexo G.2. Regresión de resistencia a la compresión según la relación agua/cemento para los todos los resultados	142

Anexo G.3. Regresión de resistencia a la compresión según la relación agua/cemento para los concretos con agregados de Guápiles.....	144
Anexo G.4. Regresión de resistencia a la compresión según la relación agua/cemento para los concretos con agregados de Cerro Minas.....	146
Anexo G.5. Regresión de Módulo de Elasticidad según la resistencia a la compresión a la misma edad de falla.....	148
Anexo G.6. Regresión de resistencia a la tracción según la resistencia a la compresión a la misma edad de falla.....	150
Anexo H. Detalle de resultados de Análisis de Varianza	151
Anexo H.1. Análisis de varianza y prueba Tukey para resultados de módulo de elasticidad según edades de falla.	151
Anexo H.2. Análisis de varianza y prueba Tukey para resultados de resistencia a la tracción según edades de falla.	152

Índice de cuadros

Cuadro 1: Cuadro resumen de la cantidad de cilindros moldeados para la investigación	6
Cuadro 2: Tipos de cementos hidráulicos.	14
Cuadro 3: Composición de los cementos hidráulicos para su clasificación.	14
Cuadro 4: Características físicas de los cementos hidráulicos.....	15
Cuadro 5: Resistencia a la compresión	15
Cuadro 6: Clasificación y función de aditivos para concreto.....	17
Cuadro 7: Resultados de granulometría de piedra de Cerro Minas.	27
Cuadro 8: Resultados de granulometría de piedra de Guápiles.	27
Cuadro 9: Resultados del ensayo de absorción y gravedad específica de agregados gruesos (INTE C68).....	28
Cuadro 10: Resultados del ensayo de densidad masiva (peso unitario) de agregados gruesos (INTE C58).....	29
Cuadro 11: Resultados de granulometría de arena de Cerro Minas.	30
Cuadro 12: Resultados de granulometría de arena de Guápiles	31

Cuadro 13: Resultados del ensayo de absorción y gravedad específica de agregados finos (INTE C69)	33
Cuadro 14: Resultados del ensayo de densidad masiva (peso unitario) de agregados finos (INTE C58)	33
Cuadro 15: Resultados de consistencia normal y tiempo de fragua del cemento Cemex de uso general.	33
Cuadro 16: Resultados de flujo de mortero de cemento Cemex de Uso General.....	34
Cuadro 17: Resultados de resistencia a la compresión de mortero de cemento Cemex de Uso General	34
Cuadro 18: Proporciones de diseños de mezcla iniciales para mezclas de prueba por fuente de agregado.....	35
Cuadro 19: Proporciones de diseños de mezcla por resistencia y muestra para mezclas producidas con agregados de Guápiles.....	36
Cuadro 20: Proporciones de diseños de mezcla por resistencia y muestra para mezclas producidas con agregados de Cerro Minas.....	36
Cuadro 21: Propiedades del concreto fresco para mezcla de prueba con agregados de Guápiles.	38
Cuadro 22: Resistencia a la compresión de mezcla de prueba con agregados de Guápiles. ..	38
Cuadro 23: Propiedades del concreto fresco para mezcla de prueba con agregados de Cerro Minas.	38
Cuadro 24: Resistencia a la compresión de mezcla de prueba con agregados de Cerro Minas.	39
Cuadro 25: Resultado de ensayos al concreto fresco G210.....	41
Cuadro 26: Resultados de resistencia a la compresión simple G210	42
Cuadro 27: Resultados de resistencia a tracción y porcentaje respecto a resistencia a compresión G210	43
Cuadro 28: Resultados de módulo de elasticidad y resistencia a compresión respectiva G210	43
Cuadro 29: Resultado de ensayos al concreto fresco CM210	45
Cuadro 30: Resultados de resistencia a la compresión simple CM210.....	45
Cuadro 31: Resultados de resistencia a tracción y porcentaje respecto a resistencia a compresión CM210.....	46

Cuadro 32: Resultados de módulo de elasticidad y resistencia a compresión respectiva CM210	46
Cuadro 33: Resultado de ensayos al concreto fresco G280 D1.....	48
Cuadro 34: Resultados de resistencia a la compresión simple G280 D1	49
Cuadro 35: Resultados de resistencia a tracción y porcentaje respecto a resistencia a compresión G280D1	50
Cuadro 36: Resultados de módulo de elasticidad y resistencia a compresión respectiva G280D1	50
Cuadro 37: Resultado de ensayos al concreto fresco G280 D2.....	52
Cuadro 38: Resultados de resistencia a la compresión simple G280 D2	53
Cuadro 39: Resultados de resistencia a tracción y porcentaje respecto a resistencia a compresión G280D2	53
Cuadro 40: Resultados de módulo de elasticidad y resistencia a compresión respectiva G280D2	54
Cuadro 41: Resultado de ensayos al concreto fresco CM280	56
Cuadro 42: Resultados de resistencia a la compresión simple CM280.....	57
Cuadro 43: Resultados de resistencia a tracción y porcentaje respecto a resistencia a compresión CM280.....	58
Cuadro 44: Resultados de módulo de elasticidad y resistencia a compresión respectiva CM280	58
Cuadro 45: Resultado de ensayos al concreto fresco G350.....	59
Cuadro 46: Resultados de resistencia a la compresión simple G350	60
Cuadro 47: Resultados de resistencia a tracción y porcentaje respecto a resistencia a compresión G350	61
Cuadro 48: Resultados de módulo de elasticidad y resistencia a compresión respectiva G350	61
Cuadro 49: Resultado de ensayos al concreto fresco CM350	63
Cuadro 50: Resultados de resistencia a la compresión simple CM350.....	64
Cuadro 51: Resultados de resistencia a tracción y porcentaje respecto a resistencia a compresión CM350.....	65
Cuadro 52: Resultados de módulo de elasticidad y resistencia a compresión respectiva CM350	66

Cuadro 53: Resultados de ensayos al concreto fresco G420	67
Cuadro 54. Resultados de resistencia a la compresión simple G420	68
Cuadro 55: Resultados de resistencia a tracción y porcentaje respecto a resistencia a compresión G420	69
Cuadro 56: Resultados de módulo de elasticidad y resistencia a compresión respectiva G420	69
Cuadro 57: Resultados de ensayos al concreto fresco CM420	71
Cuadro 58: Resultados de resistencia a la compresión simple CM420.....	71
Cuadro 59: Resultados de resistencia a tracción y porcentaje respecto a resistencia a compresión CM420.....	72
Cuadro 60: Resultados de módulo de elasticidad y resistencia a compresión respectiva CM420	72
Cuadro 61: Resumen de asentamientos promedio y contenidos de agua para todas las mezclas elaboradas.....	74
Cuadro 62: Evaluación de la variación de los resultados según ACI 214R-11	78
Cuadro 63: Relaciones agua/cemento reales, agua de mezcla y resistencia de concretos producidos con agregados de Guápiles.....	79
Cuadro 64: Relaciones agua/cemento reales, agua de mezcla y resistencia de concretos producidos con agregados de Cerro Minas.....	81
Cuadro 65: Porcentajes de ganancia de resistencia a 7, 14 y 56 días respecto a $f'c$ para concretos elaborados con agregados de Guápiles.....	85
Cuadro 66: Porcentajes de ganancia de resistencia a 7, 14 y 56 días respecto a $f'c$ para concretos elaborados con agregados de Cerro Minas.....	85
Cuadro 67: ANOVA de resultados de resistencia a la compresión según tamaño de espécimen.	87
Cuadro 68: Contenido de cemento y eficiencia de mezclas producidas con agregados de Guápiles.	88
Cuadro 69: Contenido de cemento y eficiencia de mezclas producidas con agregados de Guápiles.	88
Cuadro 70: Datos para ANOVA de resistencia a la tracción a distintas edades de falla.	91
Cuadro 71: Resultados de ANOVA de resistencia a la tracción a distintas edades de falla.....	91

Cuadro 72: Diferencias porcentuales de resistencia a la tracción experimental respecto a las estimaciones teóricas.	94
Cuadro 73: Datos para ANOVA de módulo de elasticidad a distintas edades de falla.....	95
Cuadro 74: Resultados de ANOVA de módulo de elasticidad a distintas edades de falla.	95
Cuadro 75: Diferencias de módulo de elasticidad experimental respecto a valores teóricos estimados con la Ecuación [3].....	100
Cuadro 76: Diferencias de módulo de elasticidad experimental respecto a valores teóricos estimados con la Ecuación [4].....	100

Índice de figuras

Figura 1: Diagrama de flujo de la metodología, Fase I.....	8
Figura 2: Diagrama de flujo de la metodología, Fases II y III.....	9
Figura 3: Desarrollo de la resistencia del concreto.....	22
Figura 4: Agregado grueso de Cerro Minas.....	26
Figura 5: Agregado grueso de Guápiles.....	26
Figura 6: Almacenamiento de agregados gruesos en laboratorio	27
Figura 7: Curvas granulométricas de agregados gruesos.	28
Figura 8: Agregado fino de Cerro Minas.	29
Figura 9: Agregado fino de Guápiles	30
Figura 10: Curvas granulométricas de agregado finos.....	31
Figura 11: Prueba de impurezas orgánicas para arena de Cerro Minas.....	32
Figura 12: Prueba de impurezas orgánicas para arena de Guápiles.....	32
Figura 13: Dosificación de materiales	37
Figura 14: Especímenes cilíndricos de concreto.....	37
Figura 15: Almacenamiento de especímenes en la cámara húmeda	38
Figura 16: Fallas a compresión simple de especímenes de concreto con un rango de resistencia entre 210 kg/cm ² (20,6 MPa) y 280 kg/cm ² (27,5 MPa)	40
Figura 17: Montaje y falla para el ensayo de módulo de elasticidad para espécimen de concreto de 210 kg/cm ² (20,6 MPa).....	40

Figura 18: Montaje y falla para el ensayo de resistencia a la tracción de especímenes de concreto con un rango de resistencia entre 210 kg/cm ² (20,6 MPa) y 420 kg/cm ² (41,2 MPa)	40
Figura 19: Desarrollo de resistencia según edad de falla G210	42
Figura 20: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a 0.4 f'c para G210 Mezcla 1.....	44
Figura 21: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a 0.4 f'c para G210 Mezcla 2.....	44
Figura 22: Desarrollo de resistencia según edad de falla CM210.....	46
Figura 23: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a 0.4 f'c para CM210 Mezcla 1	47
Figura 24: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a 0.4 f'c para CM210 Mezcla 2	48
Figura 25: Desarrollo de resistencia según edad de falla G280 D1	50
Figura 26: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a 0.4 f'c para G280D1 Mezcla 1.....	51
Figura 27: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a 0.4 f'c para G280D1 Mezcla 2.....	51
Figura 28: Desarrollo de resistencia según edad de falla G280 D2	53
Figura 29: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a 0.4 f'c para G280D2 Mezcla 1.....	55
Figura 30: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a 0.4 f'c para G280D2 Mezcla 2.....	55
Figura 31: Desarrollo de resistencia según edad de falla CM280.....	57
Figura 32: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a 0.4 f'c para CM280 Mezcla 1	58
Figura 33: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a 0.4 f'c para CM280 Mezcla 2	59
Figura 34: Desarrollo de resistencia según edad de falla G350	61
Figura 35: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a 0.4 f'c para G350 Mezcla 1.....	62

Figura 36: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a $0.4 f'c$ para G350 Mezcla 2.....	62
Figura 37: Desarrollo de resistencia según edad de falla CM350.....	65
Figura 38: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a $0.4 f'c$ para G350 Mezcla 2.....	66
Figura 39: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a $0.4 f'c$ para G350 Mezcla 2.....	66
Figura 40: Desarrollo de resistencia según edad de falla G420	68
Figura 41: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a $0.4 f'c$ para G420 Mezcla 1.....	69
Figura 42: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a $0.4 f'c$ para G420 Mezcla 2.....	70
Figura 43: Desarrollo de resistencia según edad de falla CM420.....	72
Figura 44: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a $0.4 f'c$ para CM420	73
Figura 45: Curva de regresión ajustada para contenido de agua vs. Asentamiento.....	74
Figura 46: Curva de regresión ajustada para agua/cemento vs. Asentamiento.....	75
Figura 47: Pesos unitarios experimentales de concretos de mediana resistencia	77
Figura 48: Resistencia a la compresión según relación agua/cemento para mezclas con agregados de Guápiles.	79
Figura 49: Gráfico de residuos de regresión $f'c$ vs relación agua/cemento para mezclas con agregados de Guápiles.	80
Figura 50: Resistencia a la compresión según relación agua/cemento para mezclas con agregados de Cerro Minas.	81
Figura 51: Gráfico de residuos de regresión $f'c$ vs relación agua/cemento para mezclas con agregados de Cerro Minas.	82
Figura 52: Resistencia a la compresión según relación agua/cemento para todas las mezclas.	83
Figura 53: Gráfico de residuos de regresión $f'c$ vs a/c para todas las mezclas.	84
Figura 54: Influencia del contenido de cemento en la resistencia a la compresión.....	89
Figura 55: Resistencia a la tracción según raíz cuadrada de resistencia a la compresión	92
Figura 56: Gráfico de residuos para regresión de f_t vs $(f_c)^{1/2}$	93

Figura 57: Relación f_{st} vs $(f_c)^{1/2}$ según la fuente de agregados utilizados en el concreto.	94
Figura 58: Relación E_c vs $(f_c)^{1/2}$ en MPa y comparación con curvas teóricas.	96
Figura 59: Relación E_c vs $(f_c)^{1/2}$ en kg/cm ² y comparación con curva teórica.	97
Figura 60: Gráfico de residuos para regresión de E_c vs $(f_c)^{1/2}$ en MPa.....	98
Figura 61: Gráfico de residuos para regresión de E_c vs $(f_c)^{1/2}$ en kg/cm ²	98
Figura 62: Relación E_c vs $(f_c)^{1/2}$ según la fuente de agregados utilizados en el concreto.	99

Solís Madrigal, Bryan Alberto
Evaluación de las propiedades de concretos de mediana resistencia producidos con insumos disponibles en Costa Rica
Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José. C.R.:
B. Solís M., 2021
xvii, 152 [45]h; ils.col. – 41

RESUMEN:

El concreto es el material más utilizado en Costa Rica para la construcción debido a su durabilidad, bajo costo y versatilidad, por lo que es necesario el conocimiento de sus propiedades en todos los rangos de resistencia. Dado que los concretos de mediana resistencia (CMR) no cuentan con una caracterización actualizada al mercado nacional, se presenta la necesidad de evaluar sus propiedades mecánicas para determinar la factibilidad de su implementación en la construcción nacional.

Se procedió con la caracterizaron agregados de dos fuentes naturales, así como un cemento de uso general de alto uso en el país, posteriormente se realizó el diseño de mezcla para cuatro resistencias a la compresión entre 20,6 MPa (210 kg/cm²) y 41,2 MPa (420 kg/cm²). Se hicieron pruebas a compresión simple, a tracción y módulo de elasticidad, además de pruebas al concreto fresco, para luego proceder a la evaluación de los resultados obtenidos según parámetros teóricos de normativas internacionales y estudios previos a concretos nacionales.

Los resultados muestran que es posible producir concretos de mediana resistencia con insumos nacionales y técnicas convencionales de producción. Además, se obtienen correlaciones a partir de los datos experimentales que fueron comparadas con las ecuaciones teóricas en códigos de diseño como el ACI 318S-19 y ACI 363R, así como con resultados de investigaciones realizadas en Costa Rica. Se evalúan también las diferencias en las propiedades de los concretos según la fuente de agregado utilizada. Finalmente, se brindan recomendaciones para la elaboración de diseños de mezcla más eficientes y controles de calidad requeridos en la producción.

Palabras clave: Concreto de mediana resistencia, módulo de elasticidad, resistencia a la compresión, resistencia a la tracción.

Ing. Alejandro Navas Carro, MSc.
Escuela de Ingeniería Civil

1 Introducción

1.1 Justificación

1.1.1 Problema específico

La resistencia de un concreto a la compresión simple es la propiedad de mayor importancia para su uso como material estructural, por esta razón a través de los años las nuevas tecnologías y exploración de materiales han dado paso a un aumento significativo en las capacidades de los concretos, por lo que actualmente se cuenta con una gama muy amplia de resistencias utilizadas según los requerimientos estructurales que se presenten.

El Código Sísmico de Costa Rica 2010 (Revisión 2014) establece que la resistencia a la compresión mínima para concretos estructurales es de 20,6 MPa (210 kg/cm²), siendo esta la resistencia de mayor utilización en el país para el diseño de estructuras que no posean requerimientos especiales por limitación espacial o de capacidad de carga de los elementos. Los concretos con resistencias de 20,6 MPa (210 kg/cm²) y 27,5 MPa (280 kg/cm²) son comunes debido a la capacidad desarrollada para su producción y el beneficio económico que representa su utilización, sin embargo, ante requerimientos estructurales especiales es necesario diseñar con resistencias superiores, por lo que se requiere conocer las distintas propiedades del concreto necesarias para el diseño estructural.

Según la Asociación del Cemento Portland (PCA) se han logrado alcanzar resistencias de hasta 131 MPa (1335 kg/cm²) por lo tanto se dice que los concretos se pueden clasificar como de baja, media y alta resistencia, sin embargo, los límites que los definen han sido tema de discusión por mucho tiempo y no son del todo claros. El ACI 363R define el límite entre concretos de baja y alta resistencia en 6000 psi, equivalente a 41,4 MPa (421,8 kg/cm²), por lo que se pueden definir los concretos de mediana resistencia (CMR), como aquellos que tengan resistencias a la compresión simple entre el valor mínimo para usarse como material estructural en Costa Rica (20,6 MPa) y 41,2 MPa (420 kg/cm²).

Los concretos de mediana resistencia producidos con materiales comercializados en el país no cuentan con una caracterización experimental que evalúe las principales propiedades utilizadas para su aplicación como material estructural, esto significa una incertidumbre para los diseñadores estructurales, que los limita a la utilización de estimaciones generalizadas

establecidas por códigos de diseño internacionales que no se ajustan a las características reales de los concretos producidos en el país.

Ante esta problemática, el presente estudio evalúa, a partir del desarrollo experimental, la resistencia a la compresión, resistencia a la tracción y módulo de elasticidad de concretos con resistencias entre 20,6 MPa (210 kg/cm²) y 41,2 MPa (420 kg/cm²), para contar con valores más exactos para el diseño y recomendaciones al proceso de producción.

1.1.2 Importancia

El concreto es el material más utilizado en el mundo para la construcción de obras de ingeniería debido a su versatilidad, bajo costo y gran durabilidad, aspectos que lo convierten en la mejor opción en la mayoría de los casos. En Costa Rica no hay diferencia, sigue siendo el material más utilizado en la industria de la construcción y por tanto requiere ser estudiado a fondo para contar con valores de diseño actualizados y específicos para los concretos de producción nacional.

Una caracterización de los concretos de mediana resistencia (CMR) representa una herramienta para la aplicación de estos en los diseños estructurales dado que brinda resultados del comportamiento en el desarrollo de resistencia, así como las capacidades reales del concreto respecto a su diseño. La resistencia en tracción de los CMR representa una variable de interés para los diseñadores en tanto la resistencia a cortante y torsión de los elementos estructurales depende de esta propiedad del concreto. Otra aplicación importante es que la evaluación del módulo de elasticidad del concreto para distintas resistencias a la compresión, permitirá una comparación con las estimaciones teóricas que se utilizan actualmente para el diseño estructural.

El presente trabajo pretende tener un impacto positivo en la producción nacional de concreto, a partir de una serie de recomendaciones que sirvan de referencia al mercado nacional para la producción de concretos de este nivel, basadas en el desarrollo experimental, los resultados obtenidos y su comparación con valores teóricos y de otras investigaciones similares.

1.2 Antecedentes

En esta sección se pretende presentar, basado en una revisión bibliográfica preliminar, una serie de documentos que constituyen una referencia de utilidad para la presente investigación,

debido a que desarrollan temáticas de interés para el estudio y brindan resultados sobre las variaciones de la resistencia del concreto según los materiales utilizados para su producción.

Delgado (2018), en su proyecto de graduación, determinó las curvas características de resistencia a la compresión simple en función del tiempo para tres tipos de cemento hidráulico de uso general comercializados en el país, a partir de fallas de cilindros de 150 mm x 300 mm a los 3, 7, 28 y 56 días para cada tipo de cemento y agregados de río y tajo. Delgado (2018) concluye que el cemento hidráulico es el componente más determinante en la ganancia de resistencia del concreto y además demuestra experimentalmente que los principales cementos de uso general del país cumplen con los parámetros mínimos establecidos por la norma INTE C147. Además, se concluye que los agregados de tajo generan mayores porcentajes de desarrollo de resistencia a compresión del concreto a edades tempranas, mientras que los agregados de río generan mayores porcentajes de desarrollo a edades más avanzadas. Para el presente estudio es de interés en tanto se utilizarán materiales similares para la producción de concretos de mediana resistencia.

En el artículo "Módulo de elasticidad en concretos de alto desempeño" (Navas & Guerrero, 2012) presentado en la revista Ingeniería de la Universidad de Costa Rica, se determinaron los módulos de elasticidad para concretos de producción nacional con resistencias a la compresión de 30 MPa (306 kg/cm²), 50 MPa (510 kg/cm²), 70 MPa (714 kg/cm²) y 90 MPa (918 kg/cm²) elaborados en plantas de prefabricado, obteniendo relaciones directas entre el módulo de elasticidad y el esfuerzo último de los concretos para su comparación con las ecuaciones teóricas del ACI 363R e investigaciones previas. Los resultados obtenidos son valiosos para la comparación con los módulos de elasticidad y las correlaciones que brinde el presente estudio en el rango de resistencias coincidentes.

En el proyecto de graduación "Resistencia a la compresión y módulo de ruptura de mezclas de concreto medidos en núcleos y vigas extraídos en campo" realizado por Moya (2007) se estudiaron mezclas de concreto con diseños para resistencias de 20,6 MPa (210 kg/cm²) y 34,3 MPa (350 kg/cm²) fabricados con cemento de uso general marca Holcim y agregados de dos fuentes diferentes (tajo y río) para realizar especímenes cilíndricos patrón en laboratorio y compararlo con núcleos extraídos de elementos estructurales de campo. Los objetivos de la investigación son meramente de carácter comparativo entre el desempeño del concreto

extraído en núcleos con respecto a los especímenes patrón, sin embargo, los resultados obtenidos experimentalmente representan una referencia de interés para el presente estudio.

El proyecto de graduación realizado por Gómez (2005) evaluó la relación entre la capacidad al desgaste de cuatro tipos de agregados gruesos comercializados en el país y la resistencia a la compresión de un concreto de mediana resistencia a partir de fallas a compresión de cilindros a 3, 7, 28 y 56 días y fallas a flexión de vigas a los 56 días, utilizando cemento Holcim tipo I y con diseños de mezcla para una resistencia de 34,3 MPa (350 kg/cm²). En sus resultados demostró que no existe una relación directa entre la resistencia y la capacidad al desgaste de los agregados, pero determina que hay relación con el tipo de falla del concreto. La investigación es de interés para el presente estudio en tanto representa una referencia con respecto a resultados detallados de resistencias obtenidas para concretos de mediana resistencia elaborados con productos nacionales.

Meseguer (1987) en su investigación "Producción de Concretos de Mediana Resistencia en Costa Rica" afirma que la producción de concretos de mediana resistencia (34 MPa - 48MPa [347 kg/cm² – 489 kg/cm²]) es factible en Costa Rica, a partir de un análisis de los efectos en la resistencia a compresión y tracción del concreto, así como en el módulo de elasticidad, al variar las propiedades de los agregados, la dosificación de las mezclas y las relaciones agua/cemento. Para la investigación se evaluaron cinco tipos de agregado grueso y siete de agregado fino, cementos Tipo I normal y extrafino y un aditivo superplastificante. A partir del análisis, Meseguer recomienda las características de los agregados óptimas para la producción de CMR, así como los contenidos de agregado grueso, cemento y agua para obtener propiedades adecuadas.

Esta última referencia se toma como base para la elaboración del presente estudio, en tanto se busca una caracterización de las mismas propiedades del concreto variando las fuentes de agregados y el cemento a productos comercializados a la fecha de inicio de la investigación, así como el rango de resistencias a evaluar.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar, a partir de ensayos en laboratorio, las propiedades mecánicas de concretos de mediana resistencia producidos con agregados de dos fuentes actuales distintas y cemento de uso general disponibles en el país, para determinar la factibilidad de su implementación en la construcción nacional.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar los agregados de las fuentes seleccionadas a partir del desarrollo experimental para verificar que se encuentren dentro de las especificaciones de normas ASTM o INTECO respectivas.
- b) Elaborar mezclas diseñadas para resistencias entre 20,6 MPa (210 kg/cm²) y 41,2 MPa (420 kg/cm²) según las recomendaciones del American Concrete Institute (ACI), con los distintos agregados seleccionados y cemento de uso general nacional.
- c) Realizar ensayos de compresión simple, resistencia a la tracción y módulo de elasticidad a las distintas mezclas elaboradas, para evaluar el efecto en las propiedades del concreto al variar las fuentes de agregados, la relación agua/cemento y las proporciones de dosificación.
- d) Determinar, a partir de los resultados obtenidos, conclusiones sobre los beneficios y restricciones que representa la producción de concretos de mediana resistencia en el país, así como recomendar normas de control de calidad requeridas.

1.4 Delimitación del Problema

1.4.1 Alcances

Se analizaron agregados de dos fuentes disponibles actualmente en el país, ambos de procedencia natural, y su influencia en las propiedades de los concretos de mediana resistencia (CMR). Los agregados gruesos utilizados fueron piedra quebrada tanto de tajo como de río y los finos fueron arenas naturales de tajo y de río.

Las mezclas de concreto evaluadas se produjeron con un tipo de cemento de uso general de alto uso en Costa Rica y disponible en el mercado a la fecha de inicio del presente estudio. El

cemento utilizado se categoriza según el Reglamento Técnico RTCR 479:2015 como cemento Modificado Mixto, tipo MM/B-(P-C)-28 y es producido por la empresa Cemex.

Los agregados y el cemento utilizados para la elaboración de las mezclas de concreto fueron evaluados según las especificaciones del American Society for Testing and Materials (ASTM) o sus equivalentes en Costa Rica establecidas por el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO) para determinar las propiedades a utilizar en los diseños de mezcla y comprobar el cumplimiento de los requisitos mínimos.

Se elaboraron diseños de mezcla para cuatro resistencias diferentes a 28 días ($f'c$), abarcando el rango establecido para concretos de mediana resistencia. Las resistencias utilizadas para diseñar fueron 20,6 MPa (210 kg/cm²), 27,5 MPa (280 kg/cm²), 34,3 MPa (350 kg/cm²) y 41,2 MPa (420 kg/cm²).

Los especímenes cilíndricos para las pruebas a compresión simple fueron de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura para fallas a los 3, 7 y 28 días. Se elaboraron en total 153 especímenes, separados en 36 por cada resistencia de diseño, 18 por tipo de agregados para cada diseño y nueve especímenes más que fueron utilizados en una mezcla adicional.

Se elaboraron en total 80 especímenes cilíndricos de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura para fallas a 28 días, de los cuales 48 especímenes fueron utilizados para la obtención del módulo de elasticidad del concreto y 32 para obtener la resistencia a la tracción según la prueba brasileña.

Cuadro 1: Cuadro resumen de la cantidad de cilindros moldeados para la investigación

Dimensiones	Compresión simple	Prueba brasileña	Módulo de elasticidad	Total
100 mm x 200 mm	153	0	0	153
150 mm x 300 mm	0	34	51	85
			TOTAL	238

Todos los ensayos de laboratorio se llevaron a cabo en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) y el equipo utilizado fue el establecido por las normas ASTM o INTECO que se encontraba disponible en el laboratorio mencionado.

1.4.2 Limitaciones

Dado que el equipo para la ejecución de los ensayos, así como el espacio para el almacenamiento de especímenes, estuvieron sujetos a la disponibilidad del Lanamme UCR, se

presentaron contratiempos pequeños principalmente al inicio de la ejecución de los ensayos, sin embargo, con la ayuda del jefe del Laboratorio de Concreto y Agregados del LanammeUCR se realizó una gestión y planificación semanal de las actividades experimentales con una comunicación de los requerimientos con anterioridad, para designar el equipo y espacio requerido de manera adecuada y eficiente.

La falta de capacitación del estudiante para la ejecución de los ensayos de laboratorio, que pueden significar errores en los resultados. Esto se resolvió a partir de la ayuda de los técnicos del Laboratorio de Concreto y Agregados, quienes participaron como guías durante la ejecución de los diferentes ensayos.

El período de elaboración del presente proyecto coincide con la emergencia nacional debido a la pandemia por el COVID-19, esto generó períodos de cierre del LanammeUCR, así como la implementación de restricciones de aforo en las instalaciones, generando por consecuencia retrasos en la ejecución en los ensayos de moldeo y fallas de los especímenes de concreto debido a la disponibilidad de espacio del laboratorio. Ante esto se definió un espacio de un día y medio por semana para la elaboración de las pruebas necesarias, esto generó un impacto en el cronograma de actividades del proyecto.

Debido a las restricciones de aforo mencionadas no fue posible realizar las mediciones de la humedad de los agregados un día antes de realizar las mezclas para el ajuste de los diseños, ante esto se utilizaron datos promedio de humedad a partir de resultados previos y se determinó la humedad de los agregados el mismo día de elaboración de las mezclas. Esto generó que no se cumpliera con las relaciones esperadas de agua/cemento en varios casos por las variaciones de humedad de los agregados, sin embargo, los resultados de humedad tomados el día de elaboración de las mezclas permitieron la obtención de las relaciones agua/cemento reales, permitiendo correlaciones más acertadas con las resistencias obtenidas.

Debido a la limitación de tiempo en laboratorio expuesta previamente, se simplificó el proceso de determinación del módulo de elasticidad, implementando el "método de la cuerda" con la determinación de los dos únicos puntos requeridos para el cálculo según la ecuación [2] presentada en la Sección 2.3.4, por lo que no se determinaron las curvas esfuerzo-deformación para los especímenes fallados. Esto representa una limitación debido a que muchas veces las curvas no inician en el origen de coordenadas principalmente por problemas de precisión o montaje del equipo, y esto puede subsanarse con el ajuste de las curvas de esfuerzo-

deformación obtenidas. En este caso, como no se contó con las curvas, se analizó de forma individual cada recta formada con los puntos del método de la cuerda para evaluar la validez del resultado del módulo de elasticidad.

1.5 Descripción de la metodología a utilizar

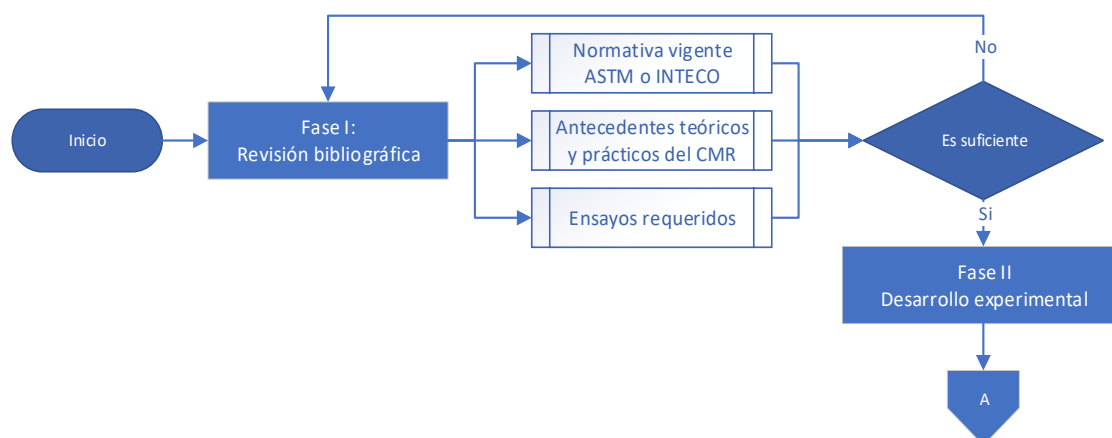


Figura 1: Diagrama de flujo de la metodología, Fase I.

La metodología de la investigación se dividió en tres fases definidas, la primera de revisión bibliográfica, la segunda fue el desarrollo experimental requerido para obtener los resultados del estudio y la tercera correspondió a un análisis de resultados.

La primera etapa consistió en la consulta de bibliografía de referencia relacionada con el concreto, los agregados, los aditivos y el cemento, tanto en publicaciones teóricas como en trabajos de investigación que estudien las diversas propiedades físicas y mecánicas de los materiales a utilizar. Adicionalmente se llevó a cabo una revisión de toda la normativa vigente en el país relacionada al concreto y los materiales que lo componen, principalmente los requerimientos mínimos presentados en las normas ASTM o INTECO vigentes al momento de elaboración de la investigación para el cemento y los agregados utilizados en las mezclas de concreto, además se consultaron manuales y guías para el diseño de mezclas de concreto como la guía ACI 211.1. Otra parte importante de esta fase es que se determinaron los ensayos necesarios a partir de la normativa y las necesidades de diseño.

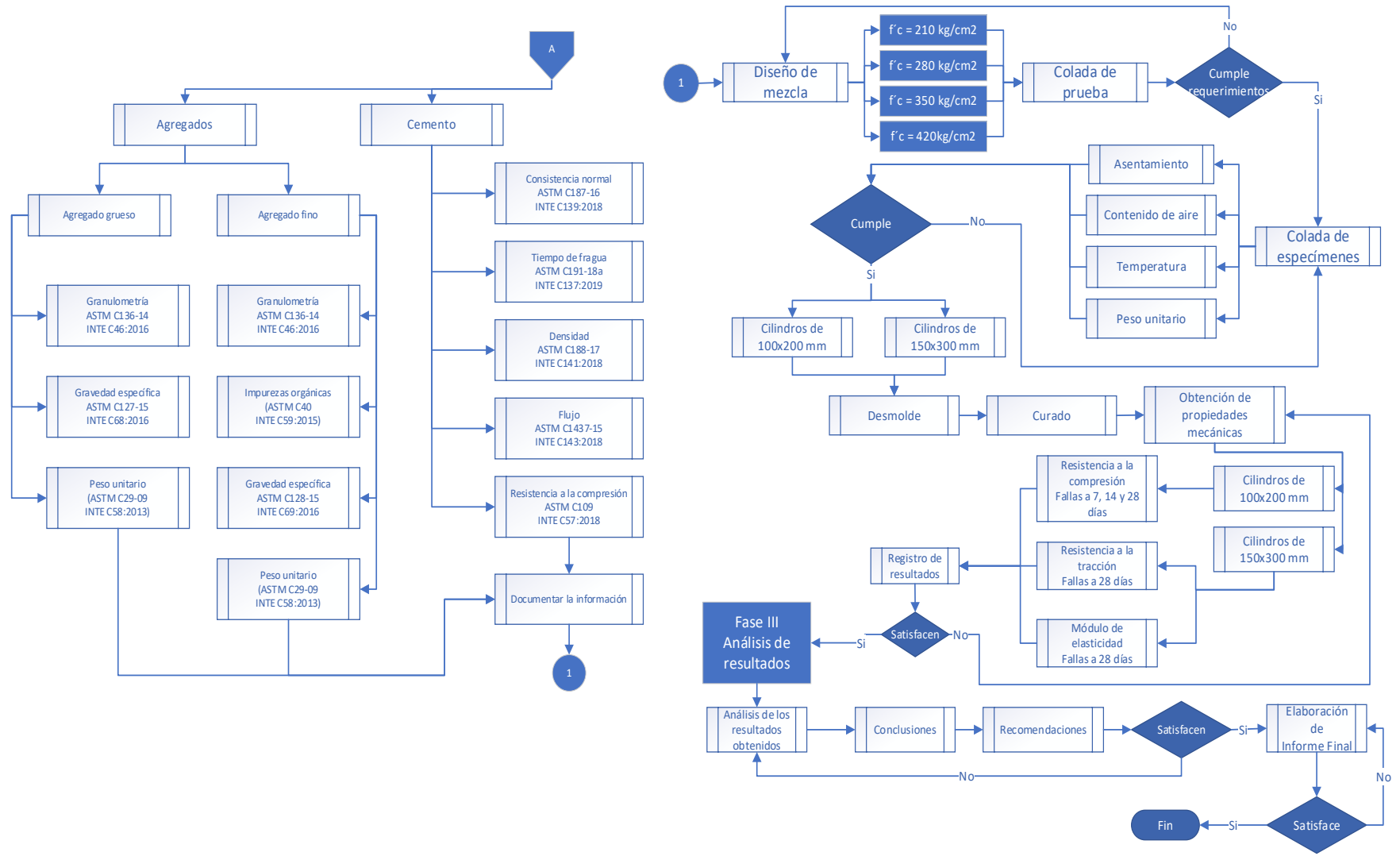


Figura 2: Diagrama de flujo de la metodología, Fases II y III

En la fase II se llevó a cabo todo el desarrollo experimental para la obtención de los resultados de la investigación. En la primera parte se realizó la caracterización de los materiales utilizados en las mezclas de concreto para determinar que cumplieran con lo establecido en las especificaciones y obtener las propiedades físicas y mecánicas requeridas para la elaboración de los diseños de mezcla, a continuación, se mencionan los ensayos realizados.

Para la caracterización y evaluación de agregados, se llevaron a cabo los siguientes ensayos:

- INTE C46:2016 (ASTM C136-14) Análisis granulométrico en agregados fino y grueso
- INTE C59:2015 (ASTM C40): Impurezas inorgánicas en el agregado fino
- INTE C58:2013 (ASTM C29-09): Determinación de la densidad masiva (peso unitario) y vacíos en agregados.
- INTE C68:2016 (ASTM C127-15): Determinación de la densidad, gravedad específica y absorción de los agregados gruesos.
- INTE C69:2016 (ASTM C128-15): Determinación de la densidad, gravedad específica y absorción de los agregados finos.

Nota: el ensayo para la determinación de la resistencia al desgaste de agregados grueso hasta 37.5 mm, utilizando la máquina de los Ángeles (INTE C64:2017 [ASTM C131-14]), no se llevó a cabo debido a las limitaciones de tiempo en generadas por las condiciones de trabajo ajustadas a la emergencia nacional presentada al momento de elaboración de la presente investigación.

Para la caracterización y evaluación del cemento, se llevaron a cabo los siguientes ensayos:

- INTE C141:2018 (ASTM C188-17): Determinación de la densidad de un cemento hidráulico
- INTE C139:2018 (ASTM C187-16): Determinación de la consistencia normal del cemento.
- INTE 137:2019 (ASTM C191-18): Determinación del tiempo de fragua del cemento hidráulico por aguja de Vicat.
- INTE C143:2018 (ASTM C1437-15): Determinación del flujo de un mortero de cemento hidráulico.
- INTE C57:2018 (ASTM C109-18): Resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico.

Luego de ejecutar todos los ensayos anteriores se procedió a documentar los resultados y aplicarlos en los diseños de mezcla, los cuales se realizaron según la guía ACI 211.1 para resistencias de 20,6 MPa (210 kg/cm²), 27,5 MPa (280 kg/cm²), 34,3 MPa (350 kg/cm²) y 41,2 MPa (420 kg/cm²), para dos tipos de agregado distintos y un cemento de uso general. Posteriormente se realizaron coladas de prueba para verificar el cumplimiento de las mezclas con lo esperado según el diseño, haciendo pruebas de asentamiento (INTE C41/ASTM C143) al concreto fresco, así como fallas a compresión tempranas para corroborar el comportamiento de las resistencias.

Una vez que las mezclas de prueba cumplieron con lo esperado, se procedió a realizar las mezclas y las mediciones correspondientes en el concreto fresco de asentamiento, contenido de aire, temperatura y peso unitario para verificar su cumplimiento y seguidamente moldear los especímenes requeridos para la investigación según la norma INTE C18 (ASTM C192). Se realizaron 16 mezclas de concreto y en cada una se moldearon 9 cilindros de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura y 5 cilindros de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura, por lo que cada una de las mezclas realizadas corresponde a una misma resistencia de diseño y agregados de la misma fuente. Seguidamente se procedió al desmolde de los especímenes, los cuales fueron sometidos a curado hasta la fecha de falla que se les asignó.

Lo siguiente que se realizó fue la obtención de las propiedades mecánicas de las mezclas de concreto, para esto se fallaron los cilindros de 100 x 200 mm a compresión simple según la norma INTE C45 (ASTM C78) en la fecha de falla correspondiente. Además, se llevaron a cabo los ensayos para la determinación del módulo de elasticidad según la norma ASTM C469 y la resistencia a la tracción según la prueba brasileña (ASTM C496) para los especímenes de 150 x 300 mm. Los resultados de cada prueba fueron registrados y se determinó si eran satisfactorios antes de pasar a la siguiente fase de la investigación.

La tercera fase de la investigación consistió en la interpretación y análisis completo de todos los resultados obtenidos del desarrollo experimental, para esto se llevó a cabo una comparación de las propiedades obtenidas para cada tipo de mezcla, según los agregados y el tipo de cemento, comparando tanto las resistencias obtenidas a compresión y tracción como los valores obtenidos del módulo de elasticidad. Además de las comparaciones entre los resultados según los materiales del concreto, se abordaron comparaciones con resultados de otras investigaciones similares y valores teóricos establecidos y se brindan interpretaciones a las

posibles diferencias o inconsistencias que se presenten. El análisis de los resultados llevó al establecimiento de una serie de conclusiones que a su vez permitieron al investigador brindar recomendaciones sobre el estado del arte de la producción de concretos de mediana resistencia.

2 Marco Teórico

2.1 Componentes del concreto

El concreto es un material compuesto que resulta de la mezcla de dos componentes principales, la pasta y los agregados. La pasta constituye una matriz químicamente activa formada por la combinación de cemento hidráulico y agua, esta se combina con los agregados y en ocasiones con aditivos para formar las mezclas de concreto. (Kosmatka, 2004)

El concreto es un material versátil dado que en estado fresco es líquido, lo que le permite moldearse en la forma requerida. También es un material durable y según su composición capaz de resistir a diversos factores externos, además posee un bajo costo con respecto a otros materiales constructivos.

2.1.1 Cemento hidráulico

El cemento portland es un tipo de cemento hidráulico compuesto principalmente por calcio, sílice, alúmina y óxidos de hierro. Los cementos reaccionan con el agua en un proceso químico llamado hidratación para formar una pasta con características adherentes.

La hidratación del cemento empieza una vez que hay contacto con el agua, formando una capa fibrosa en la superficie de cada partícula que se propaga de manera gradual hasta enlazarse con la capa fibrosa de otra partícula formando una red de fibras cada vez mayor que termina en el endurecimiento de la pasta y la ganancia de resistencia, formando una roca artificial. (Kosmatka, 2004)

Las materias primas del cemento son la caliza y la arcilla principalmente, siendo la primera un componente rico en calcio (componente calcáreo) y la segunda un componente que contiene sílice, aluminio y óxidos de hierro. La caliza y la arcilla son sometidas al proceso químico de la producción de cemento, en la cual son mezcladas y sometidas a temperaturas entre 1300 °C y 1500 °C para resultar en el componente principal del cemento, conocido como Clinker. Una

vez obtenido el Clinker se continúa con el proceso físico, en el cual se agregan adiciones minerales como yeso, caliza o puzolana y se pulveriza la mezcla para obtener el cemento.

El Clinker es un producto que contiene diversos minerales los cuales cumplen funciones específicas en el comportamiento del cemento, entre estos se tiene:

- *Silicato tricálcico (C_3S)*: Es el principal responsable del fraguado inicial del cemento y de su resistencia temprana, por lo que a mayor C_3S en el Clinker mayor resistencia inicial tendrá el cemento.
- *Silicato dicálcico (C_2S)*: Este mineral se hidrata y endurece lentamente por lo que contribuye a la ganancia de resistencia a edades mayores a una semana.
- *Aluminato tricálcico (C_3A)* Es el responsable de la liberación de calor en los primeros días de hidratación y endurecimiento, además, reduce la resistencia a sulfatos y sulfatos del cemento.
- *Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF)*: Es el responsable del color del cemento, pero no aporta mucho al desarrollo de resistencia.

El cemento portland se puede subdividir en varios tipos, los cuales se presentan a continuación:

- Tipo I: Uso general en construcción
- Tipo II: Uso general con resistencia moderada al ataque de sulfatos.
- Tipo III: Alta resistencia inicial.
- Tipo VI: Bajo calor de hidratación.
- Tipo V: Alta resistencia a los sulfatos.

2.1.2 Cemento hidráulico en Costa Rica

Los cementos para uso general son apropiados para todos los usos en la construcción en donde las propiedades especiales como alta resistencia inicial o resistencia al ataque de sulfatos no son requeridas por la obra a construir. Cumplen con las especificaciones y características de los cementos tipo GU o cemento hidráulico para construcción general establecido en la norma ASTM C1157, *Standard Performance Specification for Hydraulic Cement*.

A la fecha de elaboración del presente trabajo, son tres empresas las que producen y comercializan cemento hidráulico en el país. La primera es Holcim, fundada en Costa Rica bajo el nombre de INCSA en 1962 y adquirida luego por el Grupo Holdebank de Suiza, esta cuenta con su planta de producción en Agua Caliente de Cartago. La segunda es Cemex, empresa

fundada originalmente en México en 1906 ingresada en el país en 1999 con una planta en Colorado de Abangares en Guanacaste y otra en Patarrá de Desamparados en San José. La tercera empresa es Cementos Fortaleza la cual fue ingresada por la empresa Plycem en el año 2018 y cuenta con una planta de producción en Esparza de Puntarenas.

En Costa Rica los parámetros y características que deben cumplir los cementos hidráulicos para su uso en el país están establecidos en el reglamento técnico RTCR 479:2015, en el cual se clasifican los distintos tipos de cemento, así como las especificaciones que deben cumplir. La norma nacional INTE C147, "Cemento hidráulico. Requisitos", brinda la tipología de cementos que se presenta en el Cuadro 2.

Cuadro 2: Tipos de cementos hidráulicos.

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

Fuente: Norma INTE C147, 2018.

Los cementos de mayor uso en el país y comercializados como cementos de uso general son los cementos modificados mixtos (MM), los cuales son adicionados con más de un componente como puzolana, caliza, humo de sílice y escoria de alto horno. Son clasificados según el porcentaje de cada adición que contengan y el contenido de clínker. En el Cuadro 3 se presenta información detallada sobre la composición de cada tipo de cemento.

Cuadro 3: Composición de los cementos hidráulicos para su clasificación.

Tipos	Denominación	Tipo/Grado de sustitución	Clínker	Escoria de Alto Horno	Humo de Sílice	Puzolanas	Caliza	Componentes minoritarios adicionales
Tipo I	Cemento Portland Ordinario (CPO)	Tipo I	95 - 100	–	–	–	–	0 - 5
Tipo MP	Cemento Hidráulico con; Puzolana, Ceniza volante, Esquisto	MP / A	80 - 94	–	–	06 – 20	–	0 - 5
		MP / B	65 - 79	–	–	21 – 35	–	0 - 5
		MP / C	45 - 64	–	–	36 – 55	–	0 - 5
		MP / D	20 - 44	–	–	56 – 80	–	0 - 5
Tipo MC	Cemento Hidráulico con Caliza	MC / A	80 - 94	–	–	–	06 - 20	0 - 5
		MC / B	65 - 79	–	–	–	21 - 35	0 - 5
		MC / C	45 - 64	–	–	–	36 - 55	0 - 5
Tipo MM	Cemento Hidráulico Modificado Mixto	MM / A	80 - 94	–	–	06 – 20	–	0 - 5
		MM / B	65 - 79	–	–	21 – 35	–	0 - 5
		MM / C	45 - 64	–	–	36 - 55	–	0 - 5
		MM / D	20 - 44	–	–	56 - 80	–	0 - 5
		MM / E	5 - 19	–	–	81 - 95	–	0 - 5
Tipo ME	Cemento Hidráulico con Escoria de Alto Horno	ME / A	80 - 94	06 - 20	–	–	–	0 - 5
		ME / B	65 - 79	21 - 35	–	–	–	0 - 5
		ME / C	45 - 64	36 - 55	–	–	–	0 - 5
		ME / D	20 - 44	56 - 80	–	–	–	0 - 5
		ME / E	5 - 19	81 - 95	–	–	–	0 - 5
Tipo MF	Cemento Hidráulico con Humo de Sílice	MF/A	90 - 94	–	06 - 10	–	–	0 - 5

Fuente: Norma INTE C147, 2018.

Además de la clasificación, el RTCR 479:2015 especifica valores mínimos de distintos parámetros que deben cumplir los cementos para ser utilizados en el país. Los parámetros de interés para esta investigación fueron las principales características físicas del cemento, así como los requerimientos mínimos de resistencia a la compresión de morteros.

Cuadro 4: Características físicas de los cementos hidráulicos.

Característica física	Especificación	Método de Ensayo
Finura por permeabilidad , m ² / kg	A	INTE C138
Finura por retenido en tamiz de 45 µm	A	INTE C142
Autoclave, cambio longitud, % máximo	0,8	INTE C135
Tiempo de fragua, minutos - Inicial mínimo - Final máximo	45 420	INTE C137
Contenido de aire del mortero, % máximo	12	INTE C136
Expansión en barras de mortero 14 días, % máximo	0,02	INTE C166
Falso fraguado, % mínimo	50	INTE C169
A Este valor debe ser reportado bajo solicitud del cliente.		

Fuente: Norma INTE C147, 2018.

Cuadro 5: Resistencia a la compresión

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	-	A)
A) La resistencia mínima requerida a los 28 días puede ser acordada entre el proveedor y el comprador.				

Fuente: Norma INTE C147, 2018.

2.1.3 Agregados

Los agregados son materiales minerales granulares que ocupan cerca de 65% a 85% de la masa total del concreto y cumplen un papel importante en las propiedades del concreto fresco y endurecido en temas de resistencia, trabajabilidad y durabilidad del concreto.

Se utilizan agregados gruesos y finos, los cuales son clasificados por el tamaño de partícula según ASTM. El agregado grueso consiste en grava o piedra triturada con partículas de tamaños

mayores a 4.75 mm, y con un rango de uso entre 9.5 mm y 37.5 mm, el agregado fino puede ser una arena natural o se puede obtener de moler piedra, según ASTM es considerada arena aquella con tamaños de partícula menor a 4.75 mm.

El agregado grueso aporta a la resistencia del concreto dado que son partículas de rocas como el granito (ígneas), la caliza (sedimentaria), el mármol o la cuarcita (metamórficas), las cuales presentan resistencias superiores a los 156,9 MPa (1600 kg/cm²) y en confinamiento con la pasta y la arena en el concreto aportan a la resistencia de la mezcla. El agregado fino cumple más una función de trabajabilidad, en la que las partículas funcionan como rodillos para las partículas de agregado grueso, facilitando el manejo del concreto fresco. En combinación los agregados aportan también a la durabilidad del concreto.

Los agregados deben estar libres de impurezas orgánicas, arcillas y limos, además no deben exceder las tolerancias máximas de sílice, carbonatos y minerales de sulfuro de hierro.

La forma angulosa y textura rugosa en los agregados es beneficiosa para una correcta adherencia con la pasta, además la dureza y la buena gradación son propiedades importantes para la fabricación de concretos de calidad.

2.1.4 Agua de mezcla

El agua es uno de los componentes principales del concreto en tanto es responsable de reaccionar con el cemento para el endurecimiento de la pasta. Cumple en el concreto tres funciones principales, la primera es la hidratación, ya que el agua hace reaccionar a las partículas de cemento para que adquiera la adherencia requerida y se logre un fraguado completo. La segunda es que actúa como lubricante en la mezcla de concreto, esto brinda la trabajabilidad adecuada para una mayor facilidad de colocación y manejo del concreto. La tercera es que brinda los espacios necesarios para los productos de hidratación del cemento. El agua también es necesaria en el proceso de curado, en el cual se busca mantener saturado el concreto para la reposición del agua perdida por evaporación hasta obtener la hidratación completa del cemento.

El agua de mezcla debe ser limpia, libre de impurezas orgánicas, sedimentos, sales, azúcares, algas, sulfatos, cloruros y otros contaminantes que puedan afectar las propiedades del concreto por reacciones químicas con sus componentes.

2.1.5 Aditivos

Los aditivos son componentes que se añaden al concreto antes o durante el mezclado de sus componentes para mejorar las propiedades o simplificar el proceso de fabricación, manejo y colocación del mismo. La clasificación según la norma ASTM C494 se presenta en el Cuadro 6:

Cuadro 6: Clasificación y función de aditivos para concreto

Tipo	Aditivo	Función
A	Reductor de agua	Reduce la cantidad de agua de mezcla requerida para producir una consistencia dada
B	Retardador	Retarda el fraguado
C	Acelerador	Acelera el fraguado y el desarrollo temprano de resistencia
D	Reductor de agua y retardador	Reduce la cantidad de agua de mezcla requerida para producir una consistencia dada y retarda el fraguado.
E	Reductor de agua y acelerador	Reduce la cantidad de agua de mezcla requerida para producir una consistencia dada y acelera el fraguado y el desarrollo temprano de resistencia
F	Reductores de agua de alto desempeño	Reduce en un 12% o más la cantidad de agua de mezcla requerida para producir una consistencia dada
G	Reductores de agua de alto desempeño y retardador	Reduce en un 12% o más la cantidad de agua de mezcla requerida para producir una consistencia dada y retarda el fraguado
S	Desempeño específico	Brinda características específicas de desempeño

Fuente: Norma ASTM C494, 2017

En cuanto a la normativa, la norma INTE C147:2018 especifica que no se debe superar el 1,0% en masa del cemento hidráulico y que los aditivos no deben causar la corrosión del acero de refuerzo, ni perjudicar las propiedades del cemento hidráulico, de los morteros o del concreto.

2.2 Propiedades del concreto fresco

2.2.1 Asentamiento

Una de las propiedades más importantes del concreto para su uso como material de construcción es la trabajabilidad, la cual se refiere a la facilidad de manipulación del concreto en aspectos como transporte, mezclado, colocación, consolidación y acabado. Sin embargo, debido a que es una propiedad que involucra muchas variables, no es posible medirla de forma directa o precisa.

El asentamiento del concreto es una medida de la consistencia del mismo y funciona como el principal indicador de la trabajabilidad para una mezcla específica. Este depende principalmente de la cantidad de agua agregada a una mezcla, por lo que relaciones agua/cemento más altas dan como resultado asentamientos mayores.

Para medir el asentamiento se utiliza el método de ensayo descrito en la norma INTE C41 (ASTM C143), en la cual se coloca y se compacta una muestra de concreto recién mezclado en un molde con forma de cono truncado que luego es levantado para dejar que el concreto se desplome, luego se mide la distancia vertical desde la posición original hasta la desplazada.

El ensayo puede ser utilizado para el control de la uniformidad de los concretos producidos con las mismas características y proporciones. Por lo tanto, con el ensayo es posible verificar en campo que se está utilizando un concreto uniforme en los elementos estructurales y también permite mantener el control adecuado en las mezclas producidas en un laboratorio.

En cuanto al diseño de mezclas, en el método descrito por el ACI 211 el diseñador define un rango de asentamiento aceptable según el uso que se le dará al concreto y con este rango se determina la cantidad de agua que se debe agregar a la mezcla.

2.2.2 Peso Unitario

El peso unitario o densidad (masa por unidad de volumen) de un concreto es una propiedad que permite determinar las cargas que generan los elementos estructurales a partir de sus dimensiones, esto es útil en el diseño estructural para determinar las cargas muertas de una estructura o en los proyectos de construcción para definir un sistema de obra falsa (formaletas, andamios de carga, puntales) adecuado según las cargas que el concreto fresco transmita.

Los concretos convencionales tienen densidades desde 2200 kg/m^3 hasta 2400 kg/m^3 y son los más utilizados para el diseño y construcción de estructuras que no tengan requerimientos especiales en este ámbito, por ejemplo, edificios y pavimentos. Estos valores de densidad dependen de la densidad de los agregados utilizados, de la cantidad de aire atrapado o incluido y de la cantidad de agua y cemento (Kosmatka, 2004).

El ACI 318S-19 define los concretos de peso normal como aquellos que sean producidos con agregados finos y gruesos que cumplan las especificaciones establecidas en la norma ASTM C33M, esta condición define muchas de las ecuaciones de diseño a utilizar. Para estos concretos, se utiliza típicamente un valor de 2400 kg/m^3 para determinar el peso propio de los elementos de concreto reforzado.

La medición de la densidad generalmente se hace en el concreto fresco, mediante el método de ensayo descrito en la norma INTE C72:2017 en la que se llena un recipiente de masa y volumen conocidos con una muestra de concreto que se compacta o se vibra según el

asentamiento medido de esa misma mezcla para la extracción de burbujas grandes de aire. Se determina la masa de la muestra de concreto y se divide entre el volumen que ocupa para obtener la densidad.

2.2.3 Contenido de aire

El aire es un componente que puede estar presente de dos maneras en las mezclas de concreto, como aire atrapado o como aire incluido.

- El aire atrapado se trata de las burbujas de aire que se incorporan al concreto durante los procesos de mezclado, así como los vacíos presentes debido a una compactación insuficiente, este se presenta en porcentajes que varían del 1% al 3% del volumen de concreto. (Kosmatka, 2004)
- El aire incluido es el que se incorpora intencionalmente al concreto de manera artificial mediante el uso de aditivos inclusores de aire o cemento con aire incluido, incorporando así millones de burbujas de aire distribuidas uniformemente en todo el volumen de la mezcla y con el objetivo de funcionar como rodillos flexibles que permitan modificar las propiedades del concreto plástico (fresco). El aire incluido se utiliza para mejorar cualidades de trabajabilidad y calidad de los acabados, disminuir la segregación y el sangrado, así como para aumentar la durabilidad ante ambientes de hielo-deshielo.

La presencia de aire en el concreto, aunque brinda una mejor trabajabilidad y durabilidad, hace al concreto más permeable y disminuye su resistencia a la compresión por lo que se debe controlar de manera adecuada según los requerimientos de la mezcla, además, se deben aplicar técnicas adecuadas de compactación y vibración al momento de colocación el concreto, para evitar el arrastre innecesario de aire y la presencia de vacíos de gran tamaño que comprometan la capacidad en compresión, la densidad o los acabados del concreto.

A nivel experimental, el contenido de aire de una mezcla de concreto se determina con el método de ensayo INTE C42:2017 en el que se coloca una muestra de concreto en un recipiente de medida que utiliza un sistema de presión de aire para determinar de forma directa el porcentaje de aire presente en la muestra.

2.2.4 Temperatura

Una de las propiedades que más influyen en el comportamiento del concreto tanto en su estado fresco como endurecido, es la temperatura. Esto se debe a que un aumento en la temperatura

reduce la cantidad de aire y el asentamiento de las mezclas, afectando la trabajabilidad (Shetty, 1982). Así mismo, la ganancia de resistencia se ve afectada por las temperaturas de colocación y curado de una mezcla de concreto.

Por esta razón, es necesario tener un control adecuado de las temperaturas de colocación del concreto en los proyectos constructivos para asegurar el cumplimiento de las especificaciones mínimas y máximas establecidas. Así mismo, los productores de concreto deben controlar la temperatura de los agregados y el agua para garantizar una temperatura de mezclado óptima.

La Asociación del Cemento Portland (Portland Cement Association, PCA) establece un rango de temperatura deseable para la colocación del concreto fresco entre 10 °C y 16 °C, se conoce también que por debajo de 4 °C se retrasa la ganancia de resistencia. Por su parte el ACI 305R establece una temperatura máxima de 35 °C al momento de colocación, esto con el objetivo de evitar tanto la disminución del asentamiento como el aumento en la contracción térmica que puede ocasionar fisuras en el concreto endurecido.

Para la determinación de la temperatura del concreto fresco se utiliza la norma INTE C43:2018, en el que se utiliza un equipo de medición de temperatura con una precisión de 0,5 °C, el cual debe ser inmerso 75 mm o más en una mezcla para tomar una lectura.

2.3 Propiedades del concreto endurecido

2.3.1 Resistencia a la compresión

Según Kosmatka (2004) la "*resistencia a compresión se puede definir como la medida máxima de la resistencia a carga axial de especímenes de concreto*". Se mide según el ensayo propuesto en la norma ASTM C39 o su equivalente nacional INTE C39:2018 en el cual se someten especímenes cilíndricos de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura o de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura a una carga axial a compresión en distintas edades de falla generalmente a 3, 7, 28, 56 y 90 días. La resistencia con la que se identifica un concreto es la resistencia adquirida a los 28 días de moldeado el espécimen y el valor se denota como $f'c$.

Según la guía ACI 214R la variabilidad en la resistencia a la compresión del concreto es debida principalmente a los materiales que lo constituyen y el control que se mantenga de los mismos, así como de los procesos de producción, transporte y curado. Se menciona también que uno de los factores influyentes principales es la cantidad de agua de la mezcla, esto debido a que la relación agua/cemento es inversamente proporcional a la resistencia del concreto y el

requerimiento de agua es dependiente de la fuente y características de los agregados, el cemento y de los aditivos en caso de que se adicionen.

Los concretos pueden ser diseñados para diversas resistencias por lo que actualmente se utilizan valores muy variados, sin embargo, la resistencia está limitada por la calidad de los materiales a utilizar para producir el concreto. Según el Código Sísmico de Costa Rica, el valor mínimo de resistencia para el concreto estructural es de 20,6 MPa (210 kg/cm²) y a la fecha se han logrado resistencias de hasta 130,9 MPa (1335 kg/cm²), por esta razón se definen concretos de resistencia normal y concretos de alta resistencia. El punto límite entre resistencia normal y alta resistencia no es claro, sin embargo, es definido por el ACI 363R como 6000 psi, (41.4 MPa, 421.8 kg/cm²).

2.3.2 Desarrollo de la resistencia en el tiempo

El desarrollo de la resistencia de los concretos es de suma importancia para el uso del material en la construcción, esto debido a que en muchos casos es necesario conocer el tiempo requerido antes de remover el encofrado o apuntalamiento de los elementos estructurales o no es posible esperar 28 días para saber si el concreto utilizado cumple con las especificaciones requeridas.

Ante esto se cuenta con diversos modelos de estimación basados en el desarrollo experimental, los cuales dependen tanto de la edad como la temperatura de curado del concreto. Además, se utilizan valores típicos brindados por la experiencia para la predicción de la resistencia a 28 días, utilizando normalmente una edad de falla de 7 días, en la cual el concreto ha alcanzado un 65 % - 75 % de la resistencia a los 28 días. En la Figura 3 se presenta el desarrollo de la resistencia de diversos concretos expresado como un porcentaje de la resistencia a los 28 días, estos valores no son dependientes de la temperatura dado que corresponden a resultados de laboratorio en los que se mantiene una misma temperatura de curado.

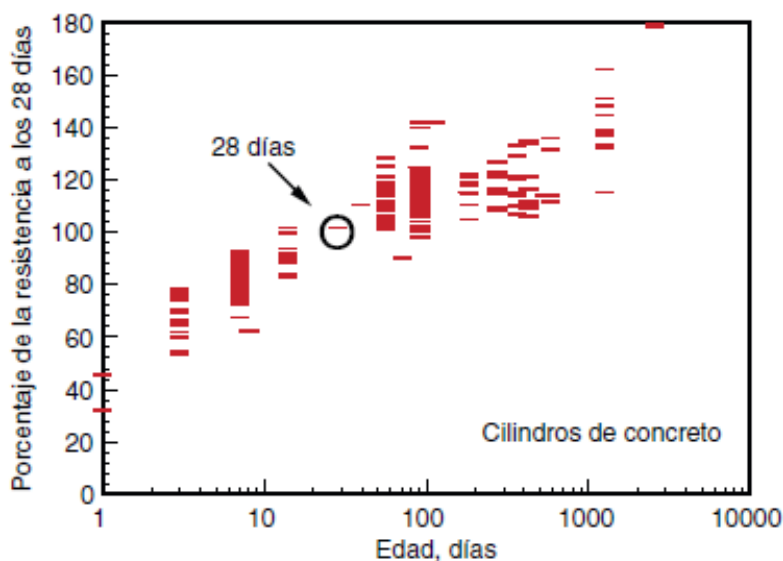


Figura 3: Desarrollo de la resistencia del concreto.

Fuente: Kosmatka, 2004. (Tomado de Lange, 1994)

2.3.3 Resistencia a la tracción

El concreto posee una capacidad en tracción mucho menor a su capacidad en compresión debido a su composición. Según el comité 363 del ACI, los valores de resistencia a tracción varían entre 5% y 15% del valor de $f'c$ y esos rangos de variación dependen del tipo de agregado utilizado, así como de la resistencia a compresión, ya que para valores más altos de resistencia a compresión, aumentan también los valores de resistencia a tracción.

Esta propiedad es importante dado que la resistencia a flexión, a cortante y a la torsión de los elementos estructurales de concreto y concreto reforzado dependen de la resistencia a la tracción. Además, la aparición y propagación de las grietas se da por esfuerzos de tensión en el concreto.

Medir la resistencia a la tracción del concreto de forma directa representa una alta dificultad experimental, es por esto que se aplican métodos indirectos como el ASTM C496, también conocida como la prueba brasileña, en la cual se somete a cilindros de 150 mm x 300 mm a una compresión diametral a lo largo de su longitud hasta obtener una falla.

El fundamento de la prueba está basado en la teoría de los estados de esfuerzos, ya que en este caso la carga induce a esfuerzos de compresión en las zonas inmediatas a la línea de aplicación de la carga, generando a su vez esfuerzos de tracción en el plano que contiene la carga aplicada.

La falla se da por tracción debido a que las áreas de aplicación de la carga están en un estado de esfuerzos de compresión triaxial, lo que les permite soportar esfuerzos de compresión muy superiores a los obtenidos con las pruebas de compresión uniaxial.

El ACI 363R recomienda una ecuación para la predicción del esfuerzo en tracción del concreto a partir de la resistencia a la compresión, la cual está limitada a un rango de f'_c entre 21 MPa y 83 MPa. Además, se comenta que los resultados obtenidos con esta ecuación pueden variar según el tipo de agregados utilizados en la mezcla.

$$f'_{sp} = 0,59 \cdot \sqrt{f'_c} \text{ [MPa]} \quad [1]$$

2.3.4 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad (E), también llamado módulo de Young es una propiedad específica de un material y representa la variación en el esfuerzo aplicado con respecto al cambio en la deformación unitaria, por lo que a nivel gráfico se interpreta como la pendiente de una línea recta sobre un diagrama esfuerzo-deformación unitaria axial. (Popov, 2000)

En el diseño de estructuras de concreto, el módulo de elasticidad es importante debido a que es un parámetro que relaciona el esfuerzo con la deformación del material, por lo que se requiere en la estimación de deflexiones ante cargas de servicio de los elementos estructurales de concreto reforzado. Sin embargo, la obtención de este valor no es tan simple como el cálculo de una pendiente, debido a que las curvas de esfuerzo-deformación del concreto son no lineales, por lo que se debe recurrir a otras metodologías de estimación.

A nivel experimental, una de las metodologías más utilizadas para determinar el módulo de elasticidad de los concretos es con el método de ensayo de la norma ASTM C469, llamado también "método de la cuerda". El método consiste en someter un espécimen cilíndrico de concreto a fuerzas axiales de compresión, e instrumentarlo con un compresómetro para la medición de las deformaciones. Con esto se busca medir la pendiente de una línea en un rango compuesto por dos puntos específicos en la curva de esfuerzo-deformación del concreto. El punto inicial se toma cuando se alcanza una deformación unitaria $\epsilon_1=0,000050$ y el segundo cuando se alcanza un 40 % de la resistencia última del concreto (límite elástico según ASTM C469), la cual se obtiene fallando dos especímenes de la misma muestra concreto a 28 días. El módulo de elasticidad se calcula como sigue:

$$E = \frac{(f_2 - f_1)}{(\varepsilon_2 - 0,000050)} \quad [2]$$

Donde:

f_1 : Esfuerzo correspondiente a $\varepsilon = 0,000050$

f_2 : Esfuerzo correspondiente a 40 % del esfuerzo último

ε_2 : Deformación unitaria producida por el esfuerzo f_2

A nivel de diseño, la sección 19.2.2 del ACI 318S-19 establece una ecuación para el cálculo de E_c que depende de la resistencia a la compresión del concreto, esta es válida para concretos de peso normal ($\approx 2400 \text{ Kg/cm}^2$) y para resistencias a la compresión menores a 420 kg/cm^2 .

$$E_c = 4700 \cdot \sqrt{f'_c} \text{ [MPa]} \quad [3]$$

$$E_c = 15100 \cdot \sqrt{f'_c} \text{ [kg/cm}^2\text{]} \quad [4]$$

El ACI aclara que los valores de módulo de elasticidad medidos experimentalmente pueden variar entre el 80 y el 120 por ciento de los valores calculados con las ecuaciones. Esto se debe a la dependencia de E_c con el módulo de elasticidad de los agregados utilizados para la producción del concreto.

2.3.5 Durabilidad del concreto

Otra de las cualidades importantes a tomar en cuenta en los concretos es su durabilidad, referida por Kosmatka (2004) como "*la habilidad del concreto en resistir a la acción del ambiente, al ataque químico y a la abrasión, manteniendo sus propiedades de ingeniería*". Ante esto, se deben tomar en cuenta las condiciones y requerimientos especiales de los concretos para determinar las proporciones y tipo de materiales a utilizar, tipo de curado y método de colocación.

Uno de los principales problemas de durabilidad del concreto es el deterioro producido cuando los agregados reaccionan con los hidróxidos alcalinos del cemento, esta reacción se puede presentar de dos formas según la composición mineralógica de los agregados utilizados, la reacción álcali-carbonato y la reacción álcali-sílice, siendo esta última la más común. La reacción álcali-carbonato ocasiona agrietamiento en la pasta que se puede percibir como eflorescencias, abultamientos o escamas en el acabado de concreto, la reacción álcali-sílice produce una expansión del agregado que genera presiones internas en la masa de concreto,

ocasionando el agrietamiento y la desintegración del mismo. Para evitar estos problemas se debe utilizar cemento que cumpla con un máximo de 0.6 % de álcalis en masa y evaluar la reactividad de los agregados a utilizar mediante los ensayos de laboratorio pertinentes.

Dentro de los temas mayormente analizados en cuanto a la durabilidad de los concretos, se encuentra la exposición a ambientes hostiles como los ciclos de hielo y deshielo (químicos descongelantes) y la cercanía al mar. Siendo esta última aplicable en Costa Rica, es necesario tomar en cuenta los requerimientos de concretos menos porosos para estructuras con exposición al agua de mar, especialmente cuando hay ciclos repetidos de mojadura y secado, para evitar la corrosión del acero de refuerzo y el ataque de sulfatos. También se pueden utilizar cementos con resistencia moderada a sulfatos para mitigar las reacciones dañinas en el concreto.

Otros factores que se deben tomar en cuenta para producir concretos durables son la posible carbonatación producida por la penetración del dióxido de carbono al concreto y su reacción con los hidróxidos, la resistencia química de concretos expuestos a sustancias que pueden causar deterioros, la cristalización de sales por la exposición a sulfatos, entre otros.

Se debe destacar que un problema común de durabilidad se presenta en las superficies del concreto colocado, esto debido al sangrado excesivo que aumenta la relación agua/cemento en esta zona y genera una camada superficial débil. Ante esto se debe evitar el exceso de agua adicionada por trabajabilidad a las mezclas de concreto, así como la utilización de metodologías correctas de colocación y acabado.

3 Desarrollo Experimental

3.1 Agregados gruesos

Se utilizaron agregados gruesos de dos fuentes distintas para la evaluación experimental y la producción de concreto:

1. Quebrador Cerro Minas: El material utilizado es piedra denominada quintilla, es decir, posee un tamaño máximo nominal de 12,7 mm (1/2"). El agregado es obtenido a partir de la trituración de roca sólida que luego es cribada y lavada para garantizar la distribución granulométrica y eliminar las partículas de limos y arcillas del material. El material es de coloración grisácea con tonos rojizos y amarillos (Figura 4), no presenta

olor y es de textura rugosa y forma angulosa, las cuales son características óptimas para su utilización en las mezclas de concreto, dado que permiten una mayor adherencia del agregado con la pasta. La roca de la que se extrae es una lava andesítica formada a partir de la compactación de la ceniza volcánica.



Figura 4: Agregado grueso de Cerro Minas

2. Agregados Guápiles Se utilizó un material con tamaño máximo nominal de 12,7 mm (1/2"). La piedra se obtiene a partir de un proceso de extracción del material primario que pasa a una planta primaria donde se tritura y se criba para la clasificación de arena, gravilla y piedra primaria para el siguiente proceso, luego se lleva a cabo un segundo proceso de trituración y cribado en una planta secundaria donde, además, se lava el material para eliminar impurezas. El material presenta mucho polvo, es de coloración grisácea con tonalidades amarillentas, no presenta olor, tiene una forma angulosa, textura rugosa y el tamaño de las partículas es visiblemente más uniforme que la piedra de Cerro Minas (Figura 5). El material primario se extrae del Río Chirripó, en la zona de Guápiles, cantón de Pococí, Limón.



Figura 5: Agregado grueso de Guápiles

Ambos agregados fueron sometidos a las mismas pruebas de laboratorio para su caracterización y comparación con los requerimientos mínimos de cumplimiento para su uso en la producción de concreto. Las muestras de agregado para las pruebas se tomaron desde su almacenamiento en apilamientos pequeños (Figura 6) según la norma INTE C67 y se obtuvieron los especímenes de ensayo mediante reducción según la norma INTE C62.



Figura 6: Almacenamiento de agregados gruesos en laboratorio

Inicialmente se obtuvo la granulometría de ambas piedras con el ensayo INTE C46, ambos se comprobaron con los requerimientos de la norma INTE C15 (ASTM C133) para el tamaño número 7 que comprende el agregado grueso entre los tamices de 12,5 mm (1/2") y 4,75 mm (No. 4). Los resultados se presentan en el Cuadro 7 para la piedra de Cerro Minas y en el Cuadro 8 para la de Guápiles.

Cuadro 7: Resultados de granulometría de piedra de Cerro Minas.

Tamiz		Masa retenida g	Porcentaje retenido	Retenido Acumulado	Porcentaje Pasando
mm	in				
19	3/4	0	0	0	100
12,5	1/2	336,1	9	9	91
9,5	3/8	745,9	21	30	70
4,75	Nº4	1626,5	45	76	24
2,36	Nº8	754,6	21	97	3
Porcentaje de pérdida por lavado					0,5%

Cuadro 8: Resultados de granulometría de piedra de Guápiles.

Tamiz		Masa retenida g	Porcentaje retenido	Retenido Acumulado	Porcentaje Pasando
mm	in				
19	3/4	0	0	0	100
12,5	1/2	10,3	0	0	100
9,5	3/8	982,8	20	20	80
4,75	Nº4	3813,4	77	97	3
2,36	Nº8	93,1	2	99	1
Porcentaje de pérdida por lavado					1,6%

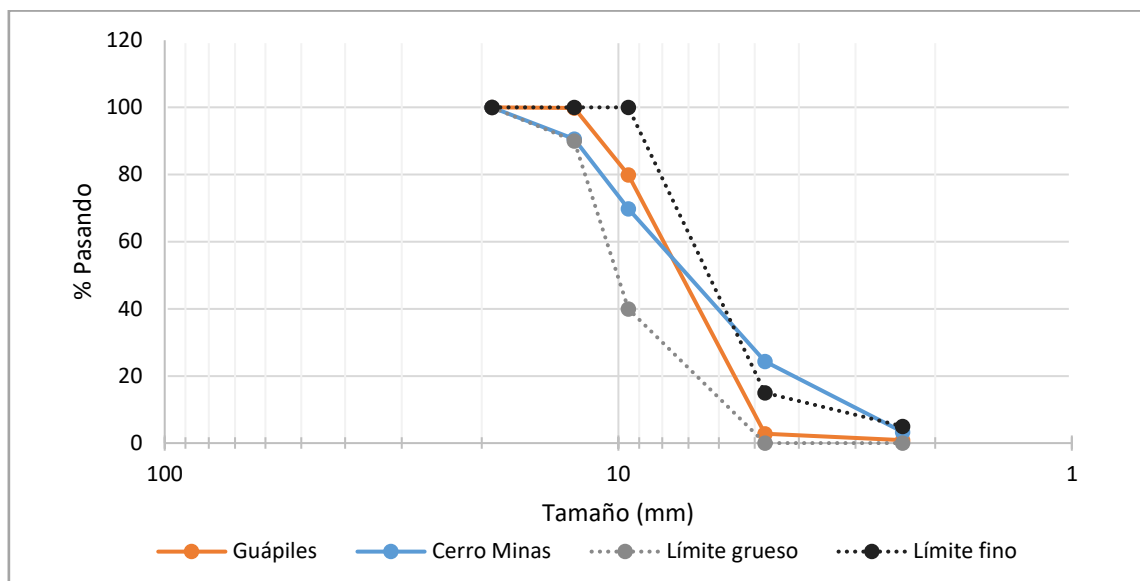


Figura 7: Curvas granulométricas de agregados gruesos.

En la Figura 7 se presentan las curvas granulométricas de ambas piedras utilizadas, así como los límites que se deben cumplir según la norma ASTM C33. En los resultados se puede observar que la piedra de Cerro Minas sobrepasa el límite fino establecido para el Tamiz de 4,75 mm (N°4), sin embargo, no se modificó la granulometría dado que el estudio busca la evaluación de concretos producidos con insumos nacionales tal y como se obtienen en el mercado.

Luego de la obtención de la granulometría de cada agregado grueso, se procedió con los ensayos de absorción y gravedad específica (ASTM C127/INTE C68), así como pesos unitarios tanto sueltos como envarillados (ASTM C29/INTE C58) ya que los resultados de estos ensayos son necesarios para realizar los diseños de mezcla. Los resultados de absorción y gravedad específica se presentan en el Cuadro 9 y los pesos unitarios, así como los porcentajes de vacíos, se pueden ver en el Cuadro 10.

Cuadro 9: Resultados del ensayo de absorción y gravedad específica de agregados gruesos (INTE C68)

Fuente	G_s	G_{bs}	G_{bss}	Absorción
Cerro Minas	2,69	2,56	2,61	1,9%
Guápiles	2,79	2,64	2,69	1,9%

Cuadro 10: Resultados del ensayo de densidad masiva (peso unitario) de agregados gruesos (INTE C58)

Fuente	Peso Unitario (kg/m ³)		% Vacíos	
	Suelto	Varillado	Suelto	Varillado
Cerro Minas	1500	1550	43	41
Guápiles	1500	1540	41	40

3.2 Agregados finos

Se utilizaron agregados finos de dos fuentes distintas para la evaluación experimental y la producción de concreto:

1. Quebrador Cerro Minas: Se utilizó arena industrial con un tamaño máximo nominal de 4,75 mm, producido en Santa Ana y obtenida a partir de un proceso de extracción, trituración, cribado y lavado de material de cantera. El material tiene una coloración gris con tonos café (Figura 8) y no presenta olores perceptibles. La roca madre de la arena, al igual que el agregado grueso de Cerro Minas, es una andesita.



Figura 8: Agregado fino de Cerro Minas.

2. Agregados Guápiles: El material utilizado es arena industrial con un tamaño máximo nominal de 6,35 mm según el productor. Obtenida a partir del proceso de extracción de material primario del río Chirripó en la zona de Guápiles, que luego es triturado y cribado para obtener el tamaño requerido. El material presenta una coloración grisácea y amarillenta (Figura 9), presenta un olor perceptible debido a su origen de río y deja marcas visibles en los recipientes en que se coloca (partículas finas).



Figura 9: Agregado fino de Guápiles

Al igual que para el agregado grueso, los muestreos de arena se realizaron según la norma INTE C67 y se redujeron a tamaños de ensayo según la norma INTE C62. Inicialmente se realizó el análisis granulométrico de ambas arenas para la comparación con los límites establecidos en la norma INTE C15 y para la obtención del módulo de finura, el cual es necesario para el diseño de mezcla con el método del ACI 211. Los resultados del ensayo de granulometría se presentan en el Cuadro 11 para la arena de Cerro Minas y en el Cuadro 12 para la arena de Guápiles.

Cuadro 11: Resultados de granulometría de arena de Cerro Minas.

Tamiz	Masa retenida g	Porcentaje retenido	Retenido Acumulado	Porcentaje Pasando
9,5 mm	0	0	0	100
4,75 mm (N°4)	2,6	0	0	100
2,36 mm (N°8)	513,14	30	30	70
1,18 mm (N°16)	515,2	30	61	39
600 μm (N°30)	279,3	16	77	23
300 μm (N°50)	160,6	9	86	14
150 μm (N°100)	120,4	7	93	7
75 μm (N°200)	90,8	5	99	1
Porcentaje de pérdida por lavado				2,3%
MF				3,48

Cuadro 12: Resultados de granulometría de arena de Guápiles

Tamiz	Masa retenida (g)	Porcentaje retenido	Retenido Acumulado	Porcentaje Pasando
9,5 mm	0,0	0	0	100
4,75 mm (N°4)	25,7	2	2	98
2,36 mm (N°8)	325,4	19	21	79
1,18 mm (N°16)	422,9	25	46	54
600 μm (N°30)	417,7	25	70	30
300 μm (N°50)	280,6	17	87	13
150 μm (N°100)	157,4	9	96	4
75 μm (N°200)	58,7	3	99	1
Porcentaje de pérdida por lavado				2,2%
MF				3,21

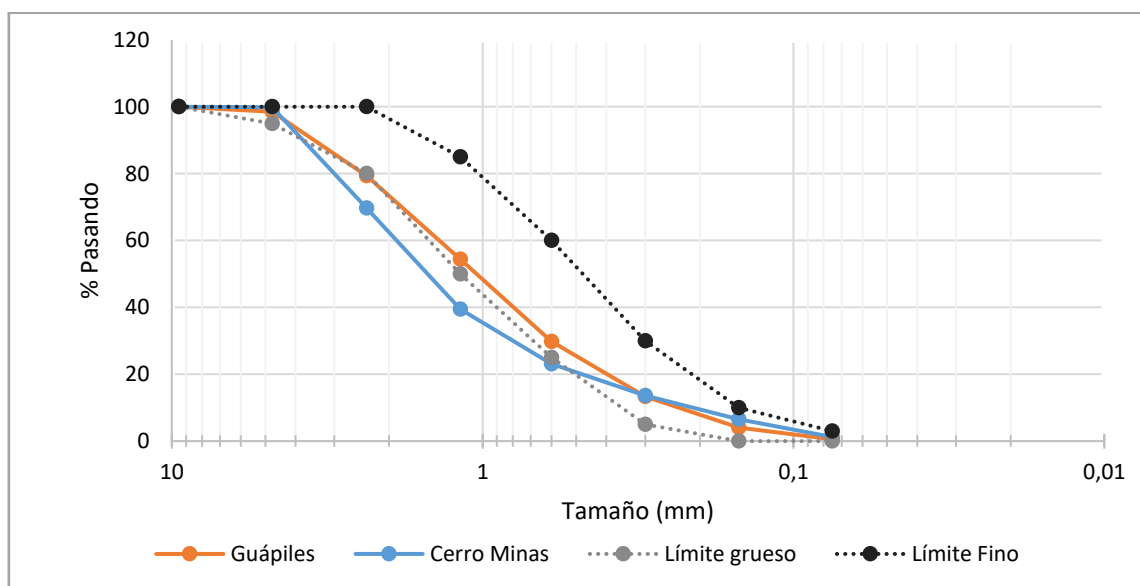


Figura 10: Curvas granulométricas de agregado finos.

En la Figura 10 se puede observar que ambas arenas incumplen con el límite grueso establecido en la norma INTE C15 para agregados finos. Para el caso de la arena de Guápiles solo se sobrepasa el límite grueso para el tamiz de 2,36 mm (N°8), mientras que para la de Cerro Minas se sobrepasan los límites de los tamices de 2,36 mm (N°8), de 1,18 mm (N°16) y 600 μm (N°30). Esta distribución de tamaños también se ve reflejada en el módulo de finura de las arenas obteniendo un valor más alto para la arena de Cerro Minas en comparación con la de Guápiles. Al igual que con la piedra, dado que la evaluación del concreto requiere el uso de materiales del mercado nacional, no se modificó la granulometría de las arenas para el cumplimiento de la norma.

Se determinó, a partir del ensayo INTE C59 (ASTM C40), que ambas arenas utilizadas se encuentran libres de impurezas orgánicas como se muestra en la Figura 11 para la arena de Cerro Minas y en la Figura 12 para la arena de río de Guápiles.



Figura 11: Prueba de impurezas orgánicas para arena de Cerro Minas.



Figura 12: Prueba de impurezas orgánicas para arena de Guápiles.

La caracterización continuó con los valores de peso unitario, gravedad específica y absorción para cada arena, los cuales son necesarios para el cálculo de las proporciones en los diseños de mezcla realizados. Para obtener estos valores se utilizaron los métodos de ensayo INTE C58 (ASTM C127) para el peso unitario y el porcentaje de vacíos, así como la norma INTE C69 (ASTM C29) para la gravedad específica y absorción de cada arena, los resultados se presentan en los Cuadros 13 y 14.

Cuadro 13: Resultados del ensayo de absorción y gravedad específica de agregados finos (INTE C69)

Fuente	Gs	Gbs	Gbss	Absorción
Cerro Minas	2,68	2,54	2,59	2,1%
Guápiles	2,75	2,51	2,60	3,4%

Cuadro 14: Resultados del ensayo de densidad masiva (peso unitario) de agregados finos (INTE C58)

Fuente	*Peso Unitario (kg/m³)	% Vacíos
Cerro Minas	1550	38
Guápiles	1520	40

*Los valores corresponden al procedimiento suelto, dado que es el único requerido para el diseño de mezclas

3.3 Cemento

Para las pruebas de laboratorio se evaluó el cemento de Uso General producido por Cemex, dado que este es uno de los cementos que más se utilizan en el país a la fecha en que se presenta este trabajo. Según el fabricante, es un cemento ideal para estructuras que no demanden alta resistencia inicial y está diseñado para soportar las condiciones ambientales típicas de Costa Rica. El material cumple con el RTCR 479:2015 como cemento Modificado Mixto, tipo MM/B-(P-C)-28, el cual está compuesto por Clinker, yeso, puzolana y caliza.

El análisis experimental inició con la obtención de la densidad del cemento, el cual es el único parámetro requerido para el cálculo de proporciones según el método del ACI 211. Para obtenerlo se utilizó el método de ensayo INTE C141 (ASTM C188) con el que se obtuvo un valor de 3,02 g/cm³, el cual es común para estos cementos de uso general.

Se continuó la caracterización con los ensayos de consistencia normal (INTE C139/ASTM C187) y tiempo de fragua con aguja de Vicat (INTE C137/ASTM C191), esto con el objetivo de comparar los resultados con las con las especificaciones de la normativa nacional de cemento. Para la obtención de la pasta para los ensayos se utilizó la norma INTE C144 (ASTM C305), práctica para el mezclado mecánico de pastas y morteros de cemento hidráulico de consistencia plástica. Los resultados de los ensayos se presentan en el Cuadro 15.

Cuadro 15: Resultados de consistencia normal y tiempo de fragua del cemento Cemex de uso general.

Agua de consistencia normal (%)	Tiempo de fragua inicial (min)	Tiempo de fragua final (min)
26,4%	143	264

Como se presenta en el Cuadro 4, el reglamento técnico nacional RTCR 479-2015 establece que el tiempo de fragua inicial mínimo es de 45 minutos y el tiempo de fragua final máximo es de 420 minutos, como se observa en los resultados el cemento utilizado cumple con ambos parámetros.

Seguidamente se realizaron los ensayos de flujo y resistencia, siendo esta última una de las propiedades más importantes del cemento. Para esta caracterización se aplicaron los ensayos INTE C143 (ASTM C1437) para la determinación del flujo y el INTE C57 (ASTM C109) para el moldeo y determinación de la resistencia de especímenes de mortero. Ambos ensayos se aplican consecutivamente con la misma muestra de mortero debido a que este debe cumplir con un valor específico de flujo (110 ± 5) para ser utilizado en el moldeo de especímenes cúbicos. Para la obtención del mortero para los ensayos se utilizó la norma INTE C144 (ASTM C305), práctica para el mezclado mecánico de pastas y morteros de cemento hidráulico de consistencia plástica. En el Cuadro 16 se presentan los resultados de flujo y en el Cuadro 17 los de resistencia.

Cuadro 16: Resultados de flujo de mortero de cemento Cemex de Uso General.

Agua (%)	Flujo
44%	111,6

Cuadro 17: Resultados de resistencia a la compresión de mortero de cemento Cemex de Uso General

Espécimen	Edad	Carga (N)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)
1	7	43000	17,2	16,0
2		46000	18,4	
3		31000	12,4	
4	28	59000	23,6	25,1
5		63000	25,2	
6		66000	26,4	

3.4 Diseño de mezcla

Los diseños de mezcla se realizaron con el procedimiento descrito en el ACI 211.1-91 utilizando las propiedades de los materiales obtenidas experimentalmente con las pruebas descritas previamente.

Inicialmente se realizan diseños para las cuatro resistencias esperadas de 210 kg/cm², 280 kg/cm², 350 kg/cm² y 420 kg/cm², por lo que se realizaron cuatro diseños por cada fuente de

agregados utilizada. Estos diseños iniciales se realizaron siguiendo las recomendaciones del manual con diversas modificaciones según los requerimientos y los materiales utilizados.

Se utilizó para el diseño un asentamiento esperado de $100 \text{ mm} \pm 25 \text{ mm}$, según las recomendaciones del manual para concretos utilizados en vigas, muros y columnas considerando este como el uso más general de los concretos estructurales, además, se utilizó este límite para asegurar una buena trabajabilidad de las mezclas a realizar.

Inicialmente se realizaron los diseños con los factores de seguridad establecidos en el ACI 211.1 para cuando no se cuenta con datos históricos, este factor depende del f'_c de diseño por lo que es variable para los distintos diseños realizados. Con estos diseños se realizaron las mezclas de prueba para una resistencia de 210 kg/cm^2 para cada tipo de agregado.

Cuadro 18: Proporciones de diseños de mezcla iniciales para mezclas de prueba por fuente de agregado.

Resistencia de diseño		Fuente de agregado	Proporción de agregados por peso seco	a/c
kg/cm ²	MPa			
210	20,6	Cerro Minas	1 : 2,23 : 1,91	0,55
		Guápiles	1 : 2,16 : 2,04	0,55

Con estos diseños se obtuvieron resultados de resistencia muy por encima de los valores de diseño (Ver Cuadro 22 y Cuadro 24), además no se cumplieron los requisitos de trabajabilidad (Ver Cuadro 21 y Cuadro 23) por lo que se procedió a variar los diseños en las relaciones agua/cemento y en la cantidad de agua utilizada, para obtener los valores requeridos en cada mezcla. Las variaciones en la relación agua/cemento de cada diseño se realizaron en función de los resultados de resistencia obtenidos a lo largo del avance de las pruebas, por lo que se realizaron ajustes a medida que se obtenían resultados experimentales. Las variaciones en los contenidos de agua por metro cúbico de concreto de realizaron en función de los resultados de asentamiento, ya que a medida que se reducía la relación agua/cemento, se obtenían asentamientos menores, por lo que se aumenta el contenido de agua para aportar a la fluidez de la mezcla y obtener asentamientos dentro del rango aceptable. Los diseños finales utilizados en la investigación se muestran en el Cuadro 19 para los concretos producidos con agregados de Guápiles y en el Cuadro 20 para los concretos con agregados de Cerro Minas. Los diseños presentados tienen la relación agua/cemento ajustada según la humedad de dosificación de los agregados

Cuadro 19: Proporciones de diseños de mezcla por resistencia y muestra para mezclas producidas con agregados de Guápiles.

Diseño	Muestra	Proporción por peso seco	a/c	Agua de mezcla (kg/m ³)
210 kg/cm ²	1	1 : 2,73 : 2,46	0,68	220
	2	1 : 2,73 : 2,46	0,68	220
280 D1 kg/cm ²	1	1 : 2,18 : 2,08	0,58	220
	2	1 : 2,18 : 2,08	0,58	220
280 D2 kg/cm ²	1	1 : 1,94 : 1,93	0,60	225
	2	1 : 1,94 : 1,93	0,60	225
350 kg/cm ²	1	1 : 1,94 : 1,93	0,52	225
	2	1 : 1,94 : 1,93	0,52	225
420 kg/cm ²	1	1 : 1,51 : 1,65	0,47	230
	2	1 : 1,51 : 1,65	0,46	230

Cuadro 20: Proporciones de diseños de mezcla por resistencia y muestra para mezclas producidas con agregados de Cerro Minas.

Diseño	Muestra	Proporción por peso seco	a/c	Agua de mezcla (kg/m ³)
210 kg/cm ²	1	1 : 2,95 : 2,36	0,68	215
	2	1 : 2,71 : 2,25	0,68	225
280 kg/cm ²	1	1 : 2,16 : 1,91	0,62	225
	2	1 : 2,21 : 1,93	0,62	223
350 kg/cm ²	1	1 : 2,11 : 1,85	0,57	220
	2	1 : 2,01 : 1,81	0,54	225
420 kg/cm ²	1	1 : 1,42 : 1,48	0,48	240

3.5 Mezclas de concreto

Las mezclas se realizaron en una mezcladora con una capacidad de tres sacos, dosificando los materiales por peso y mezclando según el procedimiento descrito en la norma ASTM C192. Se produjeron 17 mezclas, cada una con un volumen total de 0,055 m³ para el moldeo de nueve cilindros de 100 mm x 200 mm para fallas a compresión simple a 7, 14 y 28 días y cinco cilindros de 150 mm x 300 mm para los ensayos de resistencia a la tracción y módulo de elasticidad, tomando en cuenta un 20 % adicional por desperdicio de material durante el mezclado y pruebas al concreto fresco.



Figura 13: Dosificación de materiales

A todas las mezclas se le realizaron los ensayos de asentamiento (INTE C41/ASTM C143), contenido de aire (INTE C42/ASTM C231), temperatura (INTE C43/ASTM C1064) y peso unitario (INTE C72/ASTM C138) para comprobar que cumplieran con los valores esperados de diseño. Luego se procedía con el moldeo de especímenes según la norma ASTM C192, utilizando el método de varillado para la consolidación del concreto en los moldes, una vez moldeados se cubrían los especímenes con una bolsa plástica y eran desmoldados $24 \text{ h} \pm 8 \text{ h}$ después y se guardaban en la cámara húmeda para su curado hasta la fecha de falla.



Figura 14: Especímenes cilíndricos de concreto



Figura 15: Almacenamiento de especímenes en la cámara húmeda

Inicialmente se realizaron dos mezclas de prueba con los diseños iniciales para una resistencia de 210 kg/cm^2 , una para cada tipo de agregado utilizado. Esto se hizo con el objetivo de determinar el cumplimiento de las mezclas con los valores esperados determinados en el diseño de mezcla y permitir realizar las modificaciones necesarias en casos de no cumplimiento. A ambas mezclas se le realizaron los ensayos de asentamiento, contenido de aire, peso unitario y resistencia a la compresión uniaxial a 7 días para predecir si los valores de resistencia a los 28 días cumplían con el valor de diseño. Los resultados de los ensayos de prueba se presentan a continuación.

Cuadro 21: Propiedades del concreto fresco para mezcla de prueba con agregados de Guápiles.

Asentamiento (mm)	Contenido de aire (%)	Peso Unitario (kg/m^3)
60	2,2	2234

Cuadro 22: Resistencia a la compresión de mezcla de prueba con agregados de Guápiles.

Especímen	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm^2)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
					(MPa)	(kg/cm^2)	
1	101,08	202,33	8024,5	210,5	26,2	267	3
2	101,10	203,29	8028,2	211,6	26,4	269	3
3	100,96	202,36	8005,0	218,0	27,2	278	3
PROMEDIO			8019	213	26,6	271	
DESV.EST			12,5	4,06	0,55	5,58	

Cuadro 23: Propiedades del concreto fresco para mezcla de prueba con agregados de Cerro Minas.

Asentamiento (mm)	Contenido de aire (%)	Peso Unitario (kg/m^3)
5	2,5	2306

Cuadro 24: Resistencia a la compresión de mezcla de prueba con agregados de Cerro Minas.

Especimen	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
					(MPa)	(kg/cm ²)	
1	100,0	198,3	7855,6	209,7	26,7	272	3
2	100,2	199,3	7882,3	191,4	24,3	248	3
PROMEDIO			7868,9	200,5	25,5	260	
DESV.EST			18,9	13,0	1,71	17,4	

De los resultados obtenidos para ambas mezclas son destacables dos aspectos importantes, el primero está relacionado a la trabajabilidad de las mezclas, debido a que el asentamiento en ambos casos incumplió con el valor mínimo aceptable según la norma ASTM C94 (100 mm \pm 25 mm) siendo notablemente menor para la mezcla con agregados de Cerro Minas. El segundo está relacionado con la resistencia a la compresión, debido a que se obtuvieron valores mayores a la resistencia esperada a 28 días en tan solo 7 días de curado con resistencias de 271 kg/cm² para la mezcla de Guápiles y 260 kg/cm² para la de Cerro Minas.

Ante estos resultados se concluyó que era necesario hacer variaciones en los diseños originales, esto debido a que se tenía un sobrediseño en cuanto a resistencia y la trabajabilidad de las mezclas no era adecuada. Por esta razón se procedió a realizar los diseños sin ajuste por datos históricos, es decir, $\Delta f'_c = 0$. Esto llevó a la utilización de relaciones agua/cemento mayores. Además, se aumentó la cantidad de agua por metro cúbico de concreto para aumentar el asentamiento al valor esperado de diseño y mejorar la trabajabilidad de las mezclas. A medida que se avanzaba con las pruebas, se realizaron ajustes en las relaciones agua/cemento según los resultados obtenidos de resistencia.

3.6 Ensayos a concreto endurecido

El concreto endurecido fue evaluado mediante tres ensayos como ya se ha mencionado previamente; resistencia a la compresión simple según la norma INTE C45 (ASTM C78), determinación del módulo de elasticidad según la norma ASTM C469 y la resistencia a la tracción según la prueba brasileña (ASTM C496). En esta sección se presenta un resumen de todos los resultados obtenidos para las pruebas al concreto endurecido para cada diseño de mezcla realizado, se utilizará una notación especial para resumir la presentación de los resultados; CM es para las mezclas producidas con agregados de Cerro Minas y G para las que se utilizaron agregados de Guápiles, seguido por la resistencia de diseño en kg/cm² (p.e. CM210: Concreto de 210 kg/cm² producido con agregados de Cerro Minas).



Figura 16: Fallas a compresión simple de especímenes de concreto con un rango de resistencia entre 210 kg/cm^2 ($20,6 \text{ MPa}$) y 280 kg/cm^2 ($27,5 \text{ MPa}$)



Figura 17: Montaje y falla para el ensayo de módulo de elasticidad para espécimen de concreto de 210 kg/cm^2 ($20,6 \text{ MPa}$)



Figura 18: Montaje y falla para el ensayo de resistencia a la tracción de especímenes de concreto con un rango de resistencia entre 210 kg/cm^2 ($20,6 \text{ MPa}$) y 420 kg/cm^2 ($41,2 \text{ MPa}$)

3.6.1 Concreto de 210 kg/cm² con agregados de Guápiles

Cuadro 25: Resultado de ensayos al concreto fresco G210

Mezcla	Asentamiento (mm)	Temperatura (°C)	Contenido de aire (%)	Peso Unitario (kg/m ³)
1	85	24,4	1,9	2305
2	95	25,1	2,1	2068
Promedio	90	24,8	2,0	2186
Desv. Est.	7,07	0,49	0,14	167,8
CV %	7,9%	2,0%	7,1%	7,7%

Estas mezclas son el resultado de las primeras variaciones realizadas en los diseños originales, en las cuales se utilizó una relación agua/cemento de 0,68 a partir de las recomendaciones del ACI 211 sin utilizar un factor de seguridad y un contenido de agua de 220 kg/m³ para ajustar el asentamiento obtenido en la mezcla de prueba. Se obtiene un asentamiento promedio de 90 mm que se encuentra dentro del rango aceptable (100 mm ± 25 mm) y que, debido al tamaño y forma del agregado grueso de río, presenta condiciones de trabajabilidad adecuadas.

La temperatura se encuentra en un rango aceptable según el límite máximo para su colocación en la construcción del ACI 305R con un valor promedio de 24,8 °C, siendo esta orden de magnitud la común para todas las mezclas de esta investigación debido a las condiciones de almacenamiento de los agregados y el cemento que no se variaron durante el proceso de pruebas.

En cuanto al contenido de aire, el valor promedio se encuentra solo 0,5 % por debajo del esperado por arrastre esto demuestra un procedimiento de mezclado adecuado debido a que no se acarrea una cantidad excesiva de aire que puede generar alteraciones en la resistencia final del concreto endurecido.

El peso unitario promedio se encuentra ligeramente por debajo del rango para concretos de peso normal (2200 kg/m³ – 2400 kg/m³) esto debido a que se obtiene un valor muy bajo en una de las mezclas, sin embargo, esto se atribuye a un error en el procedimiento de ensayo ya que no se espera una variación muy significativa cuando las mezclas tienen exactamente las mismas proporciones y se elaboraron el mismo día.

Cuadro 26: Resultados de resistencia a la compresión simple G210

Mezcla	7 días		14 días		28 días	
	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²
1	19,0	194	25,4	259	28,8	293
2	18,9	193	24,6	251	29,4	300
Promedio	19,0	193	25,0	255	29,1	296
Desv. Est.	0,02	0,24	0,56	5,69	0,47	4,76
CV %	0,1%		2,2%		1,6%	

Como se puede observar, aún con una relación agua/cemento alta de 0,68 se obtiene un valor de resistencia promedio 41% mayor al valor esperado a los 28 días. Aunque el concreto cumple con la resistencia especificada a 28 días, una resistencia muy alta es contraproducente tanto en aspectos económicos (concretos con un contenido de cemento mayor al necesario) como en aspectos técnicos, debido a que puede variar el comportamiento del concreto en cuanto a deformabilidad y fragilidad.

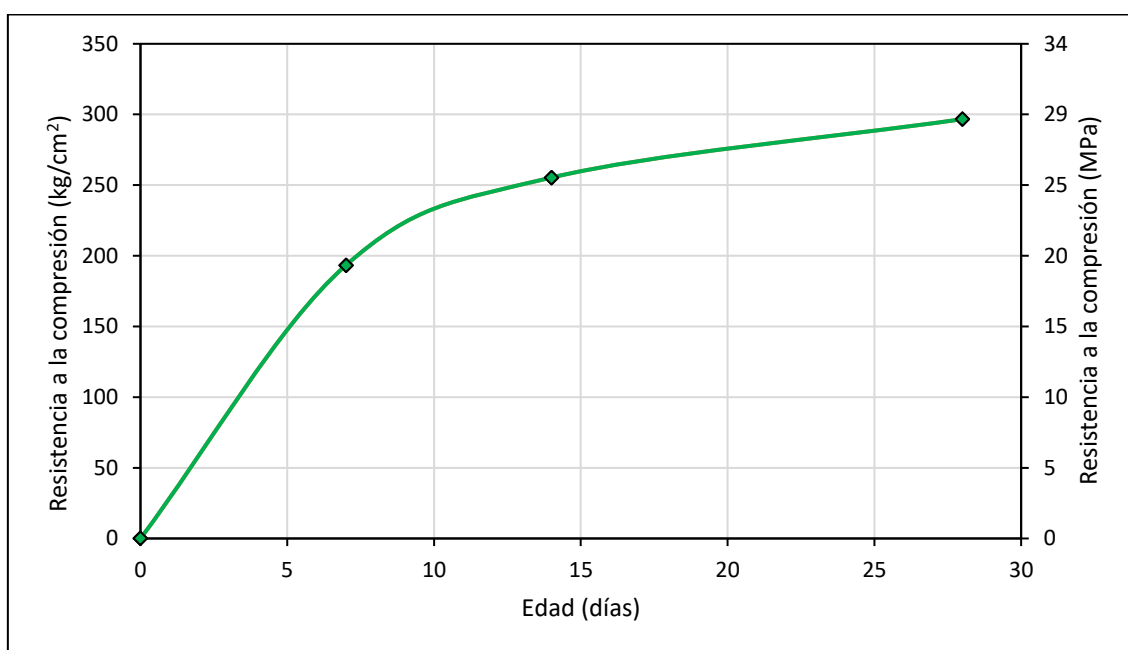


Figura 19: Desarrollo de resistencia según edad de falla G210

En cuanto a la curva de desarrollo de resistencia se obtiene la forma típica con una ganancia de resistencia más rápida en la primera semana y progresivamente más lenta hasta los 28 días. A 7 días se obtiene una resistencia del 65 % de la resistencia a 28 días, y a 14 días un 86%, estos resultados coinciden con lo esperado para concretos producidos con cementos de uso general.

Cuadro 27: Resultados de resistencia a tracción y porcentaje respecto a resistencia a compresión G210

Mezcla	Resistencia a la tracción		% de f'c
	MPa	kg/cm ²	
1	2,5	29,7	8,8%
2	3,1	31,1	10,4%
Promedio	2,8	30,4	9,6%
Desv. Est.	0,37	1,04	0,01
CV %	13,4%		

Los resultados de resistencia a la tracción son los esperados, ya que representan cerca del 10% del valor de resistencia a la compresión simple a la misma edad de falla, además durante los ensayos se presentan fallas frágiles (súbitas) con un plano de falla claro. (Ver Figura 18)

Cuadro 28: Resultados de módulo de elasticidad y resistencia a compresión respectiva G210

Mezcla	Módulo de elasticidad (E _c)		Resistencia a la compresión	
	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²
1	27861	284101	30,1	307
2	26405	269261	28,1	286
Promedio	27133	276681	29,1	297
Desv. Est.	1029	10494	1,46	14,8
CV %	3,8%		5,0%	

Los resultados se obtienen a partir del "método de la cuerda" explicado en la sección 2.3.4, realizando el ensayo 2 veces para cada mezcla y obteniendo el promedio. El valor promedio obtenido en MPa se compara con el valor teórico esperado según la ecuación del ACI 318S-19, la cual se evalúa con el valor real de resistencia a la compresión difiere en un 7% del valor, siendo el resultado obtenido mayor al teórico.

Para evaluar los resultados de módulo de elasticidad obtenidos, se grafican los puntos de esfuerzo-deformación de ambas repeticiones con el objetivo de determinar que se cumpla con la teoría y el gráfico de esfuerzo-deformación parte del origen, es decir, que se parte de una deformación unitaria igual a cero cuando no se tiene esfuerzo. Debido a la limitación del método experimental utilizado, no es posible ajustar los resultados debido a que no se cuenta con una cantidad suficiente de datos en el gráfico, sin embargo, los gráficos permiten determinar la validez de los resultados según la cercanía del intercepto a cero.

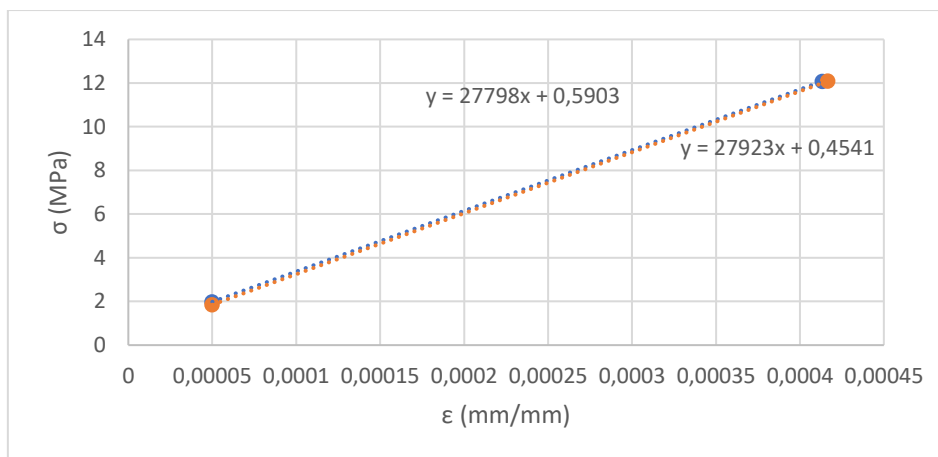


Figura 20: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a $0.4 f'c$ para G210 Mezcla 1

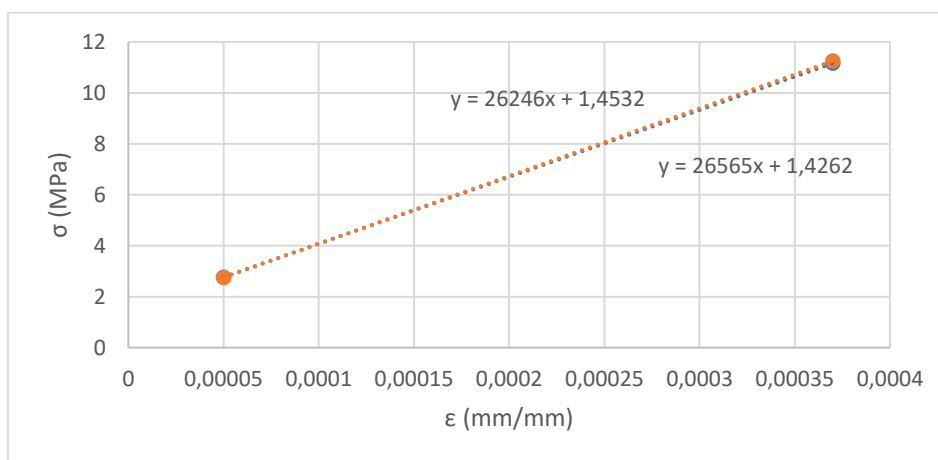


Figura 21: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a $0.4 f'c$ para G210 Mezcla 2

De los gráficos presentados se destaca que para la mezcla 1 se obtienen resultados más confiables que para la mezcla 2, esto debido a que el intercepto promedio para la segunda mezcla se aleja más del cero con un valor de 1,4. El valor promedio del intercepto para la mezcla 1 es de 0,5 MPa por lo que se considera mejor que los resultados de la mezcla 2, sin embargo, estos valores aún deben ser ajustados y representan un error en las estimaciones que se deben considerar al momento de comparar los resultados con los valores teóricos.

3.6.2 Concreto de 210 kg/cm² con agregados de Cerro Minas

Cuadro 29: Resultado de ensayos al concreto fresco CM210

Mezcla	Asentamiento (mm)	Temperatura (°C)	Contenido de aire (%)	Peso Unitario (kg/m ³)
1	30	23,0	1,4	2329
2	75	24,7	1,8	2260
Promedio	55	23,9	1,6	2294
Desv. Est.	31,8	1,20	0,25	48,5
CV %	60,6%	5,0%	15,7%	2,1%

Para este caso se puede observar una diferencia significativa en el asentamiento de ambas mezclas debido a que, ante un incumplimiento de la mezcla 1 con el rango aceptable de asentamiento, se aumentó el contenido de agua por metro cúbico de concreto, pasando de 215 kg/m³ a 225 kg/m³. Ante este cambio se aumentó también la cantidad de cemento de la mezcla para obtener la misma relación agua/cemento de 0,68 y mantener el carácter comparativo entre las mezclas en términos de la resistencia a la compresión, las variaciones en los resultados se evalúan según el ACI 214R-11.

En este caso la temperatura se mantiene en un rango aceptable el contenido de aire arrastrado es inferior al 2% en ambos casos, con menor contenido en la mezcla con menos agua por metro cúbico de concreto. Se obtienen también pesos unitarios dentro del rango de concretos de peso normal con un valor promedio de 2294 kg/m³.

Cuadro 30: Resultados de resistencia a la compresión simple CM210

Mezcla	7 días		14 días		28 días	
	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²
1	17,3	176,5	20,5	208,7	24,8	252,6
2	17,1	174,5	21,1	215,4	23,7	241,3
Promedio	17,2	175,5	20,8	212,1	24,2	247,0
Desv. Est.	0,14	1,40	0,47	4,74	0,79	8,01
CV %	0,8%		2,2%		3,2%	

Debido a que se mantuvo la relación agua/cemento, se puede observar la consistencia en los resultados de ambas mezclas con un valor de $f'c$ promedio de 24,2 MPa (247 kg/cm²). Con estos resultados fue posible ajustar los valores de la relación agua/cemento en las demás mezclas producidas con agregados de Cerro Minas. Aunque se supera el valor esperado de $f'c$, cabe destacar que para la misma relación agua/cemento de 0,68 se obtuvo una resistencia 20% menor que la mezcla producida con agregados de Guápiles.

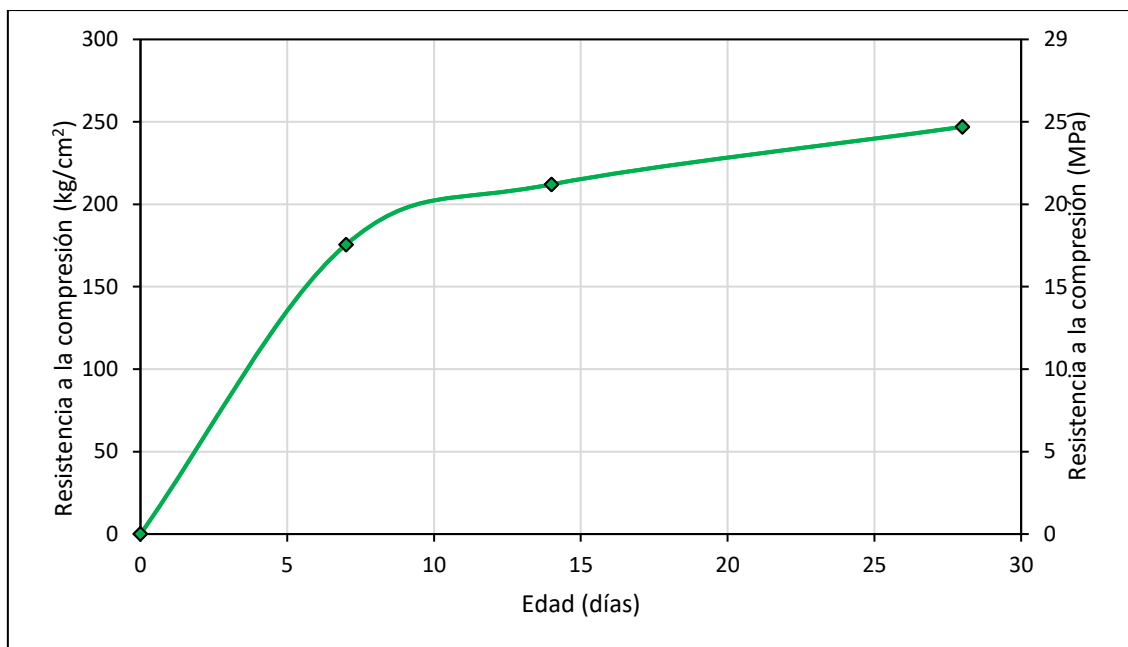


Figura 22: Desarrollo de resistencia según edad de falla CM210

En cuanto a la resistencia a tracción para este diseño, se obtienen valores esperados según la resistencia a la compresión con un promedio de 12,5%. Se destaca que el porcentaje obtenido es mayor al 9,6% de las mezclas de 210 kg/cm² producidas con agregados de Guápiles.

Cuadro 31: Resultados de resistencia a tracción y porcentaje respecto a resistencia a compresión CM210

Mezcla	Resistencia a la tracción		% de $f'c$
	MPa	kg/cm ²	
1	2,9	29,7	12%
2	3,2	32,5	13%
Promedio	3,0	31,1	13%
Desv. Est.	0,20	2,00	0,01
CV %	6,4%		

Cuadro 32: Resultados de módulo de elasticidad y resistencia a compresión respectiva CM210

Mezcla	Módulo de elasticidad (E_c)		Resistencia a la compresión	
	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²
1	26954	274851	24,3	247
2	34943	356317	24,9	254
Promedio	30948	315584	24,6	251
Desv. Est.	5649	57606	0,44	4,46
CV	18,3%		1,8%	

De los resultados se destaca que el valor del módulo de elasticidad promedio es mayor al obtenido para los concretos producidos con agregados de Guápiles, incluso cuando estos presentaron resistencias a la compresión mayores, esto representa una discrepancia con la relación directamente proporcional de la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad.

El resultado promedio obtenido en este caso difiere en un 33% del valor teórico obtenido con la ecuación del ACI 318S-19 en MPa, siendo el valor experimental mayor al teórico. Esta diferencia se puede evaluar a partir del análisis de la graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a $0.4 f'c$.

En este caso la diferencia promedio respecto al valor teórico se debe analizar de manera separada por cada mezcla, esto debido a que la diferencia obtenida para la mezcla 1 es de 16% y la de la mezcla dos es de 49%, por lo que el valor promedio de 33% pierde significancia.

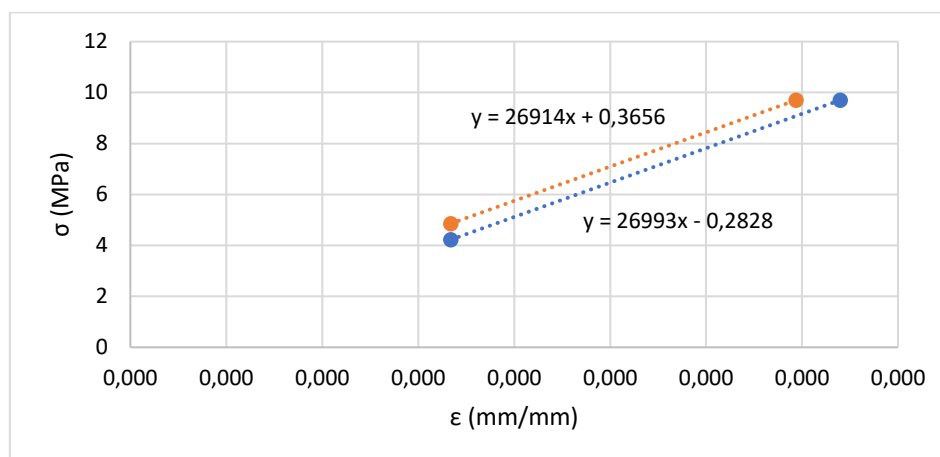


Figura 23: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a $0.4 f'c$ para CM210 Mezcla 1

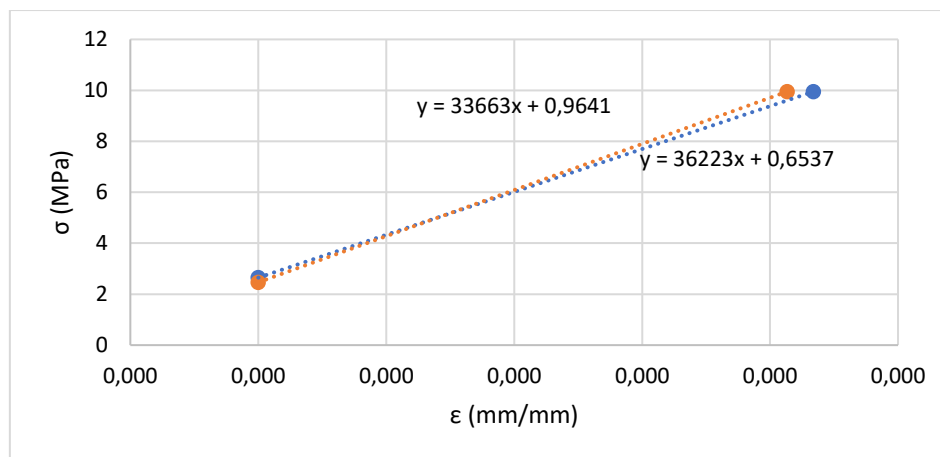


Figura 24: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a $0.4 f'c$ para CM210 Mezcla 2

En los gráficos se observa que los valores de intercepto se mantienen cercanos a cero, sin embargo, se acercan más los de la mezcla 1, la cual presenta una diferencia menor respecto a la estimación teórica que la mezcla 2. Este comportamiento indica un mayor acercamiento al valor teórico del módulo de elasticidad conforme el intercepto de la graficación se acerca al valor teórico de cero.

3.6.3 Concreto de 280 kg/cm² con agregados de Guápiles

Debido a las condiciones de humedad de ambiente presentadas, la mezcla inicialmente diseñada para 350 kg /cm² se elaboró con una relación agua/cemento mayor a la de diseño, esto debido a que el agregado fino utilizado se encontraba más húmedo de lo que se había medido inicialmente. Esto dio como resultado una mezcla con una relación agua/cemento de 0,60 resultando adecuada para ajustar como un diseño para 280 kg/cm², es por eso que en este punto se presentarán los resultados de ambos diseños debido a que enriquecen la comparación y el análisis.

3.6.3.1 Diseño 1

Cuadro 33: Resultado de ensayos al concreto fresco G280 D1

Mezcla	Asentamiento (mm)	Temperatura (°C)	Contenido de aire (%)	Peso Unitario (kg/m ³)
1	85	26,2	1,7	2354
2	85	25,3	1,8	2357
Promedio	85	25,8	1,7	2356
Desv. Est.	0	0,64	0,04	2,02
CV %	0,0%	2,5%	2,0%	0,1%

Para este diseño se obtiene el mismo asentamiento en ambas mezclas con un valor dentro del rango aceptable según el valor de diseño. En este punto del desarrollo experimental de la investigación es notable la diferencia presentada en cuanto a la trabajabilidad de las mezclas, esto debido a que, ante la utilización de contenidos de agua similares, las mezclas producidas con agregados de Guápiles cumplen con el asentamiento esperado y presentaron condiciones de trabajabilidad adecuadas para su manipulación, mientras que las mezclas producidas con agregados de Cerro Minas fueron significativamente menos trabajables y con asentamientos menores e incluso fuera del rango aceptable.

Las temperaturas de las mezclas para este diseño se mantienen aceptables con un valor promedio de 25,8 °C, el contenido de aire arrastrado en el proceso de mezclado se mantiene por debajo del 2% y el peso unitario se mantiene dentro del rango de concretos de peso normal, destacando valores mayores a los obtenidos para los concretos tipo G210.

Cuadro 34: Resultados de resistencia a la compresión simple G280 D1

Mezcla	7 días		14 días		28 días	
	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²
1	23,5	239,9	29,6	301,6	31,8	324,3
2	27,2	277,3	31,0	315,7	33,4	340,8
Promedio	25,4	258,6	30,3	308,7	32,6	332,5
Desv. Est.	2,59	26,42	0,97	9,93	1,14	11,65
CV %	10,2%		3,2%		3,5%	

Se obtiene un valor de resistencia promedio de 32,6 MPa (333 kg/cm²) lo cual supera en un 19% el valor esperado con una relación agua/cemento estimada según los resultados de la mezcla de prueba y los concretos producidos para el diseño de 210 kg/cm². A partir de estos resultados se estima que se requiere una relación agua/cemento de aproximadamente 0,60 para obtener un valor más cercano a los 280 kg/cm² y evitar el exceso innecesario de cemento en la mezcla.

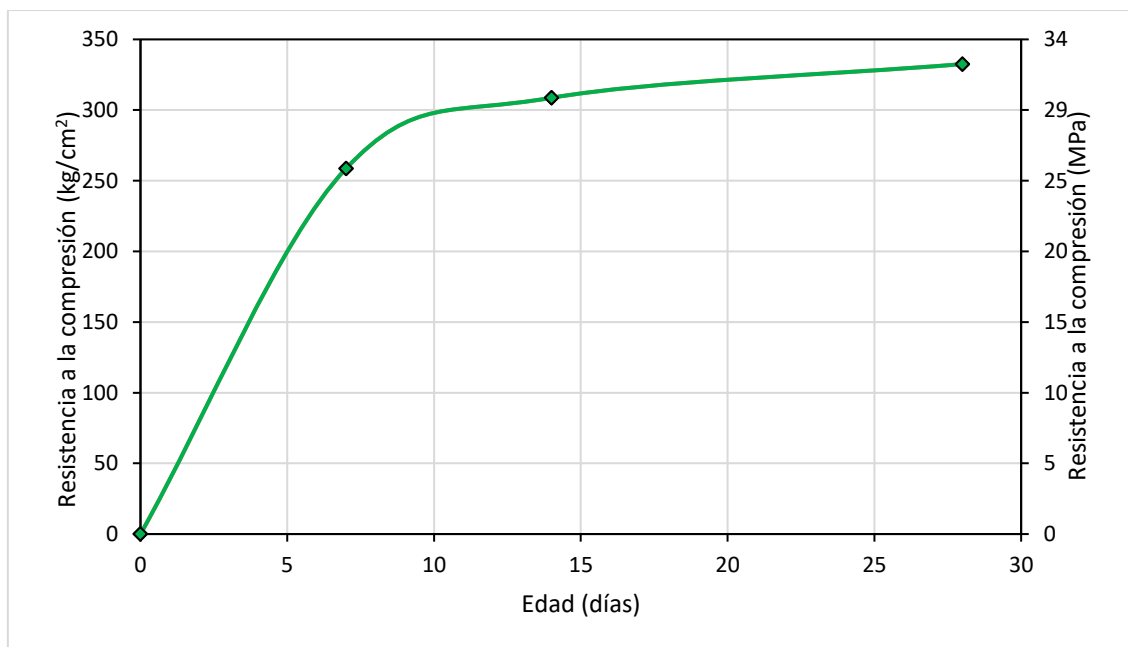


Figura 25: Desarrollo de resistencia según edad de falla G280 D1

Cuadro 35: Resultados de resistencia a tracción y porcentaje respecto a resistencia a compresión G280D1

Mezcla	Resistencia a la tracción		% de $f'c$
	MPa	kg/cm ²	
1	2,5	25,4	8%
2	3,4	34,7	10%
Promedio	2,9	14,4	9%
Desv. Est.	0,63	15,6	0,02
CV %	21,4%		

Cuadro 36: Resultados de módulo de elasticidad y resistencia a compresión respectiva G280D1

Mezcla	Módulo de elasticidad (E_c)		Resistencia a la compresión	
	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²
1	39227	400009	30,7	313
2	33055	337071	36,3	371
Promedio	36141	368540	33,5	342
Desv. Est.	4364	44504	4,01	40,9
CV	12,1%		12,0%	

La resistencia a la tracción es consistente con los resultados obtenidos previamente para los concretos tipo G210, con un valor promedio de resistencia a la tracción que representa un 9% de la resistencia a la compresión a 28 días.

El módulo de elasticidad presenta una inconsistencia en cuanto a su relación directa con la resistencia a la compresión, debido a que la mezcla 1 presenta un valor mayor de módulo de

elasticidad que la mezcla 2, teniendo esta ultima una mayor resistencia a la compresión. El resultado promedio está por encima del valor teórico en un 33%, diferencia significativamente superior a la obtenida en los resultados del concreto tipo G210, pero similar a la obtenida para el concreto tipo CM210.

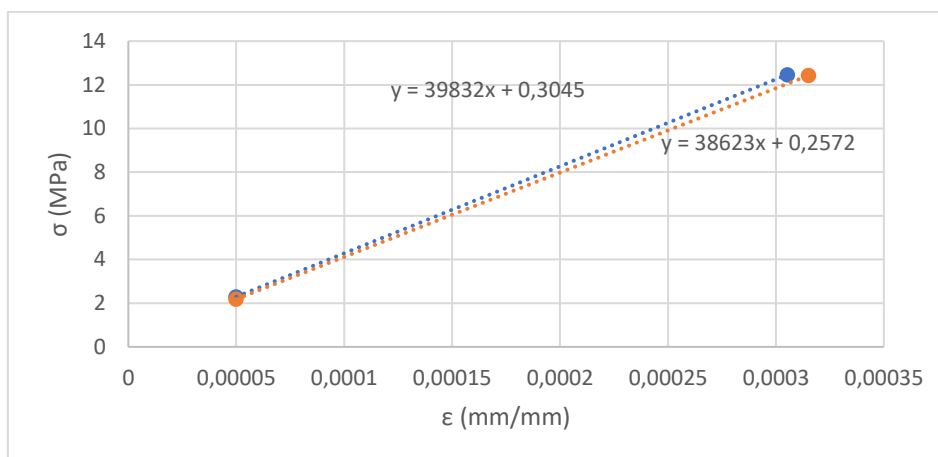


Figura 26: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a $0.4 f'c$ para G280D1 Mezcla 1

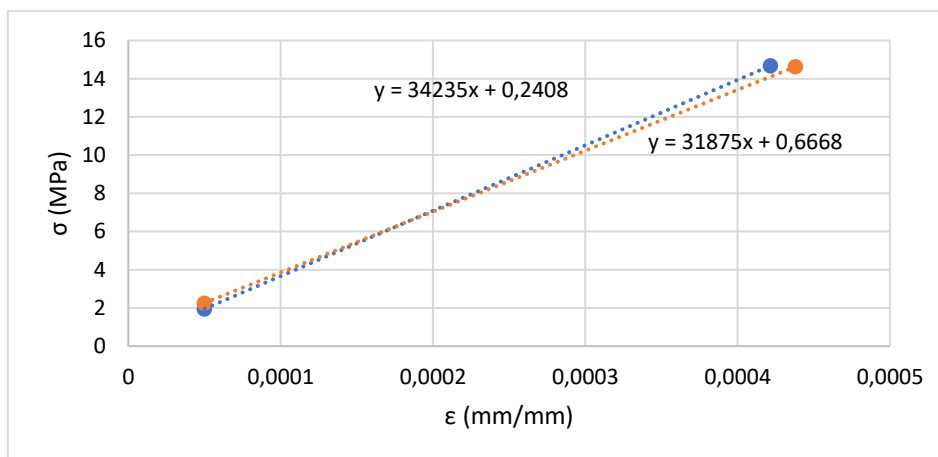


Figura 27: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a $0.4 f'c$ para G280D1 Mezcla 2

Se debe destacar que la segunda mezcla difiere del valor teórico en 50,7% mientras que para la mezcla 1 es solo de 16,7%, por lo que el valor promedio de 33% no es representativo. Si se analizan los gráficos, no se pueden atribuir las diferencias a un desajuste excesivo de los datos experimentales, esto debido a que se pueden observar valores de intercepto cercanos a cero en ambas mezclas.

3.6.3.2 Diseño 2

Para el diseño original de la mezcla (G350) se definió una proporción por peso total de 1 : 2.08 : 1.95, con una relación agua/cemento de 0,55. Esta proporción se mantuvo igual y solo se modificó el valor de la relación agua/cemento a 0,60 debido a un aporte de agua superior al esperado por parte del agregado fino.

Cuadro 37: Resultado de ensayos al concreto fresco G280 D2

Mezcla	Asentamiento (mm)	Temperatura (°C)	Contenido de aire (%)	Peso Unitario (kg/m³)
1	200,0	24,6	2,00	2314
2	180,0	24,6	1,75	2323
Promedio	190,0	24,6	1,88	2319
Desv. Est.	14,14	0,00	0,18	6,06
CV %	7,4%	0,0%	9,4%	0,3%

Los asentamientos obtenidos superan el rango aceptable esperado (100 mm \pm 25 mm), esto se debe al exceso de humedad que no fue considerado en el agregado fino al momento de elaboración de la mezcla, en conjunto con un contenido de agua de 225 kg por metro cúbico de concreto, el cual estaba planteado para subsanar el efecto de baja trabajabilidad generado por una baja relación agua/cemento necesaria para obtener una resistencia esperada de 350 kg/cm².

Las temperaturas de las mezclas se mantuvieron dentro del rango aceptable de temperatura, el contenido de aire es similar al de mezclas anteriores con un porcentaje arrastrado justo por debajo del 2% y el peso unitario se mantiene en el rango de concretos de peso normal con resultados similares a los demás concretos producidos con agregados de Guápiles.

En cuanto a los resultados de resistencia, se obtienen valores más cercanos al valor esperado, superándolo en un 6%, esto cumple con lo estimado a partir de los resultados del primer diseño para esta resistencia. Sin embargo, cabe destacar que en este caso no se cuenta con un concreto más eficiente en cuanto a los recursos utilizados, debido a que el contenido de cemento es de 409,1 kg por metro cúbico de concreto comparado con los 380,6 kg del primer diseño (7% superior), la menor relación agua/cemento obtenida en el segundo diseño se explica por el alto contenido de agua producto del desconocimiento de la humedad real del agregado fino al momento de la dosificación. Este error permite destacar la importancia del control adecuado de los materiales constituyentes del concreto al momento de elaboración de

las mezclas, en este caso se obtiene un valor de resistencia consistente con lo esperado según la relación agua/cemento real de la mezcla, sin embargo, se obtiene un concreto ineficiente con un alto contenido de cemento y un exceso de agua que no cumple ninguna función mecánica en el concreto endurecido y además, puede ocasionar contracciones volumétricas altas y sangrado excesivo durante el proceso de curado y endurecimiento.

Cuadro 38: Resultados de resistencia a la compresión simple G280 D2

Mezcla	7 días		14 días		28 días	
	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²
1	19,7	200,4	24,9	254,4	28,9	294,6
2	19,5	199,0	25,5	259,7	29,1	296,7
Promedio	19,6	199,7	25,2	257,0	29,0	295,6
Desv. Est.	0,09	0,96	0,37	3,75	0,15	1,49
CV%	0,5%		1,5%		0,5%	

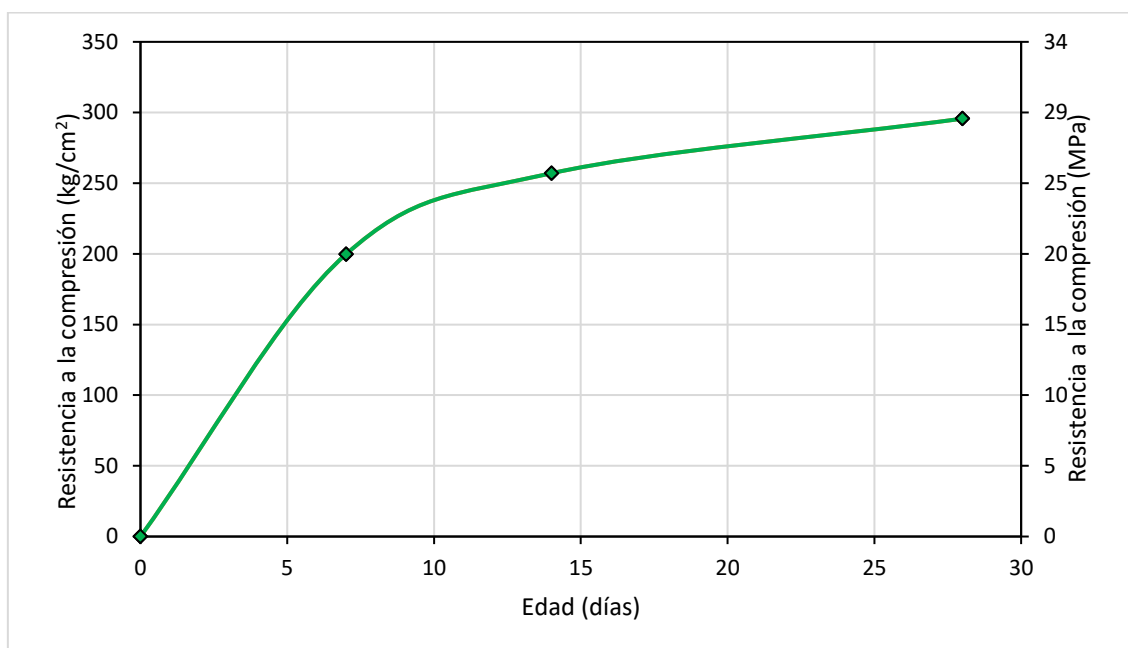


Figura 28: Desarrollo de resistencia según edad de falla G280 D2

Cuadro 39: Resultados de resistencia a tracción y porcentaje respecto a resistencia a compresión G280D2

Mezcla	Resistencia a la tracción		% de resistencia a la compresión
	MPa	kg/cm ²	
1	2,6	26,5	7,9%
2	2,9	29,6	8,5%
Promedio	2,8	28,1	8,2%
Desv. Est.	0,21	2,2	0,4%
CV %	7,7%		

En este caso se obtiene un porcentaje de resistencia a la tracción según la resistencia a la compresión promedio menor que para el primer diseño, sin embargo, se mantiene dentro del rango esperado. Es importante destacar que, en este caso, debido a las limitaciones de espacio para trabajo en laboratorio, se determinó la resistencia a la tracción de las mezclas a una edad de falla de 56 días, y se compararon con la resistencia a la compresión obtenida a esa misma edad de falla a partir de los ensayos a compresión simple requeridos para el ensayo de módulo de elasticidad. Los resultados de la comparación se evaluaron a partir de un análisis de varianza de un factor para determinar se eran comparables con los resultados obtenidos a 28 días para las demás mezclas, este análisis se detalla en la sección 4.3 del presente informe.

Cuadro 40: Resultados de módulo de elasticidad y resistencia a compresión respectiva G280D2

Mezcla	Módulo de elasticidad (E_c)		Resistencia a la compresión	
	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²
1	32779	334253	32,9	336
2	28142	286974	34,1	347
Promedio	30461	310614	33,5	342
Desv. Est.	3278	33431	0,81	8,3
CV	10,8%		2,4%	

Como se mencionó anteriormente, el ensayo para la determinación del módulo de elasticidad de estas mezclas se realizó a una edad de 56 días debido a las limitaciones presentadas durante el desarrollo experimental. Los valores se compararon con el resultado teórico evaluando la ecuación del ACI318S-19 con los resultados de resistencia a la compresión a 56 días, la validez de esta comparación se evaluó mediante un análisis de varianza el cual se detalla en la sección 4.4.

El resultado de módulo de elasticidad promedio para este diseño presenta una diferencia del 11,7% respecto el valor teórico, manteniendo la tendencia de que los resultados experimentales están por encima de los teóricos. A continuación, se presentan los gráficos de esfuerzo-deformación para ambas mezclas.

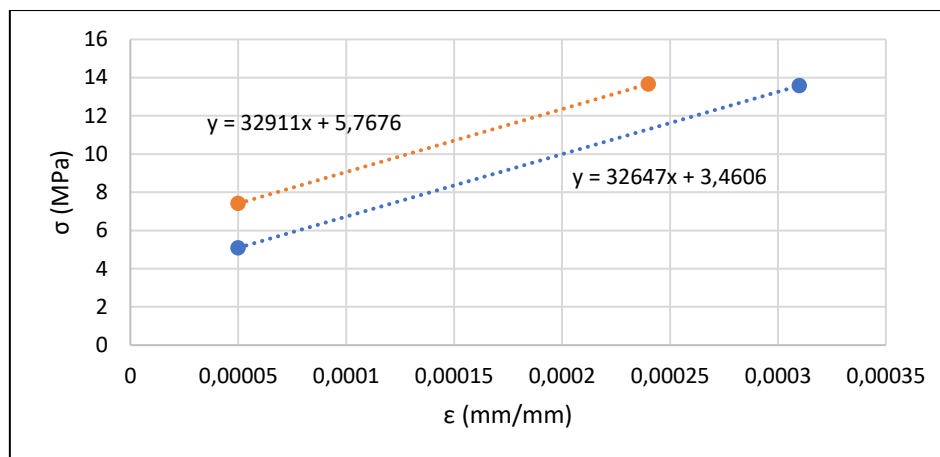


Figura 29: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a $0.4 f'c$ para G280D2 Mezcla 1

Para el caso de la mezcla 1 se puede notar que, aunque los resultados de pendiente (E_c) son muy similares entre sí, las intersecciones con el eje de resistencia son muy superiores a cero, esto indica que los resultados no son adecuados debido a la limitación experimental presentada con esta metodología, ya que los puntos no se ajustan al punto inicial real en el que la deformación es cero con un esfuerzo aplicado nulo.

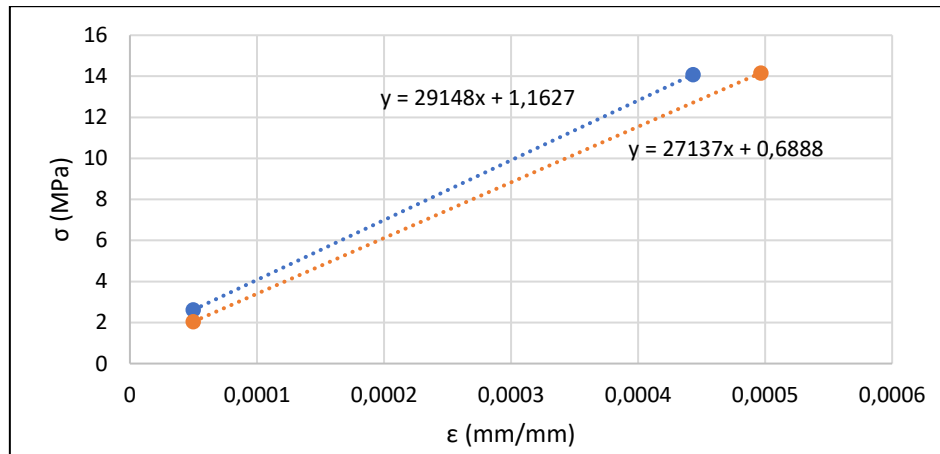


Figura 30: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a $0.4 f'c$ para G280D2 Mezcla 2

Los resultados experimentales de la mezcla 2 difieren en tan solo 2,6% del valor teórico, esta mejoría se puede observar claramente en la Figura 30, en la que los valores de intercepto son mucho más cercanos a cero, de hecho, si se compara el resultado de la línea naranja con el valor teórico, la diferencia con el valor teórico pasa a un 1,1% , esto con un valor en la intersección aún más cercano al cero de 0,69. Esta tendencia en los resultados es coincidente

con lo esperado y muestra que los resultados en los que el intercepto se acerca más al cero pueden ser más representativos.

De los resultados de resistencia a la compresión obtenidos para el ensayo del módulo de elasticidad se puede determinar un aumento del 15,7% respecto a la resistencia a la compresión obtenida a 28 días. Este es un aumento alto respecto a los promedios teóricos que indican un aumento de aproximadamente 10%.

3.6.4 Concreto de 280 kg/cm² con agregados de Cerro Minas

Cuadro 41: Resultado de ensayos al concreto fresco CM280

Mezcla	Asentamiento (mm)	Temperatura (°C)	Contenido de aire (%)	Peso Unitario (kg/m³)
1	200	24,2	1,8	2214
2	80	25,4	1,5	2294
Promedio	140	24,8	1,7	2254
Desv. Est.	84,9	0,85	0,21	56,6
CV %	60,6%	5,0%	15,7%	2,1%

En este caso la mezcla 1 presenta un asentamiento superior al rango aceptado con un contenido de agua de 225 kg por metro cúbico de concreto, por lo que se modificó este contenido reduciéndolo a 222,5 kg/m³ para reducir así el asentamiento a un valor más cercano al esperado y reduciendo también la cantidad de cemento para mantener la relación agua/cemento de 0,62. Con esta modificación se obtuvo un asentamiento de 80 mm el cual es aceptable según el valor esperado (100 mm ± 25 mm).

La temperatura de las mezclas se mantiene aceptable con un valor promedio de 24,8 °C, el contenido de aire, al igual que la mayoría de las mezclas en esta investigación, se mantienen por debajo del valor esperado de 2,5% con un valor promedio en este caso de 1,7%. El peso unitario de ambas mezclas se mantiene dentro del rango de concretos de peso normal, justo por encima de los 2200 kg/m³, cabe destacar que aún con un contenido de agua distinto en ambas mezclas se obtiene una variación de solo 2,1%.

Cuadro 42: Resultados de resistencia a la compresión simple CM280

Mezcla	7 días		14 días		28 días	
	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²
1	20,2	206,3	24,8	253,2	26,4	269,5
2	21,4	218,4	25,4	258,8	28,8	293,6
Promedio	20,8	212,3	25,1	256,0	27,6	281,6
Desv. Est.	0,84	8,55	0,39	3,93	1,67	17,02
CV %	4,0%		1,5%		6,0%	

Aunque se obtiene un resultado de resistencia promedio muy cercano al valor esperado, se deben destacar las resistencias individuales de cada mezcla, esto debido a que la mezcla 1 no cumple con la resistencia esperada y la mezcla dos la supera, causando que el promedio cumpla con el mínimo. El incumplimiento de la primera mezcla se atribuye a que en este caso no se logró la medición de la humedad de los agregados el día de elaboración de la mezcla, por lo que se utilizó un valor previo de humedad que pudo haber reducido la relación agua/cemento y aumentado el contenido de agua, lo que explica el exceso de asentamiento de la mezcla.

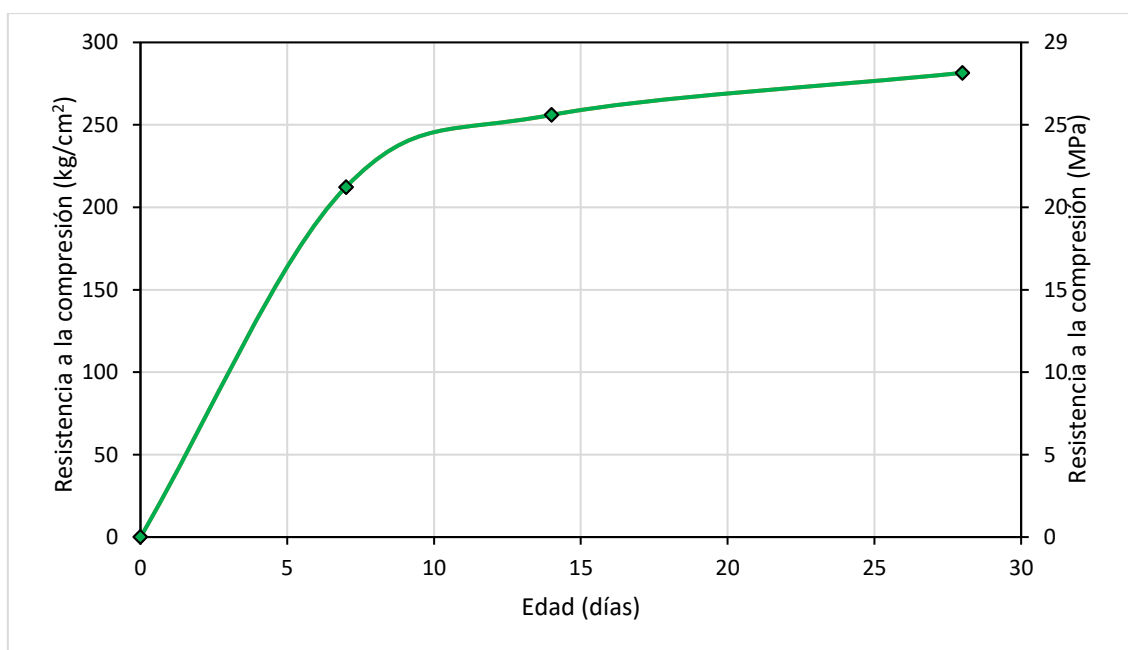


Figura 31: Desarrollo de resistencia según edad de falla CM280

Cuadro 43: Resultados de resistencia a tracción y porcentaje respecto a resistencia a compresión CM280

Mezcla	Resistencia a la tracción		% de $f'c$
	MPa	kg/cm ²	
1	3,7	37,6	14%
2	3,5	36,1	12%
Promedio	3,6	36,9	13%
Desv. Est.	0,10	1,01	0,01
CV %	2,7%		

La resistencia a la tracción representa en promedio un 13% del valor de resistencia a la compresión, de este resultado se destaca que se mantiene la tendencia presentada para los diseños de 210 kg/cm², donde los concretos con agregados de Cerro Minas presentan resistencia a la tracción mayor respecto a la resistencia a la compresión que los concretos producidos con agregados de Guápiles.

Cuadro 44: Resultados de módulo de elasticidad y resistencia a compresión respectiva CM280

Mezcla	Módulo de elasticidad (E_c)		Resistencia a la compresión	
	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²
1	28912	294824	25,5	260
2	33698	343625	27,7	282
Promedio	31305	319224	26,6	271
Desv. Est.	3384	34507	1,57	16,0
CV	10,8%		5,9%	

El resultado promedio de módulo de elasticidad para este caso supera en un 28,7% al valor teórico obtenido con la ecuación del ACI 318S-19. Para un mayor detalle de los resultados se presenta la graficación de los puntos de esfuerzo deformación obtenidos para cada mezcla.

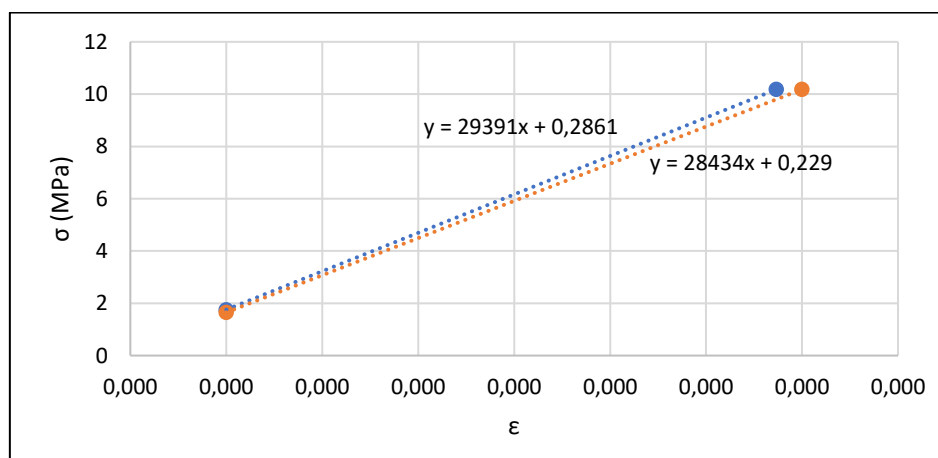


Figura 32: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a 0.4 $f'c$ para CM280 Mezcla 1

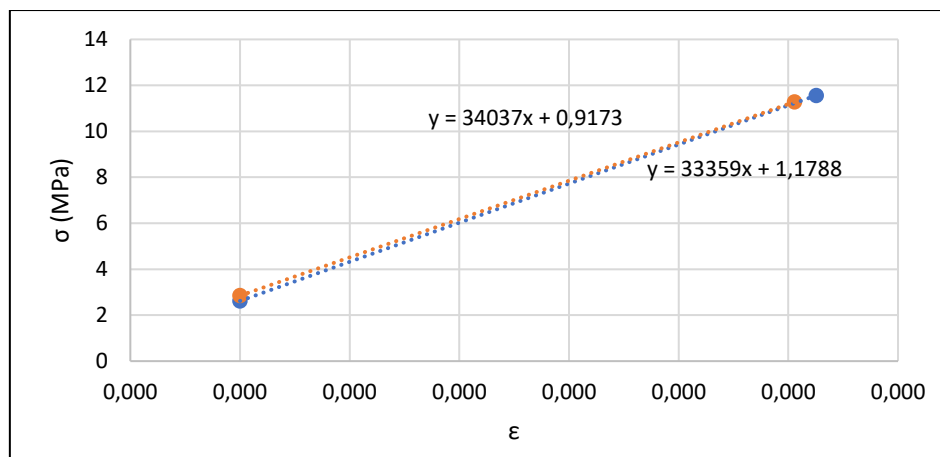


Figura 33: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a $0.4 f'c$ para CM280 Mezcla 2

En este caso si se evalúan los gráficos en cada mezcla, se puede observar que los resultados de la mezcla 1 son más confiables debido a que la intersección con el eje de resistencia se encuentra más cercano al cero. Si se determina la diferencia respecto a la estimación teórica utilizando solo la mezcla 1, se obtiene un porcentaje de 22%, menor al 28% promedio de ambas mezclas, este comportamiento es congruente con lo en el concreto tipo G280D2.

3.6.5 Concreto de 350 kg/cm² con agregados de Guápiles

Cuadro 45: Resultado de ensayos al concreto fresco G350

Mezcla	Asentamiento (mm)	Temperatura (°C)	Contenido de aire (%)	Peso Unitario (kg/m ³)
1	65,0	26,2	2,10	2343
2	75,0	26,1	2,10	2326
Promedio	70,0	26,2	2,10	2334
Desv. Est.	7,07	0,07	0,00	12,12
CV %	10,1%	0,3%	0,0%	0,5%

Para la obtención de una resistencia superior a los que se considera dentro del rango normal o de uso frecuente en la práctica del diseño estructural con cementos de uso general, se requiere de relaciones agua/cemento bajas que dan como resultado concretos de baja trabajabilidad debido al bajo contenido de agua. Dado que en esta investigación no se pretendía el uso de aditivos químicos para este fin se debió ajustar el contenido de agua para obtener una trabajabilidad adecuada de las mezclas para el moldeo de los especímenes y que simulen las condiciones necesarias para su colocación en campo. En este caso se obtiene un asentamiento promedio por debajo del rango aceptado debido a que la primera mezcla tiene

un asentamiento de 65 mm, esto se atribuye a que la relación agua/cemento real de las mezclas fue de 0,52 en lugar de 0,55 como se diseñó, debido a que los agregados al momento de elaboración de la mezcla estaban más secos de lo esperado, disminuyendo la trabajabilidad.

La temperatura de la mezcla es un poco mayor a las que se obtuvieron previamente, sin embargo, se mantienen dentro del rango aceptable para la colocación de concreto. El peso unitario se mantiene dentro del rango de concretos de peso normal. El contenido de aire se mantiene por debajo del valor esperado de diseño de 2,5% pero se destaca que se obtiene un valor mayor al obtenido en mezclas elaboradas previamente, esto se atribuye a mezclas menos trabajables en las que los métodos de compactación para el ensayo de contenido de aire no aseguran la extracción del aire de la misma forma que en otras mezclas más fluidas, por lo que puede haber pequeñas variaciones en los resultados.

Cuadro 46: Resultados de resistencia a la compresión simple G350

Mezcla	7 días		14 días		28 días	
	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²
1	26,8	273,8	30,5	311,4	37,8	385,7
2	26,8	273,2	31,9	325,2	41,4	421,9
Promedio	26,8	273,5	31,2	318,3	39,6	403,8
Desv. Est.	0,04	0,39	0,96	9,74	2,51	25,6
CV %	0,1%	0,1%	3,1%	3,1%	6,3%	6,3%

Como se mencionó previamente, la relación agua/cemento real fue de 0,52 para ambas mezclas en lugar del valor de 0,55 estimado en el diseño, esto generó una sobrerresistencia promedio del 15%. Esta diferencia permite destacar la importancia del control adecuado de los materiales durante su almacenamiento previo a la producción de las mezclas, con el objetivo de dosificar correctamente y evitar la elaboración de concretos con resistencias excesivas de acuerdo a lo que se requiere. En este diseño se destaca un porcentaje de resistencia a los 14 días de solo 79% respecto a la resistencia a los 28 días, este es relativamente bajo y se puede notar observando el último tramo de la curva de desarrollo de resistencia (Figura 34).

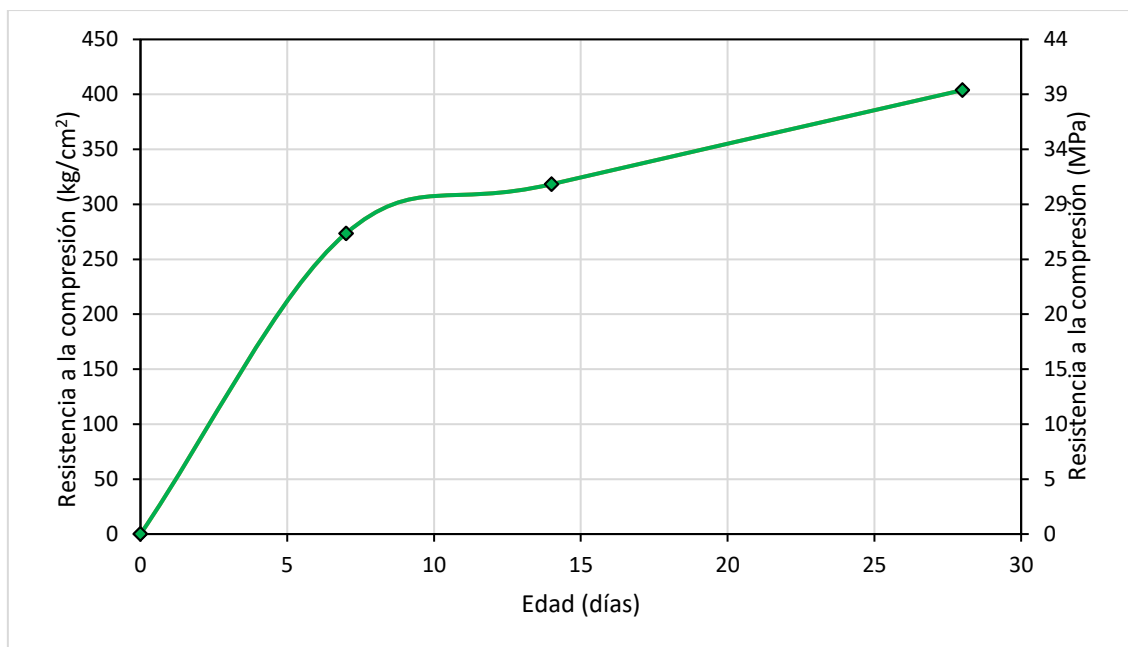


Figura 34: Desarrollo de resistencia según edad de falla G350

Cuadro 47: Resultados de resistencia a tracción y porcentaje respecto a resistencia a compresión G350

Mezcla	Resistencia a la tracción		% de fc
	MPa	kg/cm ²	
1	3,2	32,4	8,9%
2	2,5	25,1	8,6%
Promedio	2,8	28,8	8,8%
Desv. Est.	0,51	5,2	0,3%
CV %	18,1%		

Para estas mezclas, los resultados se obtuvieron a una edad de falla de 56 días al igual que para los concretos del segundo diseño de 280 kg/cm² y se determinó el porcentaje según la resistencia a la compresión según las fallas a esa misma edad. Como se puede observar en promedio la resistencia a la tracción representa un 8,8 % de la resistencia a la compresión, este resultado se mantiene dentro del rango esperado aun cuando los resultados que se comparan fueron obtenidos a una edad de 56 días.

Cuadro 48: Resultados de módulo de elasticidad y resistencia a compresión respectiva G350

Mezcla	Módulo de elasticidad (E _c)		Resistencia a la compresión	
	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²
1	43024	438728	35,6	363
2	32405	330443	28,6	292
Promedio	37715	384586	32,1	327
Desv. Est.	7509	76569	4,89	49,8
CV	19,9%	19,9%	15,2%	15,2%

Los resultados del módulo de elasticidad se obtuvieron también a 56 días de edad y presentan una diferencia respecto al valor teórico promedio de 40,7%, cabe destacar que se presenta una discrepancia en cuanto al comportamiento de resistencia, debido a que la resistencia a la compresión a 56 días presenta una reducción respecto a la resistencia a 28 días. Se supone que este comportamiento aporta a la obtención de una diferencia tan alta respecto al valor teórico.

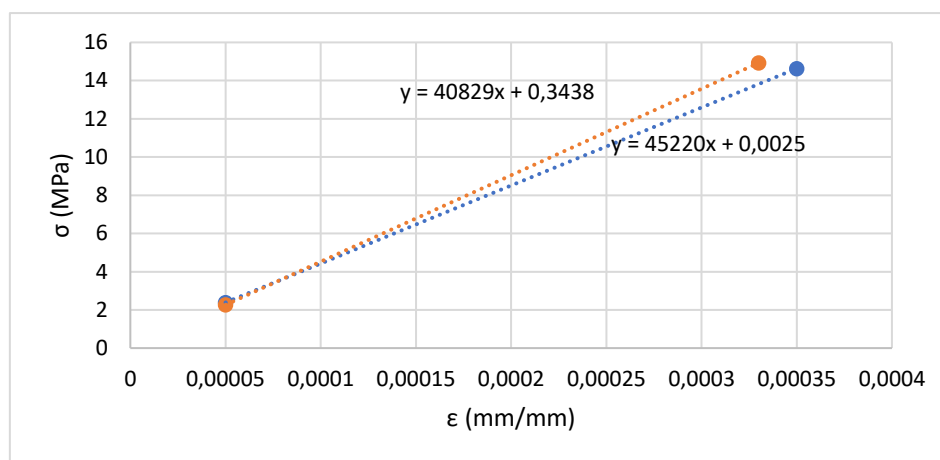


Figura 35: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a $0.4 f'c$ para G350 Mezcla 1

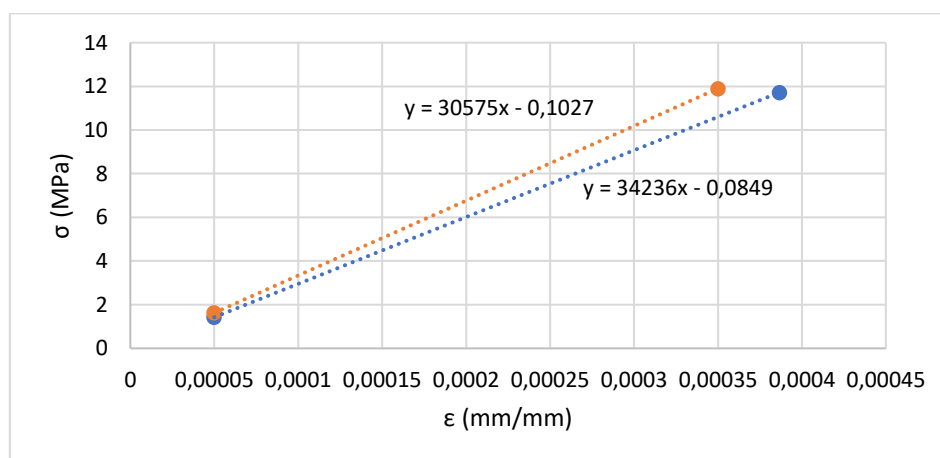


Figura 36: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a $0.4 f'c$ para G350 Mezcla 2

Si se analizan los gráficos de esfuerzo-deformación para cada muestra, no se puede concluir que una causa concreta para el gran porcentaje de diferencia sea el desajuste de las líneas obtenidas mediante el método de la cuerda, esto debido a que en ambos casos se obtienen

intersecciones con el eje de resistencia muy cercanos al cero, que es lo que se espera para que el resultado de módulo de elasticidad sea válido.

En cuanto a las variaciones de la resistencia a la compresión, se obtienen resultados anómalos respecto a la teoría con resistencias a 56 días menores a las resistencias a 28 días, esto puede atribuirse a errores experimentales durante el proceso de moldeo de los especímenes, o diferencias entre los procesos de moldeo de especímenes de 150 mm x 300 mm y los de 100 mm x 200 mm, ya que es un comportamiento que se presenta solo en una ocasión en la totalidad de los resultados experimentales.

3.6.6 Concreto de 350 kg/cm² con agregados de Cerro Minas

Cuadro 49: Resultado de ensayos al concreto fresco CM350

Mezcla	Asentamiento (mm)	Temperatura (°C)	Contenido de aire (%)	Peso Unitario (kg/m³)
1	30	-	1,9	2294
2	30	22,9	1,8	2297
Promedio	30	22,9	1,8	2296
Desv. Est.	0	-	0,11	2,02
CV %	0,0%	-	5,8%	0,1%

Se destaca de estos concretos que se obtiene un asentamiento promedio bajo, el cual denota mezclas secas, de baja trabajabilidad y poco adecuadas para su colocación en campo, sin embargo, la trabajabilidad es suficiente para el moldeo de los especímenes cilíndricos. Ante el resultado de la mezcla 1 se aumentó el contenido de agua de la mezcla 2 para ajustar el asentamiento, sin embargo, la relación agua/cemento real se redujo debido a que los agregados utilizados estaban más secos de lo estimado al momento de la dosificación.

Debido a las variaciones de humedad de los agregados las relaciones agua/cemento reales de las mezclas variaron del valor de diseño en un promedio de 2,7%, ante esta diferencia se evalúa la variación de los resultados de resistencia según el ACI 214R-11 (Sección 4.2)

La temperatura de una de las mezclas no se midió debido a que no se contó con el equipo necesario al momento de la elaboración de la mezcla y se destaca que para la mezcla 2 la temperatura es baja en relación a las mezclas elaboradas previamente, sin embargo, se mantienen dentro del rango adecuado. El contenido de aire arrastrado se mantiene por debajo del 2% y el peso unitario promedio se encuentra dentro del rango de concretos de peso normal como es de esperar.

Dadas las limitaciones mencionadas en el proceso del desarrollo experimental de la investigación fue necesario variar las edades de falla, esto brindó resultados a edades superiores a 28 días. Con estos resultados se procedió con una interpolación con los resultados a 14 días y 56 días para la mezcla 1 y a 14 días y 50 días para la mezcla 2. En el Cuadro 50 se presentan los resultados obtenidos a partir de la interpolación y en la Figura 37 se pueden observar los resultados reales a edades de falla de 50 y 56 días.

Cuadro 50: Resultados de resistencia a la compresión simple CM350

Mezcla	7 días		14 días		28 días	
	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²
1	27,0	275,5	31,4	320,4	*34,0	*346,4
2	27,1	275,9	33,1	337,9	*34,9	*356,1
Promedio	27,0	275,7	32,3	329,2	34,4	351,3
Desv. Est.	0,02	0,25	1,21	12,33	0,68	6,92
CV %	0,1%		3,7%		2,4%	

*Estos resultados se obtuvieron a partir de una interpolación lineal con resultados a mayor edad de falla

Como se observa en los resultados la resistencia promedio difiere solo en un 0,3% del valor esperado de resistencia, esto indica que este diseño es eficiente en cuanto al uso de materiales. Se debe destacar que la mezcla 1 tiene una resistencia 1% menor al valor mínimo, esto se debe a que la relación agua/cemento específica para esta mezcla fue de inferior al valor de diseño. También se debe destacar que los resultados a 28 días son estimados a partir de resultados a otras edades de falla, por lo que pueden variar si se toman de forma directa (experimental). Si se compara la resistencia a 56 días con la de 28 días estimada se obtiene un porcentaje de ganancia del 12% este valor es coherente con los promedios teóricos de ganancia de resistencia a esta edad de falla (~10%).

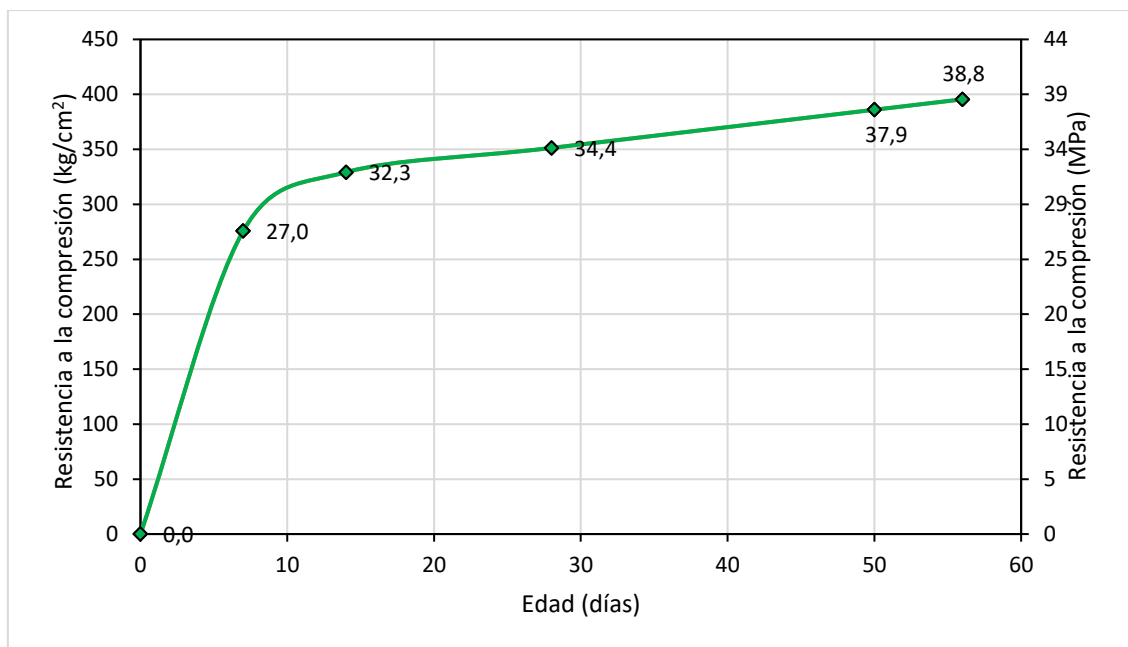


Figura 37: Desarrollo de resistencia según edad de falla CM350

Los ensayos de resistencia a la tracción y módulo de elasticidad se realizaron el mismo día que los ensayos de compresión, es decir, a los 50 días para la mezcla 1 y a los 56 días para la mezcla dos. Esto permite hacer la comparación de ambos parámetros con la resistencia a la compresión a la misma edad de falla.

Cuadro 51: Resultados de resistencia a tracción y porcentaje respecto a resistencia a compresión CM350

Mezcla	Resistencia a la tracción		% de $f'c$
	MPa	kg/cm ²	
1	4,7	47,9	12%
2	4,3	43,7	11%
Promedio	4,5	45,8	12%
Desv. Est.	0,29	3,01	0,5%
CV %	6,6%		

Se puede observar que los resultados de resistencia a la compresión presentan el mismo comportamiento que el resto de concretos producidos con agregados de Cerro Minas, con una resistencia a la tracción promedio del 12% respecto a la resistencia a la compresión. Esto indica que la relación directa entre la resistencia a la tracción y la resistencia a la compresión se mantiene a cualquier edad de falla.

Cuadro 52: Resultados de módulo de elasticidad y resistencia a compresión respectiva CM350

Mezcla	Módulo de elasticidad (E_c)		Resistencia a la compresión	
	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²
1	49689	506685	38,6	394
2	44228	450997	36,0	367
Promedio	46958	478841	37,3	380
Desv. Est.	3862	39377	1,84	18,7
CV %	8,2%		4,9%	

El módulo de elasticidad para los concretos CM350 presenta la máxima variación respecto a los valores teóricos con una diferencia promedio del 63%, siguiendo la tendencia de sobreestimar los resultados. Para analizar la validez de los datos se presentan a continuación la graficación de los puntos de esfuerzo deformación obtenidos.

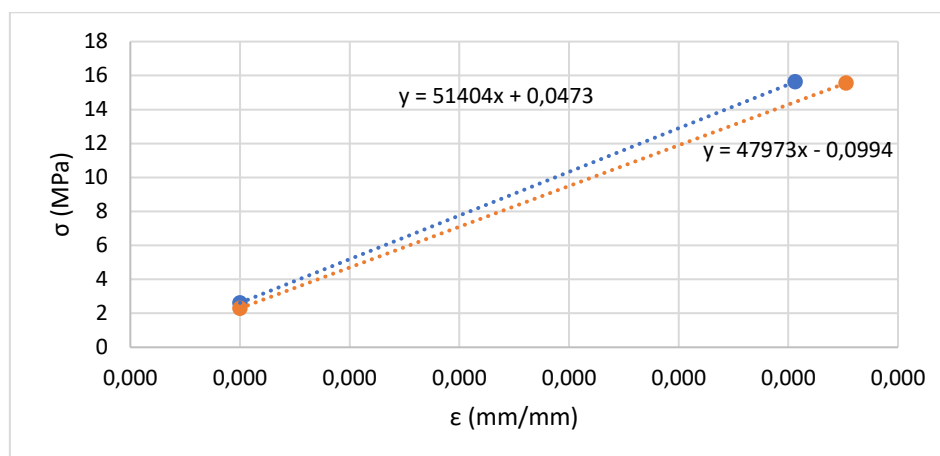


Figura 38: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a $0.4 f'c$ para G350 Mezcla 2

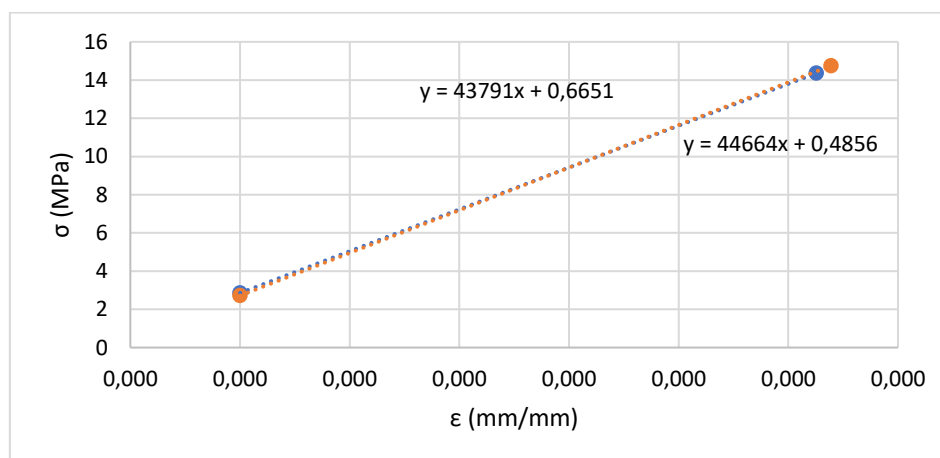


Figura 39: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a $0.4 f'c$ para G350 Mezcla 2

Si se analizan ambas curvas se puede notar que no hay una discrepancia importante con respecto a la intersección, cabe destacar que para la mezcla 2, los valores de intercepto se alejan un poco más del cero que los de la mezcla 1, sin embargo, la diferencia respecto al valor teórico es mayor para la mezcla 1. Esto difiere del comportamiento esperado en el que los resultados con un intercepto más cercano al cero se acerquen más a los valores teóricos.

3.6.7 Concreto de 420 kg/cm² con agregados de Guápiles

Cuadro 53: Resultados de ensayos al concreto fresco G420

Mezcla	Asentamiento (mm)	Temperatura (°C)	Contenido de aire (%)	Peso Unitario (kg/m³)
1	95,0	26,4	2,0	2334
2	85,0	26,0	1,8	2349
Promedio	90,0	26,2	1,9	2341
Desv. Est.	7,1	0,3	0,1	10,1
CV %	7,9%	1,1%	7,4%	0,4%

Se obtiene un asentamiento promedio dentro del rango esperado para el valor de diseño, se debe destacar que incluso para concretos con relaciones agua/cemento de 0,46 se logra obtener una trabajabilidad adecuada sin necesidad de utilizar aditivos, sin embargo, se debe tomar en cuenta que el exceso de agua puede generar problemas de fracturamiento excesivo por la contracción volumétrica, así como sangrado excesivo que puede llevar a la segregación de los materiales constituyentes y, por ende, a la obtención de concretos poco homogéneos en la superficie que devienen en descascaramiento por la alta fragilidad. Además, los concretos con un alto contenido de agua requieren de un alto contenido de cemento para mantener relaciones agua/cemento bajas, por lo tanto, producir concretos de mediana a alta resistencia sin aditivos genera una ineficiencia desde el punto de vista económico en tanto no se aprovecha adecuadamente la capacidad mecánica del agregado grueso.

La temperatura promedio de la mezcla se mantiene dentro del rango aceptable para la colocación, el contenido de aire arrastrado promedio se mantiene justo por debajo del 2% y el peso unitario está dentro del rango de concretos de peso normal con un valor promedio similar al resto de mezclas producidas con agregados de guápiles.

Cuadro 54. Resultados de resistencia a la compresión simple G420

Mezcla	7 días		14 días		28 días	
	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²
1	30,1	307,4	32,7	333,3	43,5	443,2
2	32,0	326,2	40,4	412,0	44,7	455,6
Promedio	31,1	316,8	36,5	372,7	44,1	449,4
Desv. Est.	1,31	13,33	5,46	55,67	0,86	8,79
CV %	4,2%		14,9%		2,0%	

Según los resultados de humedad reales de los agregados, las relaciones agua/cemento son de 0,47 y 0,46 para las mezclas 1 y 2 respectivamente, esta diferencia se refleja en una mayor resistencia para la segunda mezcla a todas las edades de falla. El resultado de resistencia promedio supera al valor esperado en un 7%, por lo que la relación agua/cemento se podría incrementar para alcanzar una resistencia más cercana al valor esperado y hacer más eficiente la mezcla.

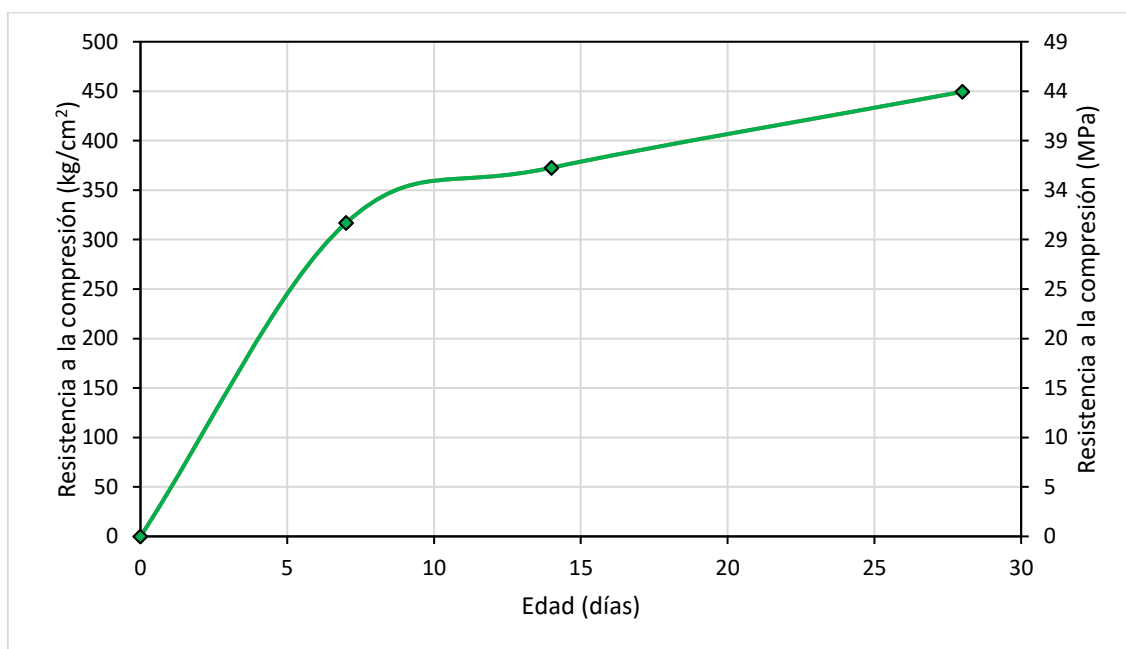


Figura 40: Desarrollo de resistencia según edad de falla G420

La resistencia a la tracción promedio es equivalente al 7,6% de la resistencia a la compresión a una edad de falla de 56 días, este valor es menor a los presentados para concretos de menor resistencia producidos con agregados de Guápiles, sin embargo, se mantiene dentro del orden de magnitud esperado. Cabe destacar que, al igual que en otras mezclas ensayadas a 56 días, se mantiene la relación de los resultados a 28 días y 56 días.

Cuadro 55: Resultados de resistencia a tracción y porcentaje respecto a resistencia a compresión G420

Mezcla	Resistencia a la tracción		% de $f'c$
	MPa	kg/cm ²	
1	3,3	33,3	7,5%
2	3,4	3,4	7,7%
Promedio	3,4	18,4	7,6%
Desv. Est.	0,12	21,1	0,1%
CV %	3,6%		

Cuadro 56: Resultados de módulo de elasticidad y resistencia a compresión respectiva G420

Mezcla	Módulo de elasticidad (E_c)		Resistencia a la compresión	
	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²
1	30266	308631	47,3	482
2	36908	376361	49,8	508
Promedio	33587	342496	48,6	495
Desv. Est.	4697	47892	1,82	18,6
CV %	14,0%		3,8%	

Se obtiene para el módulo de elasticidad un valor promedio de 33 587 MPa, el cual supera el valor teórico en un 8%, esta es una diferencia de magnitud muy similar a la presentada en los resultados del concreto tipo G210.

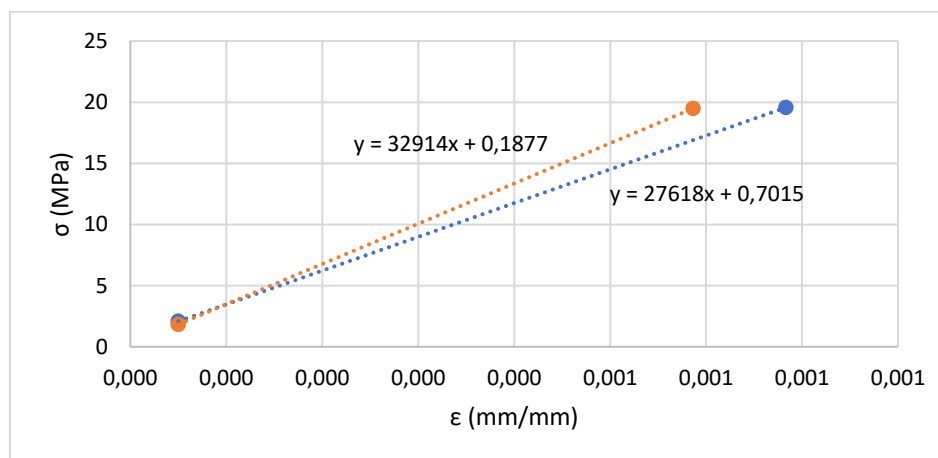


Figura 41: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a $0.4 f'c$ para G420 Mezcla 1

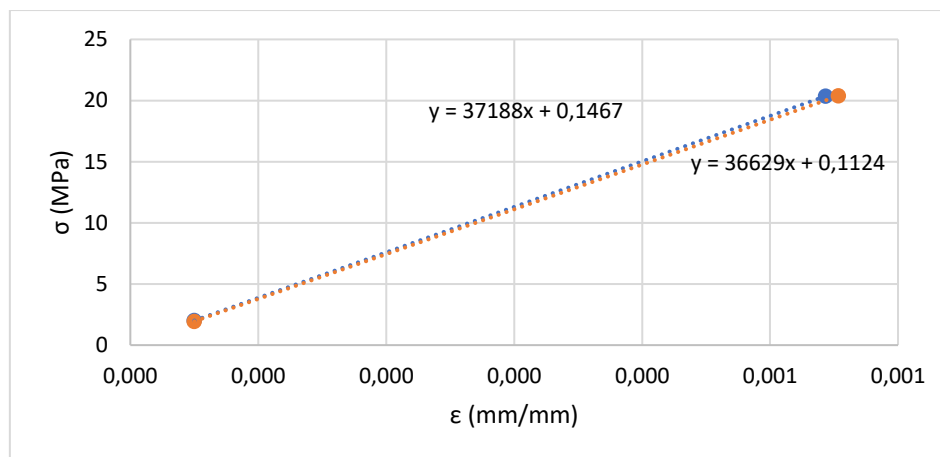


Figura 42: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a $0.4 f'c$ para G420 Mezcla 2

De la graficación de los puntos de esfuerzo deformación se puede notar que los valores de intercepto se mantienen cercanos al cero con tres de las cuatro líneas con un valor por debajo de 0,2. Si se analiza de forma separada las mezclas, la mezcla 1 presenta una menor diferencia respecto al valor teórico con 6,3% para ambas rectas y solo de un 1,9% si se descarta la recta con un valor de intercepto mayor. En la mezcla dos se mantiene la tendencia de los resultados experimentales en los que la ecuación teórica subestima los resultados, en este caso se obtiene una diferencia del 11,2%.

Como se mencionó anteriormente, los resultados de módulo de elasticidad se obtuvieron a una edad de falla de 56 días esto permite la comparación de los resultados de compresión simple. En promedio se obtiene una ganancia de resistencia de un 11% respecto a la resistencia a 28 días, esto concuerda con lo esperado según la teoría ($\sim 10\%$) y es menor al resultado promedio obtenido por Delgado (2018) de 15% para concretos producidos con cementos tipo MM/B (P-C)-28 y agregados de río.

3.6.8 Concreto de 420 kg/cm^2 con agregados de Cerro Minas

Debido a las limitaciones presentadas durante el desarrollo experimental, se elaboraron las dos mezclas con el mismo diseño, sin embargo, solo fue posible realizar las fallas de una de ellas, además, esta mezcla no pudo ser fallada a 14 y 28 días, por lo que se usaron factores de proyección promedio obtenidos a partir de las otras mezclas producidas con agregados de Cerro Minas.

Cuadro 57: Resultados de ensayos al concreto fresco CM420

Mezcla	Asentamiento (mm)	Temperatura (°C)	Contenido de aire (%)	Peso Unitario (kg/m ³)
1	85,0	22,1	1,70	2171
2	125,0	22,0	1,95	2289
Promedio	105,0	22,1	1,83	2230
Desv. Est.	28,28	0,07	0,18	82,83
CV %	27%	0%	10%	4%

Los concretos producidos previamente con agregados de Cerro Minas muestran altos requerimientos de agua para obtener una trabajabilidad aceptable, por esta razón, se utilizó para este diseño un contenido de agua de 240 kg por metro cúbico de concreto, obteniendo así un asentamiento promedio dentro del rango aceptable según el valor de diseño.

El contenido de aire promedio se mantiene por debajo del valor esperado de diseño con un promedio de 1,83%, la temperatura se mantiene dentro del rango aceptable para la colocación del concreto y el peso unitario promedio está dentro del rango de concretos convencionales.

Cuadro 58: Resultados de resistencia a la compresión simple CM420

Resistencia	7 días		14 días		28 días		42 días		63 días	
	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²
	31,6	322,0	*38,1	*388,7	*42,2	*430,1	44,4	452,7	46,5	474,3

* Resultados obtenidos a partir de factores de proyección promedio obtenidos

Como se mencionó anteriormente, solo una de las mezclas se falló debido a que no se contó con los resultados de falla a edades tempranas para la segunda mezcla, además, para la mezcla 1 se utilizaron los factores de proyección promedio obtenidos de las mezclas producidas previamente con agregados de Cerro Minas, estos fueron de 72% para obtener la resistencia a 28 días a partir de la resistencia a los 7 días y de 83% para obtener la resistencia a 14 días a partir de la resistencia a los 7 días.

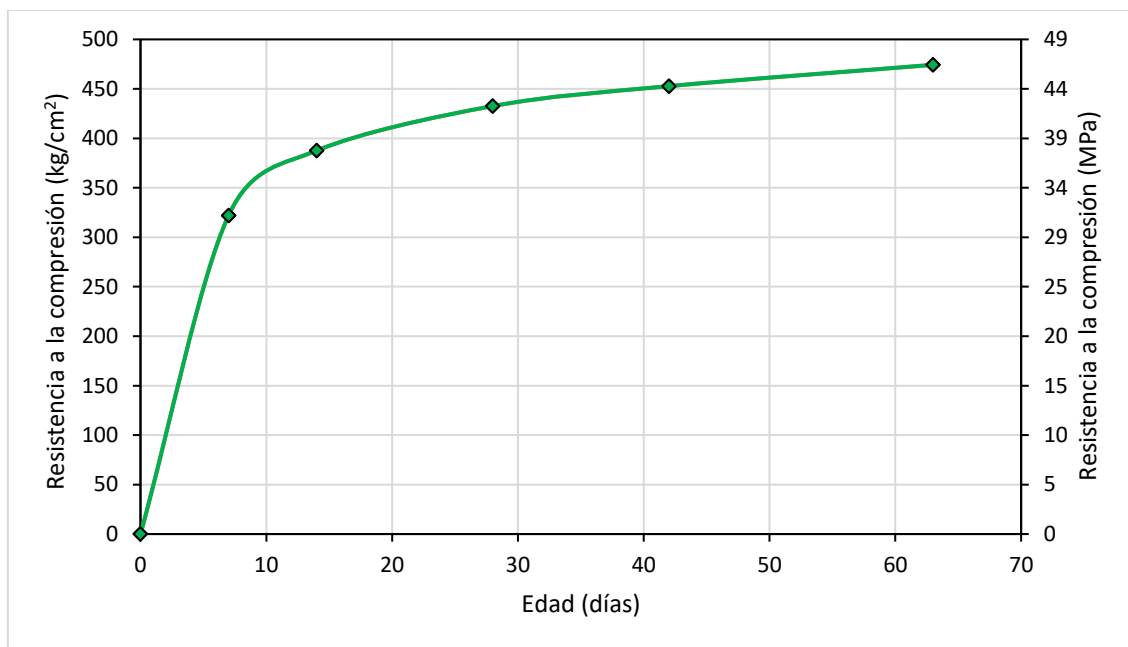


Figura 43: Desarrollo de resistencia según edad de falla CM420

Los resultados experimentales obtenidos a 42 y 63 días complementan la curva de desarrollo de resistencia (Figura 43) que mantiene un aumento lineal con la edad a partir del resultado estimado a 28 días. A los 42 días se obtiene un aumento del 5,3% respecto a la resistencia a 28 días y a 63 días el aumento es de 10,2%.

Cuadro 59: Resultados de resistencia a tracción y porcentaje respecto a resistencia a compresión CM420

Resistencia a la tracción		% de f_c
MPa	kg/cm ²	
4,6	47,4	10%

La resistencia a la tracción obtenida para la mezcla cumple con la teoría en tanto representa un 10% del valor de resistencia a la compresión obtenido a la misma de edad de falla, cabe destacar que el ensayo se llevó a cabo cuando los especímenes tenían una edad de 63 días (junto con la última falla a la compresión).

Cuadro 60: Resultados de módulo de elasticidad y resistencia a compresión respectiva CM420

Módulo de elasticidad (E_c)		Resistencia a la compresión	
MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²
30666	312705	43,7	446

El resultado de módulo de elasticidad, al igual que la resistencia a la tracción, se obtuvo a una edad de 63 días, por lo que el valor teórico para la comparación se calcula con el resultado de

resistencia obtenido a esa misma edad. El resultado experimental presenta una diferencia de 1,3% el cual es el menor de todos los concretos ensayados.

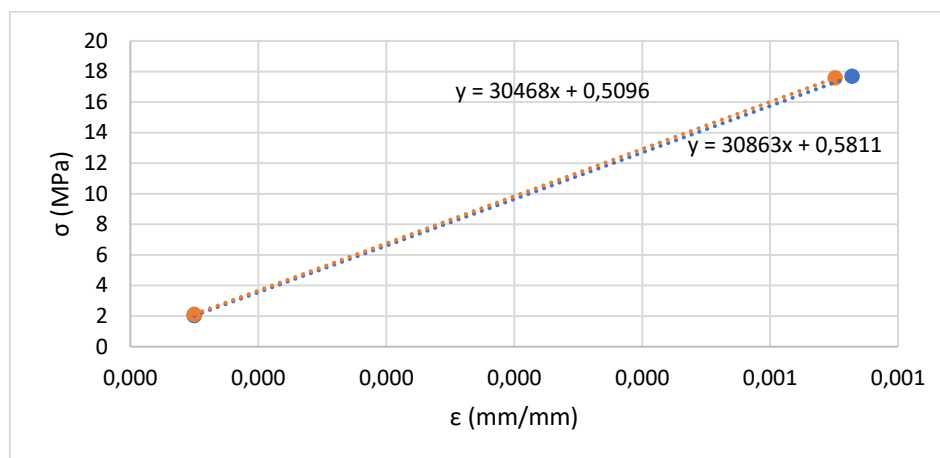


Figura 44: Graficación de los puntos de deformación de 0.00005 y de la deformación correspondiente a $0.4 f'c$ para CM420

4 Análisis de Resultados

4.1 Concreto fresco

En cuanto a los resultados de asentamiento, se obtiene un rango de 30 mm a 200 mm para los concretos producidos con agregados de Cerro Minas y de 65 mm a 200 mm para los concretos producidos con agregados de Guápiles. En ambos tipos de concreto se obtuvieron valores fuera del rango aceptable el cual está dado de 75 mm a 125 mm, sin embargo, cabe destacar que para los concretos producidos con agregados de Guápiles solo tres de las diez mezclas se salieron del rango (30%) mientras que para los concretos producidos con agregados de Cerro Minas, cuatro de siete mezclas estuvieron por fuera del rango (57%). Esto fortalece la afirmación de que la trabajabilidad de los concretos producidos con agregados de Guápiles es más alta en comparación a los producidos con agregados de Cerro Minas, ya que, aún con contenidos de agua mayores para relaciones agua/cemento similares, los concretos con agregados de tajo presentaron asentamientos menores y una mayor dificultad de manipulación general en cuanto al moldeo de especímenes.

Cuadro 61: Resumen de asentamientos promedio y contenidos de agua para todas las mezclas elaboradas.

Fuente de agregados	Diseño	Asentamiento (mm)	Cont. Agua (kg/m ³)	a/c	Cont. Cemento (kg/m ³)
Guápiles	210 kg/cm ²	90,0	220,0	0,68	321,6
	280 kg/cm ² D1	190,0	225,0	0,60	409,1
	280 kg/cm ² D2	85,0	220,0	0,58	380,6
	350 kg/cm ²	70,0	225,0	0,52	409,1
	420 kg/cm ²	90,0	230,0	0,46	479,2
Cerro Minas	210 kg/cm ²	55	220,0	0,68	321,6
	280 kg/cm ²	140	223,8	0,62	387,1
	350 kg/cm ²	30	222,5	0,56	404,5
	420 kg/cm ²	105	240,0	0,48	500,0

Como parte de la evaluación se realizó una regresión múltiple tomando como variable dependiente el asentamiento y como independientes el contenido de agua y la relación agua/cemento, esto con el objetivo de visualizar si la variación del asentamiento es consistente respecto a la variación de ambas variables, de la regresión se obtuvo la siguiente ecuación:

$$As = 324,5 \cdot a/c + 4,95 \cdot CA - 1205 \quad [5]$$

La regresión brinda un coeficiente de correlación múltiple bajo de 0,3839 y un coeficiente de determinación (R²) de 0.1474, por lo que la ecuación presentada representa solo el 15% de los datos. Aunque la regresión no brinda una ecuación que se pueda utilizar para la predicción de resultados, esta permite visualizar la tendencia de los datos ante la variación de las variables independientes.

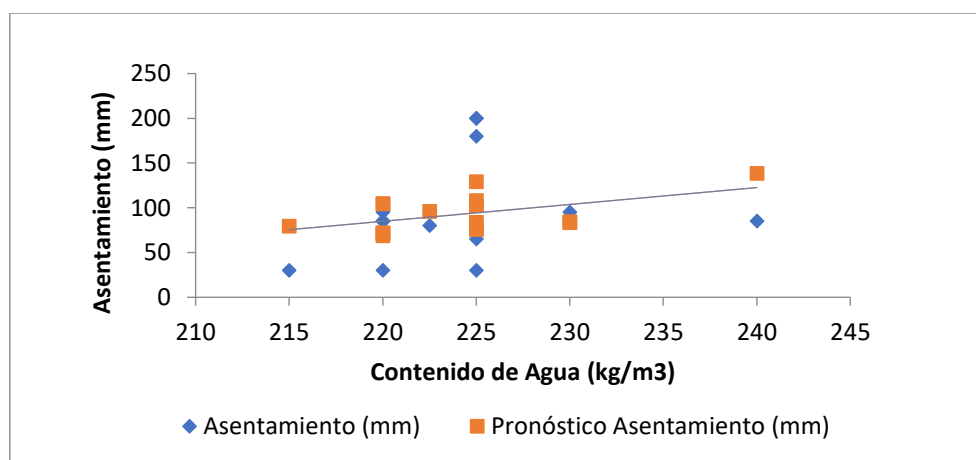


Figura 45: Curva de regresión ajustada para contenido de agua vs. Asentamiento.

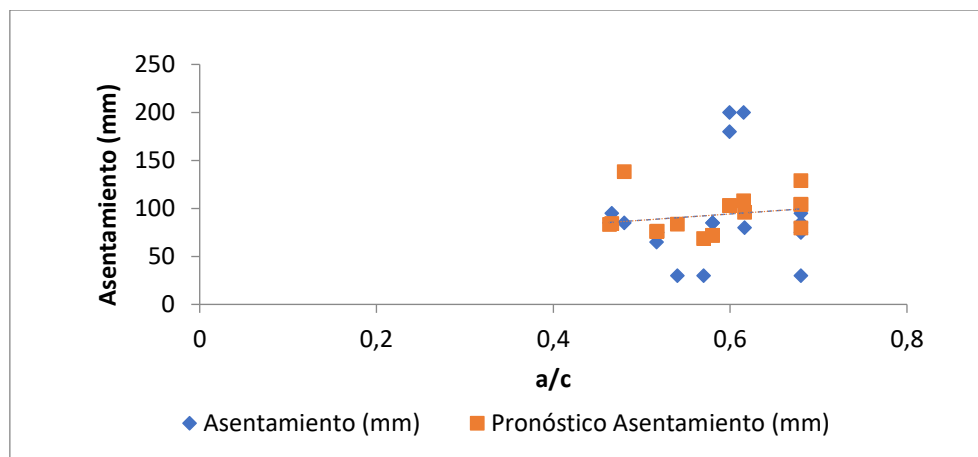


Figura 46: Curva de regresión ajustada para agua/cemento vs. Asentamiento.

De los gráficos obtenidos se puede observar que la tendencia de los datos tanto reales como del pronóstico es muy similar con un crecimiento leve del asentamiento conforme se aumenta el contenido de agua y la relación agua/cemento. Esta tendencia refleja el ajuste que se buscaba con el aumento del contenido de agua conforme se reducía la relación agua/cemento, donde se puede ver que el asentamiento está dado por una línea con poca pendiente cerca del valor esperado de diseño de 100 mm.

La mayor trabajabilidad de las mezclas producidas con agregados de Guápiles se atribuye principalmente a la forma de este agregado, debido a que es un material mucho menos anguloso y rugoso que el material quebrado de tajo, cumpliendo mejor una función que se asemeja a la de un rodillo, facilitando el movimiento de todos los materiales constituyentes dentro del concreto.

De los resultados se destaca que fue posible obtener concretos con relaciones agua/cemento tan bajas como 0,46 y asentamientos dentro del rango aceptable para el colado de elementos estructurales (Según ACI 211.1-91) sin la necesidad de utilizar aditivos reductores de agua, esto gracias al aumento del contenido de agua contra la reducción de la relación agua/cemento. Como se mencionó anteriormente, aunque se logra obtener un asentamiento aceptable para un concreto de mediana a alta resistencia sin utilizar aditivos, se deben tomar en cuenta los factores que se verán afectados en el concreto por un contenido excesivo de agua, entre los que se destacan el fracturamiento excesivo por la contracción volumétrica, la segregación por sangrado excesivo de los materiales constituyentes y la obtención de superficies poco densas

que devienen en descascaramiento por la alta fragilidad. Además, se debe tomar en cuenta el factor de optimización económica, esto debido a que los concretos con un alto contenido de agua requieren de un alto contenido de cemento para mantener relaciones agua/cemento bajas, y la producción de concretos de mediana a alta resistencia sin aditivos genera una ineficiencia en cuanto al aprovechamiento máximo de los materiales constituyentes.

Con respecto a la temperatura del concreto fresco, los concretos producidos con agregados de Cerro Minas mantuvieron un rango entre los 22 °C y los 25 °C, mientras que los producidos con agregados de Guápiles fueron un poco mayores con un rango entre 24 °C y 27 °C, esta diferencia se atribuye a que el agregado fino de Guápiles se mantuvo almacenado en una saca sin una cubierta sobre la misma, por lo que se utilizaba el material a mayor temperatura lo que aumenta la temperatura del concreto fresco. Ambos rangos de temperatura experimental mencionados cumplen con el límite mínimo de 4 °C que genera un retraso en la ganancia de temperatura según lo establecido por la Asociación del Cemento Portland (Portland Cement Association, PCA), también cumplen con el límite máximo de 35 °C establecido en el ACI 305R.

En cuanto al contenido de aire, en ninguna de las mezclas elaboradas se obtuvo un porcentaje de aire arrastrado que alcanzara el valor esperado en el diseño, los concretos producidos con agregados de Cerro Minas obtuvieron un rango entre 1,6% y 1,8% del volumen de concreto y los concretos producidos con agregados de Guápiles presentaron un rango entre 1,7% y 2,1%. En estos concretos el contenido de aire es producto de la incorporación de burbujas durante los procesos de mezclado que, según Kosmatka (2004), varían entre el 1% y el 3% del volumen de concreto y su presencia en exceso aumenta la permeabilidad y disminuye la resistencia a la compresión, por lo que se debe controlar de manera adecuada según los requerimientos de la mezcla, además, son necesarias técnicas adecuadas de compactación y vibración al momento de colocación el concreto, para evitar el arrastre innecesario de aire y la presencia de vacíos que comprometan la capacidad en compresión, la densidad o el acabado del concreto.

Respecto al peso unitario de los concretos evaluados, se obtiene un rango entre 2230 kg/m³ y 2296 kg/m³ para los concretos producidos con agregados de Cerro Minas con un valor promedio de 2269 kg/m³ y entre 2186 kg/m³ y 2355 kg/cm³ para concretos producidos con agregados de Guápiles con un valor promedio de 2307 kg/m³, esto lleva a un promedio general para todas las mezclas realizadas de 2288 kg/m³. Estos resultados se encuentran dentro del rango especificado para los concretos de convencionales (2200 kg/m³ - 2400 kg/m³) y se catalogan

también como concretos de peso normal según la descripción del ACI 318S-19. La variación en los resultados depende de la densidad de los agregados utilizados, lo que explica el valor promedio mayor para los concretos con agregados de Guápiles, los cuales presentan pesos unitarios mayores a los agregados de Cerro Minas, también depende de la cantidad de aire atrapado, la cual no presenta variaciones significativas entre los concretos y de la cantidad de agua y cemento, las cuales, aunque si varían significativamente entre las mezclas, no se obtiene una tendencia de variación respecto a estos cambios.

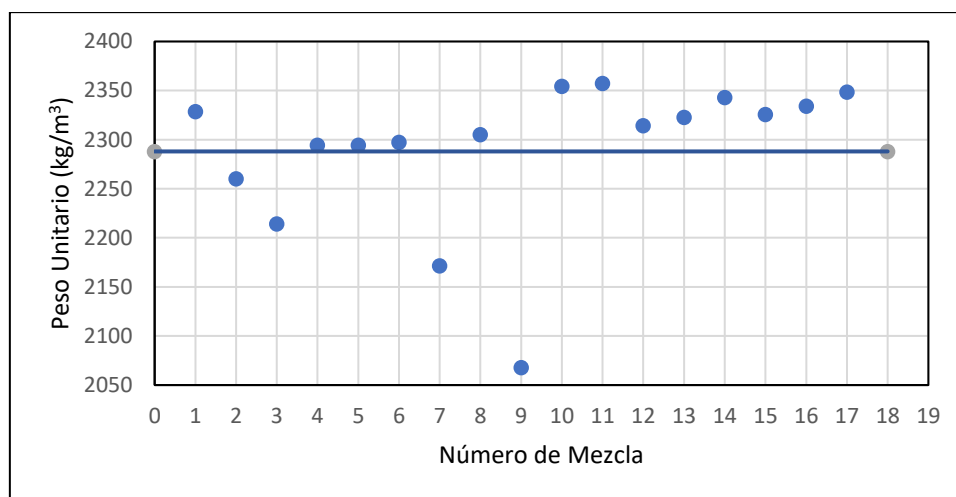


Figura 47: Pesos unitarios experimentales de concretos de mediana resistencia

4.2 Resistencia a la compresión

4.2.1 Variación de resultados

Las variaciones en los resultados de resistencia se atribuyen principalmente a factores como la variación en las proporciones de los materiales constituyentes y en los procedimientos de ensayo, por lo que la magnitud de las variaciones en la resistencia son un resultado directo del grado de control sobre los materiales y de los procesos de producción, muestreo, curado, transporte y ensayo de los especímenes.

Para evaluar los resultados obtenidos de resistencia a la compresión, se utilizan los estándares de control de concreto presentados en el ACI 214R-11, utilizando la desviación estándar como parámetro de comparación. Para la evaluación general se utilizan dos desviaciones promedio debido a que los parámetros de comparación varían para concretos con resistencias a 28 días mayores a 34,5 MPa.

Se obtiene una desviación estándar promedio de 0,6 MPa (6,6 kg/cm²) para la totalidad de las pruebas de compresión realizadas a mezclas con resistencia por debajo de 34,5 MPa, esta se categoriza según el ACI 214R- 02 como excelente por ser menor a 1,4 MPa (14,3 kg/cm²). Para las mezclas que superan un $f'c$ de 34,5 MPa se obtuvo una desviación promedio de 1,9 MPa (18,9 kg/cm²) la cual se categoriza como excelente ser menor a 3,5 MPa (35,7 kg/cm²).

Cuadro 62: Evaluación de la variación de los resultados según ACI 214R-11

Agregado	Diseño	Desviación estándar promedio (MPa)	Clasificación según ACI 214R-11
Cerro Minas	210 kg/cm ²	0,5	Excelente
	280 kg/cm ²	1,0	Excelente
	350 kg/cm ²	0,6	Excelente
	*420 kg/cm ²	-	-
Guápiles	210 kg/cm ²	0,3	Excelente
	280 kg/cm ² D1	1,6	Muy Bueno
	280 kg/cm ² D2	0,2	Excelente
	350 kg/cm ²	1,2	Excelente
	420 kg/cm ²	2,5	Excelente

* Solo se realizó una mezcla para esta resistencia por limitaciones de la investigación

En el Cuadro 62 se presenta un resumen de la clasificación del parámetro de desviación estándar promedio por tipo de agregado y diseño, definiendo los parámetros de comparación para muestras producidas en laboratorio. Como se puede observar la mayoría de las desviaciones se consideran como excelentes (7 en total) y solo una de ellas se clasifica como muy buenas, esto demuestra la fiabilidad de los resultados obtenidos para las pruebas de compresión simple.

4.2.2 Resistencia a la compresión según relación agua/cemento

Con el objetivo de contar con datos más acertados para la comparación de los resultados, se realizó el ensayo de humedad de los agregados utilizados al momento de producir las mezclas de concreto, de esta forma se recalculaba la relación agua/cemento de cada mezcla para obtener los valores reales y compararlos con las resistencias obtenidas. A continuación, se presenta un resumen de los valores reales de las relaciones agua/cemento, así como una comparación con las resistencias obtenidas en cada caso.

Cuadro 63: Relaciones agua/cemento reales, agua de mezcla y resistencia de concretos producidos con agregados de Guápiles.

Mezcla	a/c real	f'c	
		MPa	kg/cm ²
G prueba	0,55	36,7	374
G210 M1	0,68	28,8	293
G210 M2	0,68	29,4	300
G280 M1	0,60	28,9	295
G280 M2	0,60	29,1	297
G280 M3	0,58	31,8	324
G280 M4	0,58	33,4	341
G350 M1	0,52	37,8	386
G350 M2	0,52	41,4	422
G420 M1	0,47	43,5	443
G420 M2	0,46	44,7	456

Con los datos presentados se realizó una regresión lineal para las variables de resistencia a la compresión a 28 días (f'_c) y la relación agua/cemento real de la mezcla, esto con el objetivo de contar con una herramienta para el ajuste de los diseños con un rango de resistencias entre 210 kg/cm² (41,2 MPa) y 420 kg/cm² (20,6 MPa) producidos con cementos de modificados mixtos según el RTCR:479-2015. El ajuste es necesario ya que la metodología de diseño del ACI 211.1-91 aplica para cementos tipo portland puros y la utilización de cementos modificados con adiciones brinda resultados de resistencia a los 28 días muy superiores a los esperados. Esto en la práctica incurre en concretos con alto contenido de cemento que representan un mayor costo de producción y un exceso innecesario de resistencia que puede afectar otras propiedades como la deformabilidad (Módulo de elasticidad) generando comportamientos distintos a los esperados en los elementos estructurales.

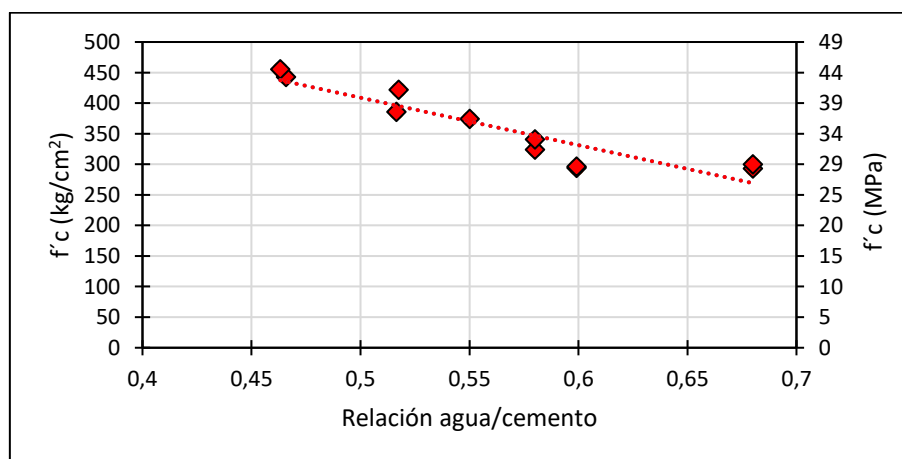


Figura 48: Resistencia a la compresión según relación agua/cemento para mezclas con agregados de Guápiles.

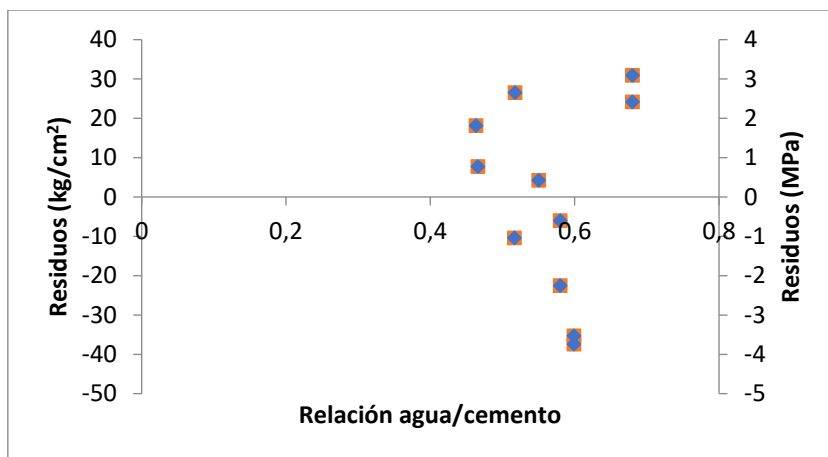


Figura 49: Gráfico de residuos de regresión $f'c$ vs relación agua/cemento para mezclas con agregados de Guápiles.

En la Figura 48 se presenta el gráfico de dispersión y la recta de mejor ajuste para la resistencia a la compresión en función de la relación agua/cemento real de cada mezcla para concretos producidos con cemento modificado mixto y agregados de río, las ecuaciones de la recta obtenidas son:

$$f'c = -776,7 \cdot (a/c) + 797,3 \text{ [kg/cm}^2\text{]} \quad [6]$$

$$f'c = -76,2 \cdot (a/c) + 78,19 \text{ [MPa]} \quad [7]$$

Para ambas regresiones se obtiene un coeficiente de correlación múltiple de 0,9199 lo que indica una dependencia alta entre ambas variables, cumpliendo con lo esperado. Además, se obtiene un coeficiente de determinación (R^2) de 0,8462 por lo que cada ecuación obtenida representa en un 85% los datos.

En la Figura 49 se presenta el gráfico con los residuos obtenidos de las regresiones lineales, los residuos negativos representan los casos en los que la ecuación brinda resultados de resistencia mayor a la obtenida experimentalmente, y los positivos indican que la ecuación subestima los resultados. El residuo de mayor magnitud es de 3,6 MPa (37 kg/cm^3) por encima del valor real (residuo negativo).

Desde el punto de vista de diseño de mezclas, la utilización de esta ecuación para la estimación de la relación agua/cemento requiere de un ajuste que permita la seguridad de obtención del valor mínimo de resistencia esperada, por lo que los residuos negativos de la ecuación toman

importancia dado que son los casos en los que la ecuación brinda resistencias esperadas mayores a las reales.

Cuadro 64: Relaciones agua/cemento reales, agua de mezcla y resistencia de concretos producidos con agregados de Cerro Minas.

Mezcla	a/c real	f'c	
		MPa	kg/cm ²
CM210 M1	0,68	24,8	253
CM210 M2	0,68	23,7	241
CM280 M1	0,62	26,4	270
CM280 M2	0,62	28,8	294
CM350 M1	0,57	34,0	346
CM350 M2	0,54	34,9	356
CM420	0,48	42,2	430

En la Figura 50 se presenta el gráfico de dispersión y la recta de mejor ajuste para la resistencia a la compresión en función de la relación agua/cemento real de cada mezcla para concretos producidos con cemento modificado mixto y agregados de tajo, en este caso es notable un mejor ajuste en la recta que en el caso de los concretos producidos con agregados de Guápiles.

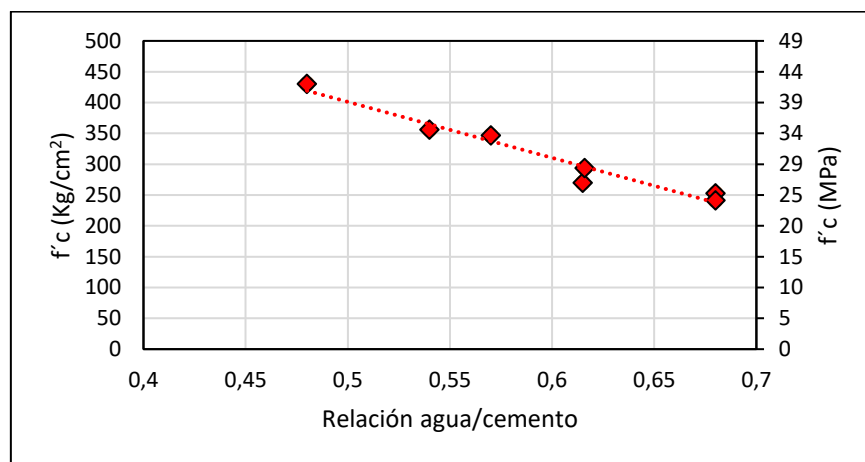


Figura 50: Resistencia a la compresión según relación agua/cemento para mezclas con agregados de Cerro Minas.

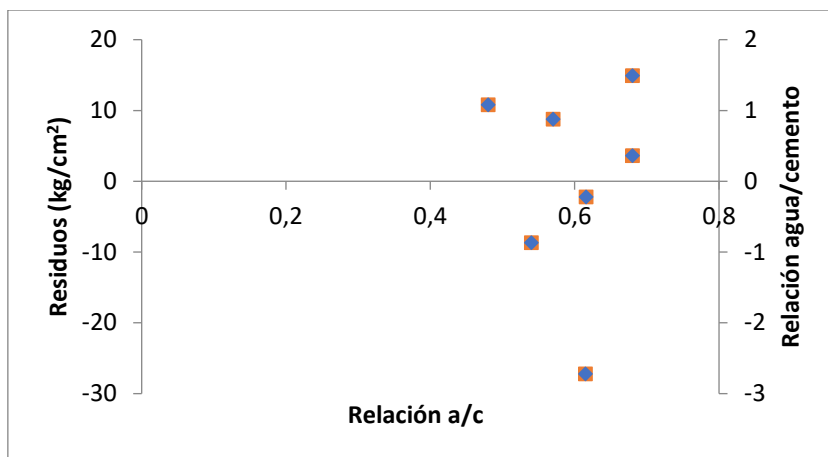


Figura 51: Gráfico de residuos de regresión $f'c$ vs relación agua/cemento para mezclas con agregados de Cerro Minas.

Las ecuaciones obtenidas de las regresiones son las siguientes:

$$f'c = -908,0 \cdot (a/c) + 855,1 \text{ [kg/cm}^2\text{]} \quad [8]$$

$$f'c = -89,04 \cdot (a/c) + 83,86 \text{ [MPa]} \quad [9]$$

Para ambas regresiones se obtiene un coeficiente de correlación múltiple de 0,9772 lo que indica una dependencia entre las variables incluso mayor a la correlación obtenida para los concretos producidos con agregados de Guápiles. Se obtiene un coeficiente de determinación (R^2) de 0,9549 por lo que cada ecuación obtenida representa en un 95% los datos. En la Figura 51 se presenta el gráfico con los residuos obtenidos de las regresiones lineales, siendo el resultado de mayor magnitud de 2,7 MPa (27 kg/cm³) por encima del valor real (residuo negativo).

Con el objetivo de obtener una relación general para la estimación de resistencia a la compresión de concretos de mediana resistencia producidos con agregados nacionales y cemento de uso general a partir de las relaciones agua/cemento, se elabora una regresión lineal con la totalidad de los datos obtenidos de resistencia y relación agua/cemento real.

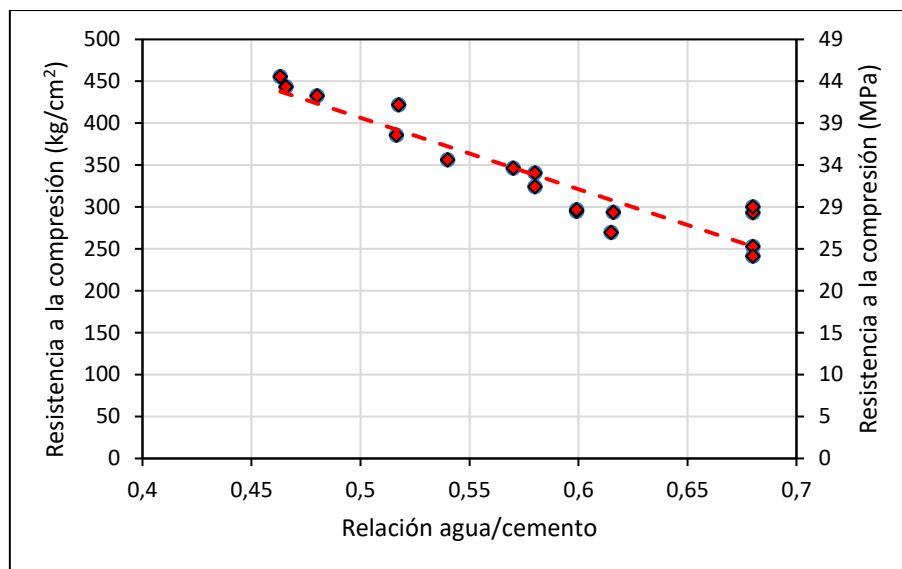


Figura 52: Resistencia a la compresión según relación agua/cemento para todas las mezclas.

En la Figura 52 se presenta el gráfico de dispersión y la recta de mejor ajuste para la resistencia a la compresión en función de la relación agua/cemento real de cada mezcla para concretos producidos con cemento modificado mixto y agregados de tajo y río, las ecuaciones de la recta obtenidas son:

$$f'c = -852,7 \cdot (a/c) + 832,8 \text{ [kg/cm}^2\text{]} \quad [10]$$

$$f'c = -83,62 \cdot (a/c) + 81,67 \text{ [MPa]} \quad [11]$$

Para ambas regresiones se obtiene un coeficiente de correlación múltiple de 0,9376 lo que indica una alta dependencia entre las variables, cabe destacar que se obtiene un valor superior al de la regresión para los concretos producidos con agregados de río y menor a la de los concretos producidos con agregados de tajo. Se obtiene un coeficiente de determinación (R^2) de 0,8791 por lo que la ecuación obtenida representa en un 88% de los datos.

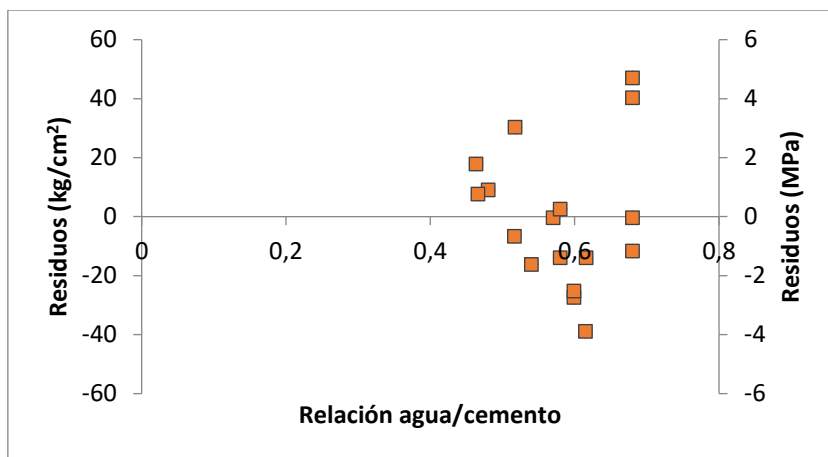


Figura 53: Gráfico de residuos de regresión $f'c$ vs a/c para todas las mezclas.

En la Figura 53 se presenta el gráfico con los residuos obtenidos de las regresiones lineales, como se mencionó anteriormente los residuos negativos representan los casos en los que la ecuación brinda resultados de resistencia mayor a la obtenida experimentalmente, por lo que toman una mayor importancia en el uso de la ecuación para estimaciones de diseño. El residuo de mayor magnitud es positivo, con un valor de 4,6 MPa (47 kg/cm³), sin embargo, dado que es un residuo producido porque la resistencia real supera la estimada, no se considera como crítico para la utilización de la ecuación para las estimaciones de diseño. El residuo negativo de mayor magnitud es de 3,8 MPa (39 kg/cm³) que es, en otras palabras, el error máximo de resistencia que se obtiene con la ecuación respecto a los resultados reales.

Para las estimaciones de diseño de mezclas se podría utilizar la ecuación ajustada según el residuo negativo de mayor magnitud, esto con el objetivo de contar con un factor de seguridad que evite la obtención de resistencias inferiores a la mínima esperada. Se plantea como recomendación para una aproximación de la resistencia según la relación agua/cemento las siguientes ecuaciones:

$$f'c = -853 \cdot (a/c) + 794,0 \text{ [kg/cm}^2\text{]} \quad [12]$$

$$f'c = -83,6 \cdot (a/c) + 77,9 \text{ [MPa]} \quad [13]$$

4.2.3 Desarrollo de resistencia

Para evaluar el desarrollo de resistencia de los concretos se compararon las resistencias a 7 y 14 días con la resistencia obtenida a 28 días ($f'c$), esto con el objetivo de determinar los

porcentajes de ganancia de resistencia que permitan proyectar resultados a edades tempranas de falla. Estos datos son valiosos para la determinación del cumplimiento de las cualidades mecánicas de un concreto específico durante los procesos constructivos, ya que estos generalmente no pueden disponer de 28 días para esperar los resultados. Un resumen de los resultados promedio para cada diseño se presenta en el Cuadro 65 para concretos producidos con agregados de Guápiles y en el Cuadro 66 para los producidos con agregados de Cerro Minas.

Cuadro 65: Porcentajes de ganancia de resistencia a 7, 14 y 56 días respecto a $f'c$ para concretos elaborados con agregados de Guápiles.

Diseño	Edad de falla		
	7 días	14 días	56 días
210 kg/cm ²	65%	86%	-
280 kg/cm ² D1	78%	93%	-
280 kg/cm ² D2	68%	87%	116%
350 kg/cm ²	68%	79%	-
420 kg/cm ²	70%	83%	110%
Promedio	70%	86%	113%
Desv. Est.	0,048	0,052	0,038

Cuadro 66: Porcentajes de ganancia de resistencia a 7, 14 y 56 días respecto a $f'c$ para concretos elaborados con agregados de Cerro Minas.

Diseño	Edad de falla		
	7 días	14 días	56 días
210 kg/cm ²	71%	86%	-
280 kg/cm ²	75%	91%	-
350 kg/cm ²	79%	94%	110%
420 kg/cm ²	75%	90%	-
Promedio	75%	90%	110%
Desv. Est.	0,03	0,04	-

Como se mencionó previamente, los valores teóricos establecen un rango de ganancia de resistencia a los 7 días entre el 65% y el 75% de la resistencia a los 28 días, además, los resultados de Delgado (2018) para concretos producidos con el mismo tipo de cemento utilizado en esta investigación (MM/B (P-C)-28), muestran que a los 7 días se obtiene un 75% de la resistencia a los 28 días utilizando agregados de río y un 86% utilizando agregados de tajo. Los resultados obtenidos en la presente investigación difieren respecto a los valores obtenidos por Delgado, pero se mantienen dentro del rango teórico establecido para concretos

de uso normal, con una ganancia promedio del 70% de la resistencia a 28 días para concretos con agregados provenientes de Guápiles (Río) y una de 75% para los producidos con agregados de Cerro Minas (Tajo). Las diferencias con los resultados experimentales pueden atribuirse a factores directos relacionados el procedimiento de muestreo, sin embargo, cabe destacar que se mantiene la tendencia en cuanto a la variable fuente de agregados, debido a que en ambas investigaciones se obtiene una ganancia de resistencia a los 7 días mayor para los concretos producidos con agregados de tajo. En cuanto a las características del cemento, esta ganancia de resistencia es consistente con la establecida en la ficha técnica del material en la que se establece que a los 7 días se obtiene aproximadamente el 71% de la resistencia a 28 días.

En cuanto al parámetro de resistencias adquirida a los 14 días respecto a la resistencia a los 28 días, este no es considerado de tanta importancia como el de la resistencia a los 7 días o a los 3 días debido a que representa una espera significativa por resultados que pueden afectar los cronogramas de ejecución de las obras, sin embargo, se considera un parámetro importante para complementar los resultados a 7 días y realizar proyecciones más acertadas. Según los resultados, la resistencia a los 14 días representa un 86% de la resistencia a los 28 días para los concretos producidos con agregados de Guápiles y un 90% para los producidos con agregados de Cerro Minas, ambos resultados se consideran dentro de los rangos esperados debido a que se conoce que se mantiene aproximadamente entre el 80% y 90% para cementos de uso general que no posean adiciones especiales para la aceleración o retardo de ganancia de resistencia. Cabe destacar también que se mantiene la tendencia presentada en los resultados a una edad de falla de 7 días, ya que se obtiene una ganancia de resistencia a los 14 días superior para los concretos producidos con agregados de Cerro Minas.

Respecto a la ganancia de resistencia a edades mayores a los 28 días, estas se estimaron a partir de los resultados de resistencia a la compresión de los cilindros de 150 mm x 300 mm requeridos para la determinación del módulo de elasticidad a 56 días. Para determinar si los resultados eran comprobables se realizó un análisis de varianza (ANOVA) entre los resultados a compresión simple de los cilindros de 100 mm x 200 mm y los cilindros de 150 mm x 300 mm a la misma edad de falla, del análisis se obtuvieron los resultados presentados en el Cuadro 67.

Cuadro 67: ANOVA de resultados de resistencia a la compresión según tamaño de espécimen.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,0093	1	0,0093	0,0007	0,9793	4,6001
Dentro de los grupos	187,689	14	13,4063			

Dado que el valor de F calculado es menor al valor de F crítico, se acepta la hipótesis de que las medias de resistencia para ambos tamaños de espécimen son iguales con un 95% de confianza.

Sabiendo esto, se hizo la comparación y se obtuvo un promedio de 13% de ganancia de resistencia a los 56 días respecto a los 28 días para los concretos producidos con agregados de Guápiles y un 10% para los concretos producidos con agregados de Cerro Minas. Esto concuerda una vez más con los resultados de Delgado, ya que se obtiene para los concretos producidos con cemento tipo MM/B (P-C)-28 una mayor ganancia de resistencia en los que se utilizan agregados de río.

4.2.4 Eficiencia de dosificación

Un aspecto importante a evaluar en la producción de concretos está relacionado a la eficiencia, es decir, a alcanzar un objetivo utilizando la menor cantidad de recursos posible. En la producción de concreto esto se resume al aprovechamiento máximo de todos los materiales constituyentes para la obtención de las cualidades requeridas del material y para evaluarlo se utilizará la variable del contenido de cemento, ya que este es el material de mayor costo en el concreto.

Para cuantificar la eficiencia del contenido de cemento se define un índice simple que corresponde al cociente de la resistencia a la compresión a 28 días en kilogramos por centímetro cuadrado y el contenido de cemento en kilogramos por metro cúbico de concreto, por lo que entre mayor sea el índice, mayor es la eficiencia tomando en cuenta solo el factor de resistencia a la compresión.

Cuadro 68: Contenido de cemento y eficiencia de mezclas producidas con agregados de Guápiles.

Diseño	Muestra	Resistencia 28 días		Cont. Cemento (kg/m ³)	Índice de eficiencia
		MPa	kg/cm ²		
210	1	28,8	293,3	321,6	0,91
	2	29,4	300,0	321,6	0,93
280 D1	1	31,8	324,3	380,6	0,85
	2	33,4	340,8	380,6	0,90
280 D2	1	28,9	294,6	409,1	0,72
	2	29,1	296,7	409,1	0,73
350	1	37,8	385,7	409,1	0,94
	2	41,4	421,9	409,1	1,03
420	1	43,5	443,2	479,2	0,92
	2	44,7	455,6	479,2	0,95
				Promedio	0,89

Cuadro 69: Contenido de cemento y eficiencia de mezclas producidas con agregados de Guápiles.

Diseño	Muestra	Resistencia 28 días		Cont. Cemento (kg/m ³)	Índice de eficiencia
		MPa	kg/cm ²		
210	1	24,8	252,6	314,33	0,80
	2	23,7	241,3	328,95	0,73
280	1	26,4	269,5	389,27	0,69
	2	28,8	293,6	384,95	0,76
350	1	34,0	346,4	400,00	0,87
	2	34,9	356,1	409,09	0,87
420	1	42,2	430,1	500,00	0,86
				Promedio	0,80

El índice utilizado, debido a que no cuenta con unidades coherentes es meramente comparativo y con este se logra demostrar que, para la generalidad de los concretos de mediana resistencia producidos, los concretos con agregados de río son más eficientes en cuanto a la relación resistencia-contenido de cemento. Esta afirmación es congruente con una de las conclusiones de Delgado (2018) en la que afirma según sus resultados que las mayores resistencias se generan al producir concretos con agregados de río, esto se puede visualizar de forma puntual con los resultados de resistencia a la compresión para los concretos tipo G210 y CM210, donde los concretos se producen con la misma relación agua/cemento y la resistencia del concreto con agregado de río supera en un 20% a la del concreto con agregado de tajo.

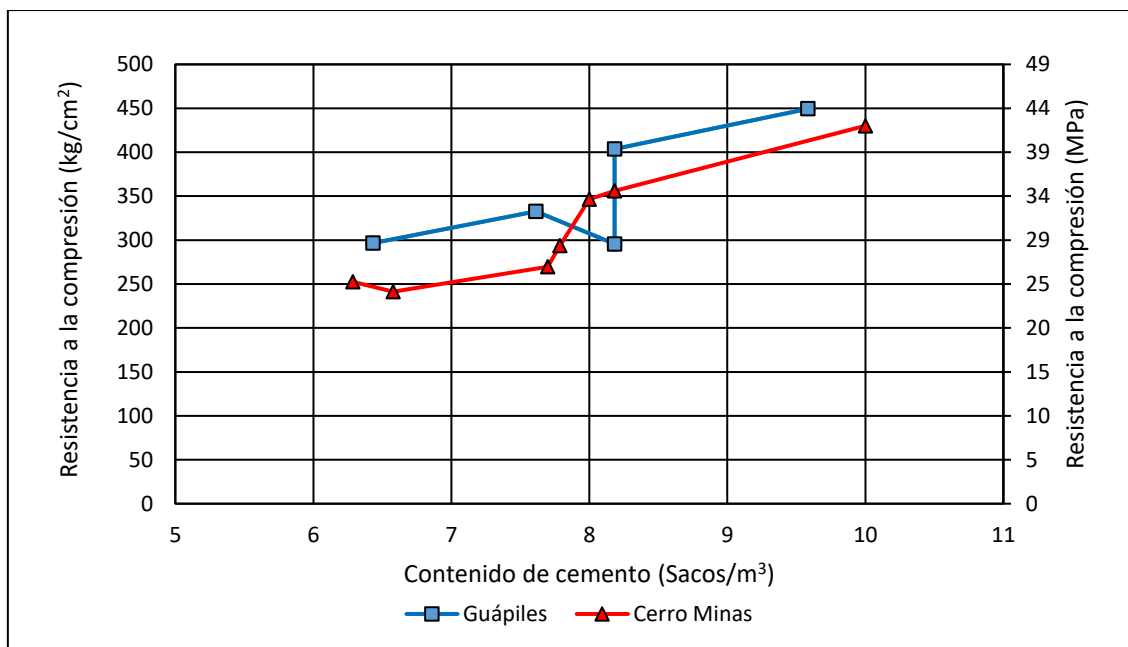


Figura 54: Influencia del contenido de cemento en la resistencia a la compresión

Otra forma de visualizar la influencia de la variable del contenido de cemento en la resistencia a la compresión de los concretos de mediana resistencia es la presentada en la Figura 54, aquí se puede observar el crecimiento de la resistencia a la compresión conforme se aumenta la cantidad de sacos de cemento por metro cúbico de concreto, lo cual corresponde al comportamiento esperado. Se debe destacar que cerca de los 8 sacos de cemento por metro cúbico de concreto se presenta un crecimiento rápido de resistencia que luego se reduce para contenidos mayores.

Uno de los puntos más importantes a destacar de la Figura 54 es el punto de crecimiento vertical de la curva azul (concretos producidos con agregados de Guápiles), este punto corresponde a los resultados del concreto tipo G280D2 el cual, como se mencionó en la sección de resultados, fue producto de un exceso de humedad no contabilizado en el agregado fino. Debido a que inicialmente la mezcla estaba diseñada para una resistencia de 350 kg/cm², se utilizó un contenido de cemento de 409,1 kg por metro cúbico de concreto (8,2 sacos) y un contenido de agua de 225 kg por metro cúbico de concreto, esto sumado a un exceso de humedad del agregado fino dio como resultado una mezcla con una relación agua/cemento de 0,60 y una resistencia mucho más baja que la esperada. Esta variación abrupta en la curva permite destacar que un contenido de cemento alto no garantiza una alta resistencia del concreto sino se cuenta con un adecuado control de todos los materiales constituyentes de la

mezcla, ya que se puede incurrir en errores que lleven a la producción de concretos de alto costo e ineficientes, con un alto contenido de cemento y un exceso de agua que no cumple ninguna función mecánica en el concreto endurecido y además, puede ocasionar altas contracciones volumétricas y sangrado (segregación) excesivo durante el proceso de curado y endurecimiento.

Fuera de la variación mencionada en la curva de los concretos producidos con agregado de río, se evidencia una mayor eficiencia de estos respecto a los producidos con agregados de tajo, ya que la curva roja se mantiene por debajo de la azul prácticamente con la misma forma. Esto permite reafirmar lo mencionado previamente en cuanto a que los agregados de río permiten la producción de concretos de mayor resistencia que los de tajo.

4.3 Resistencia a la tracción

Como se ha mencionado, el concreto es un material de capacidad pobre a tracción con un valor teórico en promedio de solo el 10% de su capacidad a compresión, esto se comprobó con los resultados experimentales de los concretos de mediana resistencia, donde se obtuvieron resistencias a la tracción que representan en promedio un 8% de la capacidad a compresión para los concretos producidos con agregados de Guápiles y de 12% para los producidos con agregados de Cerro Minas.

Debido a que las limitaciones presentadas durante el desarrollo de la etapa experimental algunos de los resultados de resistencia a la tracción se determinaron a edades mayores a los 28 días. Estos cambios requirieron la evaluación de la varianza de los datos para determinar si son comparables entre ellos y poder así evaluar el comportamiento a tracción de los concretos de mediana resistencia y su comparación con la capacidad a tracción. Para hacer la evaluación se utiliza la herramienta estadística del análisis de varianza (ANOVA), comparando los cocientes de la división entre la resistencia a la tracción y resistencia a la compresión a las distintas edades de falla en las que se obtuvieron los resultados, con el objetivo de determinar si las medias de los datos varían significativamente según la edad de ejecución de los ensayos. Para la prueba se establecen las siguientes hipótesis:

- H0: No hay diferencia significativa entre las medias de los datos con un 95 % de confianza.
- H1: Una de las medias varía de forma significativa a un 95 % de confianza.

Cuadro 70: Datos para ANOVA de resistencia a la tracción a distintas edades de falla.

f_t / f_c			
28 días	56 días	50 días	63 días
0,088	0,079	0,114	0,100
0,104	0,085	-	-
0,078	0,089	-	-
0,101	0,086	-	-
0,117	0,069	-	-
0,135	0,069	-	-
0,139	0,120	-	-
0,123	-	-	-

Cuadro 71: Resultados de ANOVA de resistencia a la tracción a distintas edades de falla.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,0026	3	0,00086	2,1840	0,1388	3,4105
Dentro de los grupos	0,0051	13	0,00039			
Total	0,0077	16				

De los resultados se puede apreciar que el valor de F es menor al valor crítico de F, en tanto que el valor de la probabilidad resultante es mayor al nivel de significancia establecido (α) de 0,05, por lo que se puede concluir que no existe una diferencia significativa entre los resultados a distintas edades de falla con un 95% de confianza.

A lo largo de la presentación de los resultados individuales se ha destacado que el comportamiento de los resultados es similar al teórico, basado en la comparación de los resultados de resistencia a la tracción con los de resistencia a la compresión obtenidos a la misma edad de los especímenes, sin embargo, para evaluar más adecuadamente los resultados experimentales respecto al comportamiento teórico para este tipo de concretos se utiliza la comparación de la resistencia a la tracción con la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión para evaluar el ajuste lineal con el teórico utilizado para el diseño estructural. Para la comparación se realiza una regresión lineal con la resistencia a la compresión como la variable dependiente y la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión como la variable independiente.

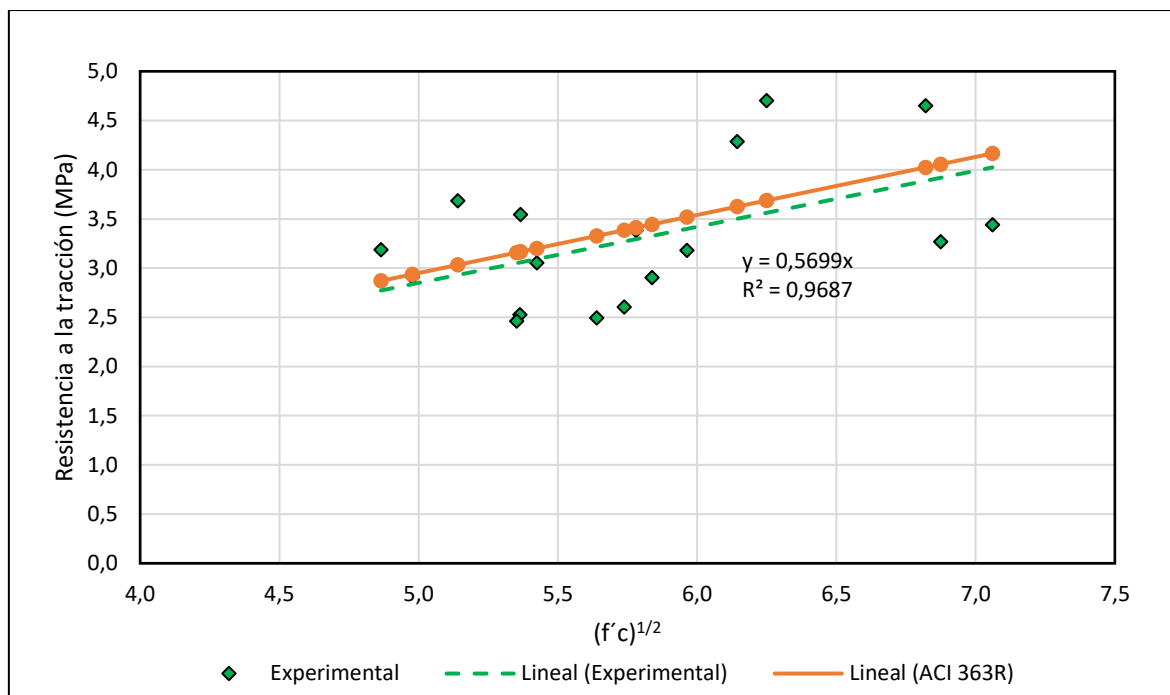


Figura 55: Resistencia a la tracción según raíz cuadrada de resistencia a la compresión

En la Figura 55 se presenta el gráfico de dispersión y la recta de mejor ajuste para la resistencia a la tracción en función de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión de especímenes de la misma mezcla para una misma edad de falla para todos los concretos de mediana resistencia producidos con cemento modificado mixto y agregados de río y tajo disponibles en el mercado nacional a la fecha de elaboración de este informe. La ecuación a evaluar se presenta a continuación:

$$f_{st} = 0,57 \cdot \sqrt{f'_c} \text{ [MPa]} \quad [14]$$

Con la regresión se obtiene un coeficiente de correlación múltiple de 0,9842 lo que indica que se cumple con la alta dependencia esperada entre ambas variables. Además, se obtiene un coeficiente de determinación (R^2) de 0,9687 por lo que la ecuación obtenida representa en un 97% los datos.

En la Figura 56 se presenta el gráfico con los residuos obtenidos de las regresiones lineales, los residuos negativos representan los casos en los que la ecuación brinda resultados de resistencia mayor a la obtenida experimentalmente, y los positivos indican que la ecuación subestima los resultados. El residuo positivo de mayor magnitud es de 1,1 MPa (12 kg/cm^3) y el negativo es de 0,7 MPa (7 kg/cm^3). Cabe destacar que la mayoría de los residuos negativos se dan con los datos experimentales de concretos producidos con agregados de río, es decir,

la regresión sobreestima los valores en mayor porcentaje para estos concretos. Este comportamiento es opuesto al de los concretos producidos con agregados de tajo, donde la ecuación subestima los valores.

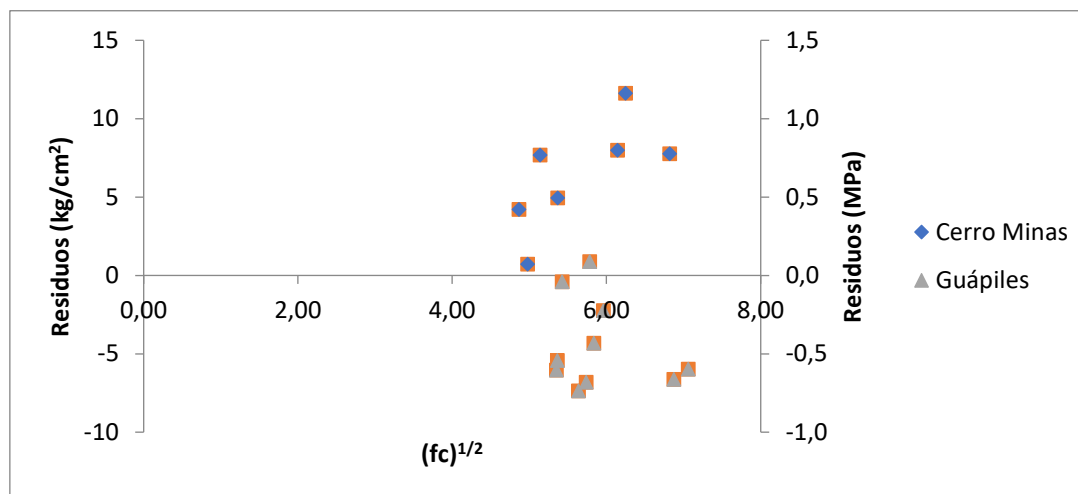


Figura 56: Gráfico de residuos para regresión de f_t vs $(f_c)^{1/2}$

De la ecuación obtenida con la regresión se puede determinar que los resultados experimentales de resistencia a la tracción para concretos de mediana resistencia producidos con cemento de uso general y agregados disponibles en el mercado nacional al momento de elaboración de este informe son consistentes con la ecuación teórica del ACI 363R en tanto la regresión brinda un factor para la variable independiente ($\sqrt{f'_c}$) que varía en solo 3,5 % del factor teórico.

Esto se puede evaluar también con las diferencias porcentuales de los resultados experimentales respecto a los teóricos obtenidos con la evaluación de las resistencias a la compresión reales en la ecuación [1], con lo que se obtiene una diferencia promedio del 16%. Se destaca de estos resultados que la ecuación teórica sobreestima los valores experimentales para los concretos producidos con agregados de río en un rango de 6 % a 23 %, y los subestima para los concretos producidos con agregados de tajo en un rango de 12 % a 19 %, este comportamiento es consistente con el obtenido en la ecuación experimental. En la Figura 57 se puede visualizar el comportamiento señalado y, debido a la diferencia tan marcada, se puede afirmar que los concretos con agregados de tajo tienen una resistencia a la tracción mayor respecto a la resistencia a compresión que los concretos producidos con agregados de río.

Cuadro 72: Diferencias porcentuales de resistencia a la tracción experimental respecto a las estimaciones teóricas.

Fuente	Diseño	Resistencia a tracción (MPa)		% de diferencia
		Experimental	Teórico	
Cerro Minas	210 kg/cm ²	3,0	2,9	6%
	280 kg/cm ²	3,6	3,1	17%
	350 kg/cm ² ***	4,5	3,7	23%
	420 kg/cm ² **	4,6	4,0	16%
Guápiles	210 kg/cm ²	2,8	3,2	12%
	280 kg/cm ² D1	2,9	3,4	13%
	280 kg/cm ² D2*	2,8	3,4	19%
	350 kg/cm ² *	2,8	3,3	16%
	420 kg/cm ² *	3,4	4,1	18%
			Promedio	16%

* Fallas a 56 días

** Falla a 63 días

*** Falla de M1 a 56 días y M2 a 50 días

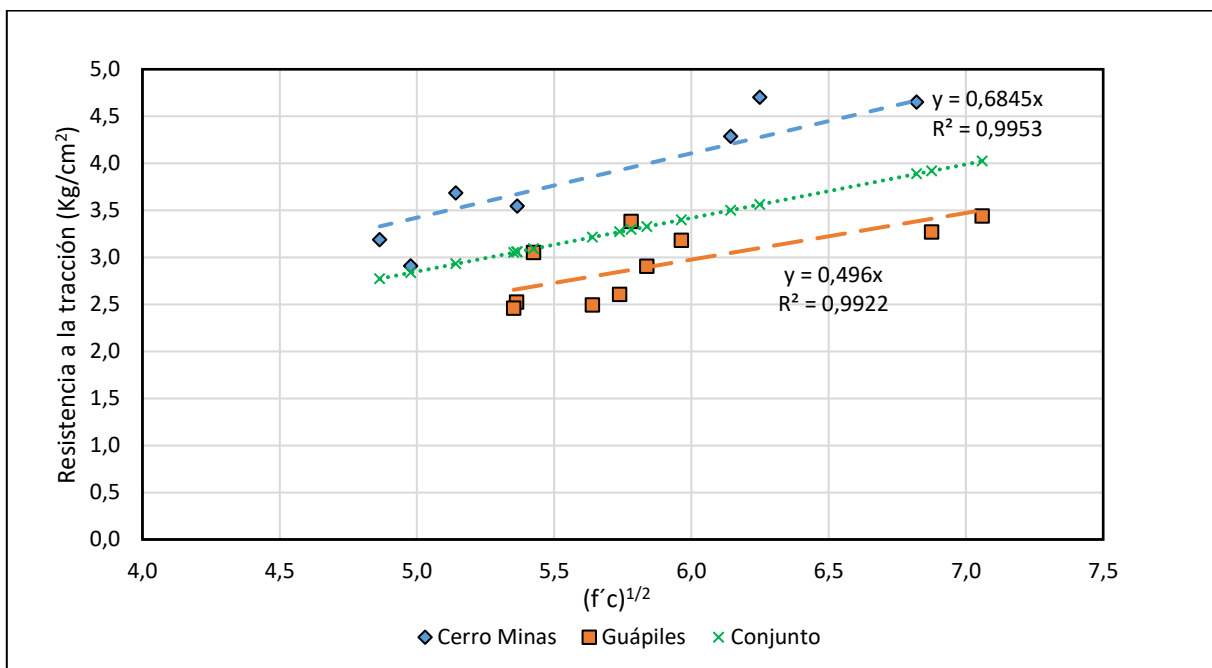


Figura 57: Relación f_{st} vs $(f'_c)^{1/2}$ según la fuente de agregados utilizados en el concreto.

4.4 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad es el parámetro que permite definir la deformabilidad de un concreto específico, por lo que es de suma importancia para el diseño estructural en el cálculo de deformaciones y su cumplimiento con los valores máximos en los códigos de diseño. Debido a

esto, se requieren datos ajustados al tipo de concreto que se esté utilizando para no incurrir en diferencias significativas en las condiciones reales de funcionamiento del material.

Al igual que sucedió con los ensayos de resistencia a la tracción, algunos de los resultados de módulo de elasticidad se determinaron a edades mayores a los 28 días, por lo que se requirió la evaluación de la varianza de los datos para determinar si son comparables y evaluar adecuadamente la relación entre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad para concretos de mediana resistencia. Para hacer la evaluación se utiliza la herramienta estadística del análisis de varianza (ANOVA), comparando los cocientes de la división entre el módulo de elasticidad y resistencia a la compresión a las distintas edades de falla en las que se obtuvieron los resultados, con el objetivo de determinar si las medias de los datos varían significativamente según la edad de ejecución de los ensayos. Para la prueba se establecen las siguientes hipótesis:

- H0: No hay diferencia significativa entre las medias de los datos con un 95 % de confianza.
- H1: Una de las medias varía de forma significativa a un 95 % de confianza.

Cuadro 73: Datos para ANOVA de módulo de elasticidad a distintas edades de falla.

E_c / f_c			
28 días	56 días	50 días	63 días
925,14	995,38	701,57	1228,89
941,14	825,87	-	-
1278,88	1210,00	-	-
909,37	1131,16	-	-
1110,95	640,38	-	-
1404,44	740,49	-	-
1135,94	1287,62	-	-
1217,99	-	-	-

Cuadro 74: Resultados de ANOVA de módulo de elasticidad a distintas edades de falla.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	224604,8	3	74868,3	1,6297	0,2308	3,4105
Dentro de los grupos	597206,3	13	45938,9			
Total	821811,1	16				

De los resultados se puede apreciar que el valor de F es menor al valor crítico de F , en tanto que el valor de la probabilidad resultante es mayor al nivel de significancia establecido (α) de 0,05, por lo que se puede concluir que no existe una diferencia significativa entre los resultados a distintas edades de falla con un 95% de confianza y, por ende, es posible utilizarlos en conjunto para la evaluación general de la relación módulo de elasticidad – resistencia a la compresión.

Para evaluar la relación entre la resistencia a la compresión y los resultados del módulo de elasticidad, se calculan dos regresiones lineales para comparar los resultados con las ecuaciones teóricas [3] y [4]. A continuación, se presentan los gráficos elaborados con la regresión, así como las curvas teóricas basadas en las ecuaciones del ACI 318S-19 y la recomendada por Aragón (2004) para concretos con un rango de resistencia entre 21 MPa (214 kg/cm²) y 70 MPa (714 kg/cm²), esta última se presenta a continuación.

$$E_c = 3420 \cdot \sqrt{f'_c} + 3500 \text{ [MPa]} \quad [15]$$

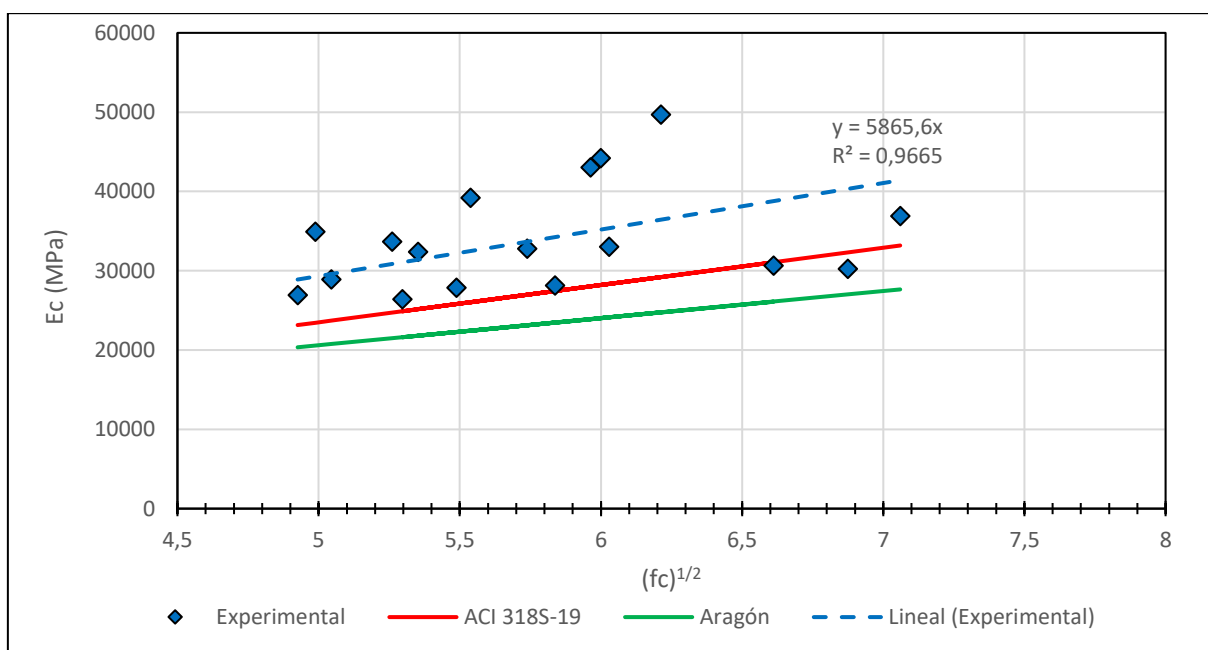


Figura 58: Relación E_c vs $(f_c)^{1/2}$ en MPa y comparación con curvas teóricas.

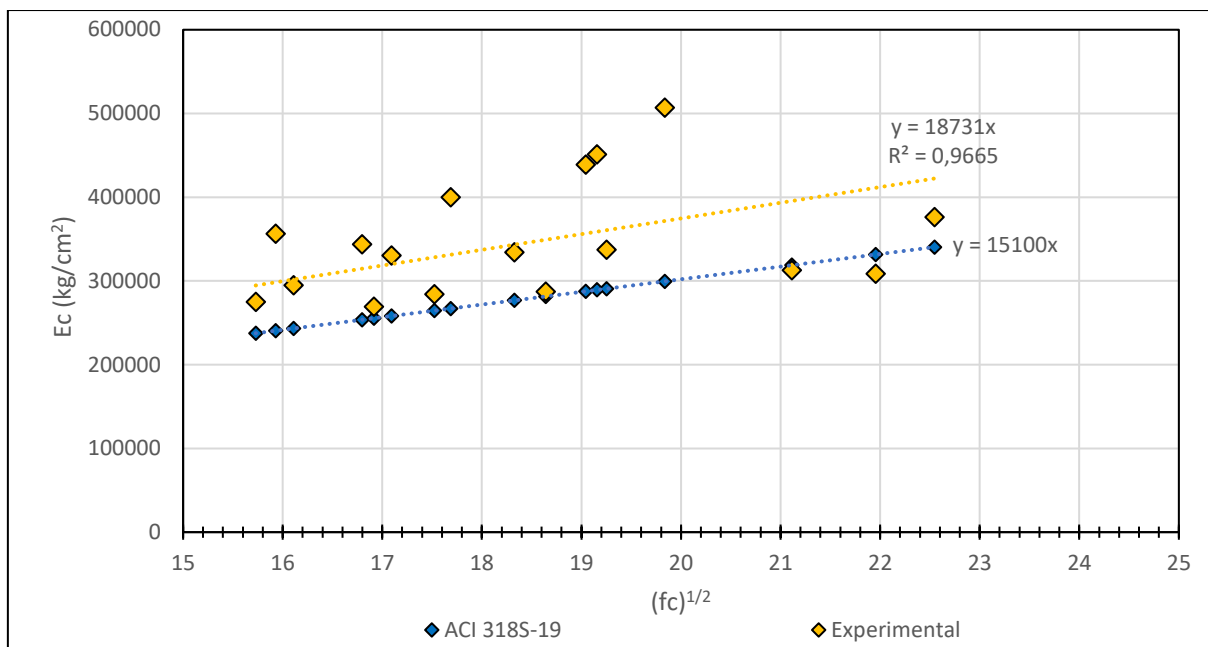


Figura 59: Relación E_c vs $(f_c)^{1/2}$ en kg/cm^2 y comparación con curva teórica.

Los resultados de la regresión brindan las ecuaciones presentadas a continuación:

$$E_c = 5865,6 \cdot \sqrt{f_c} [MPa] \quad [16]$$

$$E_c = 18731 \cdot \sqrt{f_c} [kg/cm^2] \quad [17]$$

Con ambas regresiones se obtiene un coeficiente de correlación múltiple de 0,98313 lo que indica que se cumple con la alta dependencia esperada entre ambas variables. Además, se obtiene un coeficiente de determinación (R^2) de 0,9665 por lo que cada ecuación obtenida representa en un 97% los datos experimentales.

Observando las ecuaciones obtenidas y los gráficos presentados en la Figura 58 y Figura 59 se evidencia que, aunque se cumpla con la dependencia esperada entre las variables y haya consistencia en cuanto a la relación directa, se obtiene que la ecuación [3] del ACI 318S-19 subestima los valores de módulo de elasticidad experimentales entre 3 % y 41 %, así mismo la ecuación [4] los subestima entre 2 % y 41 %. Esto mismo sucede con la ecuación propuesta por Aragón en el caso de la comparación en MPa, la cual subestima los resultados experimentales entre un 11 % y un 50 %.

Se presenta en la Figura 60 el gráfico de residuos para la regresión de los datos en MPa, con una magnitud máxima de 13 251 MPa. En la Figura 61 se puede observar el gráfico de residuos para los datos en kg/cm^2 , con una magnitud máxima de 13 251 MPa.

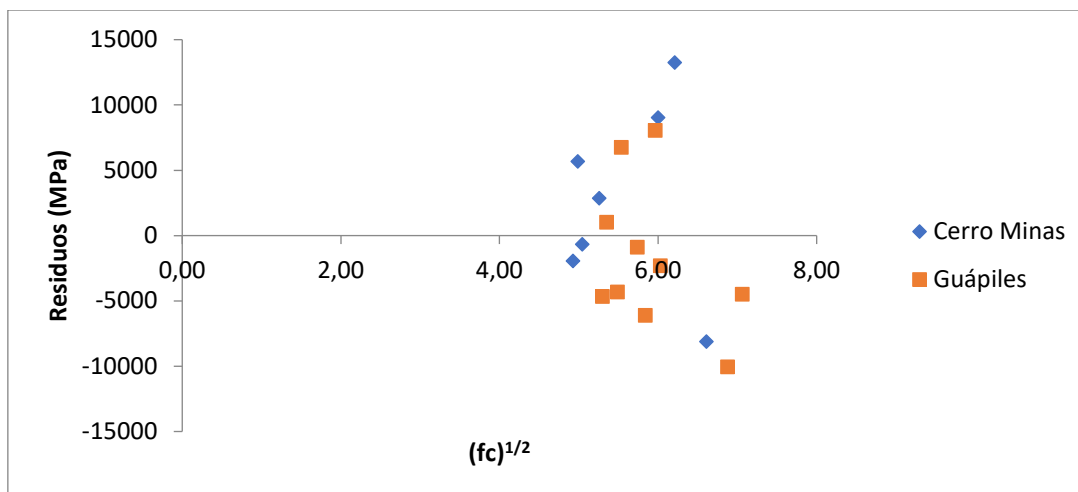


Figura 60: Gráfico de residuos para regresión de E_c vs $(f_c)^{1/2}$ en MPa

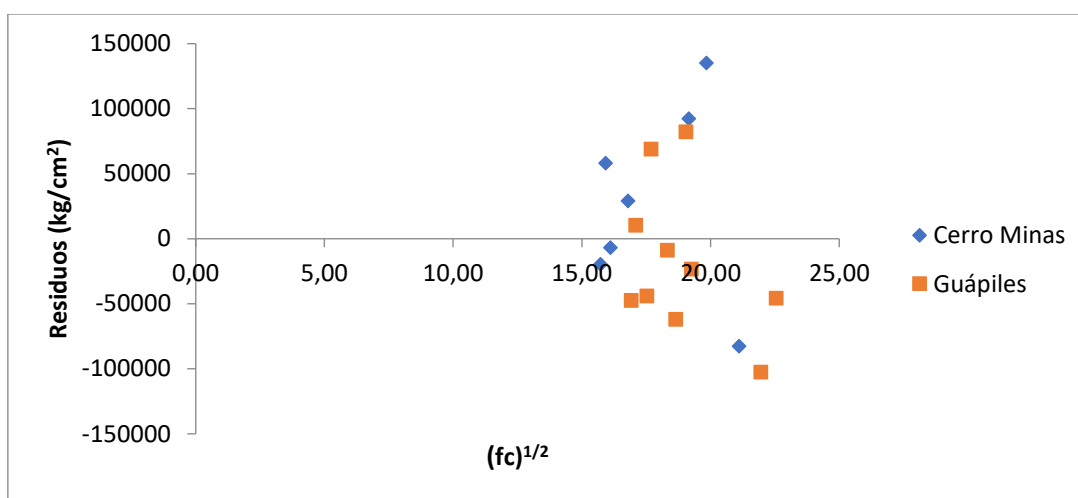


Figura 61: Gráfico de residuos para regresión de E_c vs $(f_c)^{1/2}$ en kg/cm²

Como se ha mencionado previamente, los residuos negativos representan los casos en los que la ecuación brinda resultados de resistencia mayor a la obtenida experimentalmente (sobre estima), y los positivos indican que la ecuación subestima los resultados. Se puede observar en el gráfico que la ecuación obtenida tiende a subestimar el módulo de elasticidad experimental para los concretos con agregado de tajo y a sobreestimar los valores de los concretos con agregados de río en su mayoría.

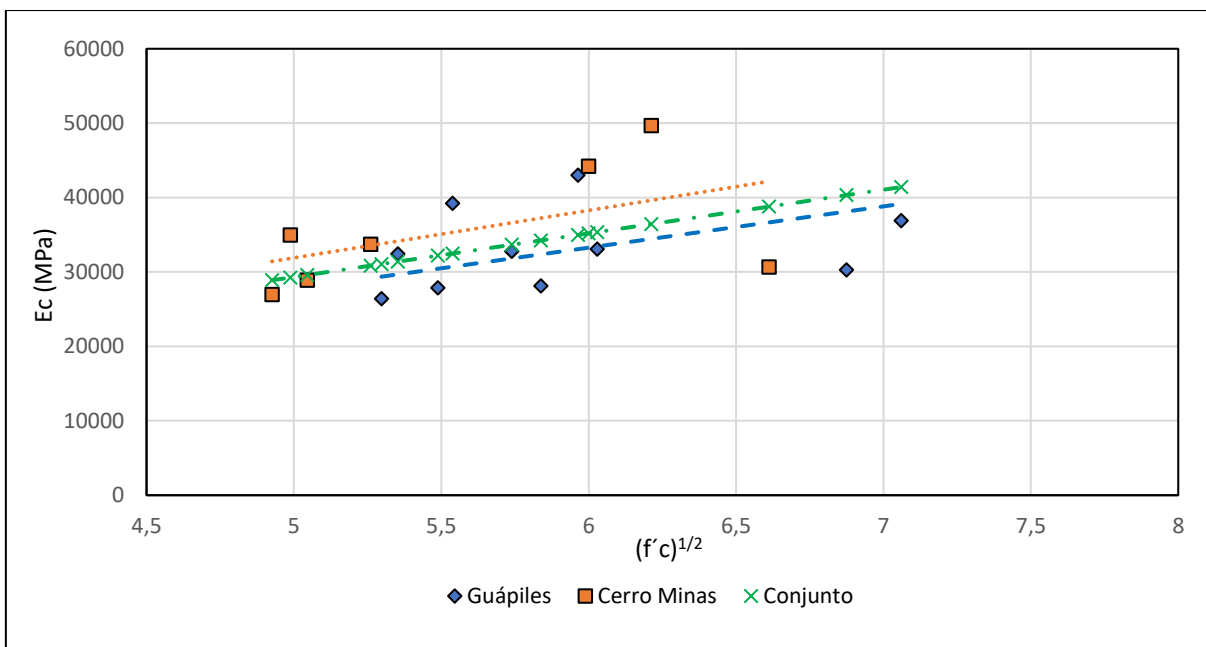


Figura 62: Relación E_c vs $(f_c)^{1/2}$ según la fuente de agregados utilizados en el concreto.

En la Figura 62 se presenta la misma relación entre el módulo de elasticidad y la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión, pero separando las rectas de mejor ajuste según la fuente de agregado con la que fueron producidos los concretos. Los resultados de la regresión brindan las siguientes ecuaciones:

$$- \text{Concretos tipo CM: } E_c = 6379 \cdot \sqrt{f_c} \quad R^2 = 0.9667 \quad [18]$$

$$- \text{Concretos tipo G: } E_c = 5545 \cdot \sqrt{f_c} \quad R^2 = 0.9749 \quad [19]$$

Con estos resultados se evidencia que la ecuación general obtenida para todos los resultados tiende a subestimar los valores experimentales para los concretos producidos con agregados de tajo en un 36 % y a sobrestimar los valores para los concretos con agregado de río en un 18 %.

Se presentan también las diferencias porcentuales entre los valores experimentales y los teóricos obtenidos con las ecuaciones [3] y [4] según las unidades de resistencia a la compresión, con una diferencia promedio de 25%.

Cuadro 75: Diferencias de módulo de elasticidad experimental respecto a valores teóricos estimados con la Ecuación [3]

Fuente	Diseño	fc (MPa)	Ec Experimental (MPa)	Ec Teórico (MPa)	Diferencia
Cerro Minas	210 kg/cm²	24,6	30948	23297	33%
	280 kg/cm²	26,6	31305	24222	29%
	350 kg/cm²	37,3	46958	28701	64%
	420 kg/cm²	43,7	30666	31074	1%
Guápiles	210 kg/cm²	29,1	27133	25348	7%
	280 kg/cm² D1	33,5	30461	27205	12%
	280 kg/cm² D2	33,5	36141	27208	33%
	350 kg/cm²	32,1	37715	26630	42%
	420 kg/cm²	48,6	33587	32750	3%

Cuadro 76: Diferencias de módulo de elasticidad experimental respecto a valores teóricos estimados con la Ecuación [4]

Fuente	Diseño	fc (kg/cm²)	Ec Experimental (kg/cm²)	Ec Teórico (kg/cm²)	Diferencia
Cerro Minas	210 kg/cm²	251	315584	239017	32%
	280 kg/cm²	271	319224	248501	28%
	350 kg/cm²	380	478841	294450	63%
	420 kg/cm²	446	312705	318794	2%
Guápiles	210 kg/cm²	297	276681	260052	6%
	280 kg/cm² D1	342	310614	279102	11%
	280 kg/cm² D2	342	368540	279134	32%
	350 kg/cm²	327	384586	273204	41%
	420 kg/cm²	495	342496	335989	2%

5 Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

1. Se logró la producción de concretos de mediana resistencia de hasta 450 kg/cm^2 con los insumos disponibles en el mercado nacional, y técnicas de mezclado convencionales de concreto producido en sitio.
2. Se logró la producción de concretos con una trabajabilidad adecuada (Asentamiento de 90 mm) y relaciones agua/cemento tan bajas como 0,46 sin utilizar aditivos.
3. El grado de control en los procesos de mezcla y ensayo de los concretos se cataloga de muy bueno a excelente a partir de la evaluación de resultados de resistencia a la compresión de las mezclas según el ACI 214R-11.
4. Las mezclas de concreto producidas con agregado de río proveniente de Guápiles requieren de contenidos de agua menores para la obtención de una trabajabilidad óptima que las producidas con agregado quebrado proveniente de Cerro Minas.
5. Se obtuvo el comportamiento esperado en el desarrollo de resistencia del concreto, con un aumento acelerado en la ganancia de resistencia a edades tempranas que se estabiliza conforme aumenta la edad.
6. Los concretos producidos con cemento de uso general presentan resistencias a la compresión más altas si son producidos con agregados de río en comparación a los producidos con agregados de tajo.
7. Los concretos de mediana resistencia producidos con agregados de río son más eficientes que los producidos con agregados de tajo en tanto adquieren una mayor resistencia a los 28 días con valores similares de contenido de cemento.
8. Los porcentajes de desarrollo de resistencia a edades tempranas son mayores en los concretos producidos con agregados de tajo, mientras que a edades avanzadas el desarrollo es mayor para los producidos con agregados de río.
9. Se propone la utilización de la ecuación $f'c = -83,6 \cdot (a/c) + 77,9$ (si se trabaja en MPa) o $f'c = -853 \cdot (a/c) + 794,0$ (si se trabaja en kg/cm^2) para la aproximación de los valores de resistencia a la compresión según la relación agua/cemento como ajuste al proceso de diseño del ACI 211.1 cuando se utilicen cementos tipo MM/B (P-C)-28.
10. No hay diferencias significativas en los resultados de resistencias a la compresión obtenidas con especímenes de 100 mm x 200 mm y de 150 mm x 300 mm con un 95% de confianza.

11. La razón entre las resistencias a tracción y compresión de un concreto tomadas a una misma edad, no difiere de forma significativa según la edad de falla en que se midan, con un nivel de confianza del 95 %.
12. Se logró determinar que los resultados de resistencia a la tracción de los concretos de mediana resistencia son consistentes con el comportamiento establecido en la ecuación teórica del ACI 363R, pero esta tiende a sobrestimar los valores experimentales con una diferencia promedio de 3,5 %.
13. Los concretos producidos con cemento de uso general presentan resistencias a la tracción más altas si son producidos con agregados de tajo en comparación a los producidos con agregados de río.
14. La razón entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión de un concreto tomados a una misma edad, no difiere de forma significativa según la edad de falla en que se midan, con un nivel de confianza del 95 %.
15. Se comprueba que existe una relación lineal entre el módulo de elasticidad y la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión de los concretos de mediana resistencia para una misma edad de falla.
16. Las ecuaciones teóricas establecidas en el código de diseño ACI 318S-19 para la determinación del módulo de elasticidad del concreto subestiman los valores experimentales obtenidos en esta investigación en un promedio de 25 %.
17. La ecuación propuesta por Aragón (2004) para estimar el módulo de elasticidad del concreto subestima los valores experimentales obtenidos en esta investigación en un promedio de 46 %.
18. Los concretos producidos con cemento de uso general presentan valores de módulo de elasticidad más altos si son producidos con agregados de tajo en comparación a los producidos con agregados de río.

5.2 Recomendaciones

1. Se recomienda mantener un control adecuado del estado de los materiales constituyentes del concreto (cemento hidráulico y agregados), a partir de un adecuado almacenamiento en el que no estén expuestos a cambios constantes de temperatura y humedad, esto se basa en que, como se puede apreciar en los resultados de esta investigación, una pequeña variación no controlada puede afectar significativamente las capacidades mecánicas del concreto y generar pérdidas en recursos por la producción de concretos con eficiencias bajas.
2. En cuanto a la ejecución del programa experimental se recomienda contar con al menos una persona más que pueda colaborar en los procesos de confección de concreto, principalmente porque los ensayos al concreto fresco toman mucho tiempo si son elaborados por una sola persona, tiempo en el que se pierde humedad y se reduce la trabajabilidad del concreto que trae dificultades para el proceso de moldeo.
3. Se recomienda para futuras investigaciones profundizar en el efecto del exceso de agua en las mezclas de concreto para determinar puntualmente las afectaciones que puede tener en las capacidades mecánicas, físicas y estéticas de los concretos.
4. Para futuras investigaciones, realizar una evaluación de concretos de mediana resistencia producidos con distintos tipos de cemento comercializados en el país e implementando el uso de aditivos, con el objetivo de identificar variaciones o mejoras que se puedan obtener en cuanto a eficiencia y capacidades mecánicas.
5. Para la medición del módulo de elasticidad se recomienda la recopilación de datos de esfuerzo deformación continuos para contar con curvas completas que permitan ajustar los resultados en caso de no cumplir con el comportamiento esperado por discrepancias propias del proceso experimental.
6. Se recomienda una evaluación de los impactos económicos que puede brindar la implementación de concretos de mayor resistencia en los diseños estructurales, comparando la utilización de varias resistencias para un mismo diseño y procurando la eficiencia en cuanto al aprovechamiento de la resistencia.

Referencias Bibliográficas

- American Concrete Institute (1992). *Report on High-Strength Concrete* (ACI 214R-11). Michigan. Estados Unidos.
- American Concrete Institute (2009). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete* (ACI 211.1-91). Michigan. Estados Unidos.
- American Concrete Institute (2011). *Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete* (ACI 214R-11). Michigan. Estados Unidos.
- American Concrete Institute (2019). *Requisitos de reglamento para concreto estructural y comentario* (ACI 318S-19). Michigan. Estados Unidos.
- American Society for Testing and Materials (2014). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression* (ASTM C469/C469M-14). Pensilvania. Estados Unidos.
- American Society for Testing and Materials (2017). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens* (ASTM C496/C496M-17). Pensilvania. Estados Unidos.
- Aragón, S. (2004). *Determinación del Módulo de Elasticidad de concretos normales y de alto desempeño en 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.
- Arias, C. (2019). *Determinación de la resistencia a la compresión y módulo de ruptura de concretos elaborados con dos tipos de cemento de uso comercial en Costa Rica bajo distintas condiciones de curado*. 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.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (2014). *Código Sísmico de Costa Rica*. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
- Delgado, J. (2018). *Curvas características de resistencia a compresión simple en concreto usando distintos tipos de cementos modificados*. 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.
- Guerrero, C. & Navas, A. (2012). *Módulo de elasticidad en concretos de alto desempeño*. Revista Ingeniería, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- 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, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Hernández, L. (2018). *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*. 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.

- Instituto de Normas técnicas de Costa Rica. (2013). *INTE C58; Método de ensayo para determinar la densidad masiva (peso unitario) y los vacíos en agregados* (norma idéntica a la ASTM C29). Primera edición. San José, Costa Rica.
- Instituto de Normas técnicas de Costa Rica. (2015). *INTE C59; Determinación de las impurezas en el agregado fino para concreto* (norma idéntica a la ASTM C40). Primera edición. San José, Costa Rica.
- Instituto de Normas técnicas de Costa Rica. (2015). *INTE C62; Norma para reducir muestras de agregados a tamaño de ensayo* (norma idéntica a la ASTM C702). Primera edición. San José, Costa Rica.
- Instituto de Normas técnicas de Costa Rica. (2015). *INTE C67; Práctica para la toma de muestras de agregados* (norma idéntica a la ASTM D75). Tercera edición. San José, Costa Rica.
- Instituto de Normas técnicas de Costa Rica. (2016). *INTE C46; Análisis granulométrico en tamices de agregado fino y grueso*. (norma idéntica a la ASTM C136). Primera edición. San José, Costa Rica.
- Instituto de Normas técnicas de Costa Rica. (2016). *INTE C68; Determinación de la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción del agregado grueso*. (norma idéntica a la ASTM C127). Tercera edición. San José, Costa Rica.
- Instituto de Normas técnicas de Costa Rica. (2016). *INTE C69; Determinación de la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción del agregado fino*. (norma idéntica a la ASTM C128). Tercera edición. San José, Costa Rica.
- Instituto de Normas técnicas de Costa Rica. (2016). *INTE C18; Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayo en laboratorio* (norma idéntica a la ASTM C192). Quinta edición. San José, Costa Rica.
- Instituto de Normas técnicas de Costa Rica. (2017). *INTE C137; Determinación del tiempo de fragua por aguja de VICAT*. (norma idéntica a la ASTM C191). Segunda edición. San José, Costa Rica.
- Instituto de Normas técnicas de Costa Rica. (2017). *INTE C41; Método de ensayo para el asentamiento en el concreto del cemento hidráulico* (norma idéntica a la ASTM C143). Cuarta edición. San José, Costa Rica.
- Instituto de Normas técnicas de Costa Rica. (2017). *INTE C64; Determinación de la resistencia al desgaste de agregados gruesos hasta de 37,5 mm, utilizando la máquina de los Angeles* (norma idéntica a la ASTM C131). Segunda edición. San José, Costa Rica.
- Instituto de Normas técnicas de Costa Rica. (2018). *INTE C17; Muestreo de concreto recién mezclado* (norma idéntica a la ASTM C172). Cuarta edición. San José, Costa Rica.
- Instituto de Normas técnicas de Costa Rica. (2018). *INTE C43; Medición de la temperatura del concreto de cemento hidráulico* (norma idéntica a la ASTM C1064). Cuarta edición. San José, Costa Rica.

- Instituto de Normas técnicas de Costa Rica. (2018). *INTE C147; Cemento hidráulico. Requisitos*. Segunda edición. San José, Costa Rica.
- Instituto de Normas técnicas de Costa Rica. (2018). *INTE C141; Método de ensayo para la determinación de la densidad del cemento hidráulico* (norma idéntica a la ASTM C188). Segunda edición. San José, Costa Rica.
- Instituto de Normas técnicas de Costa Rica. (2018). *INTE C142; Determinación de la finura de un cemento hidráulico por medio de la malla de 45 μm (No. 325)*. (norma idéntica a la ASTM C430). Cuarta edición. San José, Costa Rica.
- Instituto de Normas técnicas de Costa Rica. (2018). *INTE C143; Determinación del flujo de un mortero de cemento hidráulico*. (norma idéntica a la ASTM C1437). Segunda edición. San José, Costa Rica.
- Instituto de Normas técnicas de Costa Rica. (2018). *INTE C144; Práctica para el mezclado mecánico de pastas y morteros de cemento hidráulico de consistencia plástica* (norma idéntica a la ASTM C305). Segunda edición. San José, Costa Rica.
- Instituto de Normas técnicas de Costa Rica. (2018). *INTE C39; Resistencia a la compresión uniaxial de especímenes cilíndricos de concreto*. (norma idéntica a la ASTM C39). Quinta edición. San José, Costa Rica.
- Instituto de Normas técnicas de Costa Rica. (2018). *INTE C139; Método de ensayo para la determinación de la consistencia normal del cemento hidráulico* (norma idéntica a la ASTM C187). Segunda edición. San José, Costa Rica.
- Instituto de Normas técnicas de Costa Rica. (2018). *INTE C57; Resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico. Usando especímenes cúbicos de 50 mm (2 pulgadas)*. (norma idéntica a la ASTM C109). Cuarta edición. San José, Costa Rica.
- Instituto de Normas técnicas de Costa Rica. (2018). *INTE C15; Agregados para concreto. Requisitos* (norma idéntica a la ASTM C33). Segunda edición. San José, Costa Rica.
- Instituto de Normas técnicas de Costa Rica. 2019. *INTE C19; Práctica normalizada para hacer y curar especímenes de concreto para ensayo en el campo* (norma idéntica a la ASTM C31). Quinta edición. San José, Costa Rica.
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarase, W. & Tanesi, J. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Portland Cement Association. Illinois, Estados Unidos.
- Meseguer, L. (1987). *Producción de Concretos de Mediana Resistencia en 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.
- Moya, M. (2007). *Resistencia a la compresión y módulo de ruptura de mezclas de concreto medidas en núcleos y vigas extraídos en campo*. 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.
- Popov, E. & Balan, T. (2000). *Mecánica de Sólidos*. Pearson Educación, México.
- Shetty, M. S., & Jain, A. K. (2019). *Concrete Technology (Theory and Practice)*, 8e. S. Chand Publishing.

6 Anexos

Anexo A. Caracterización de agregados

Anexo A.1. Resultados de gravedad específica y absorción de agregados gruesos según INTE C68

Fuente:	Guápiles	
Inmersión:	5/3/2020	
Final:	6/3/2020	
Masa seca (g):		3359,3
Masa superficie saturada seca (g):		3424,1
Masa sumergida (g):		2152,9

Gbs	2,64
Gbss	2,69
Gb	2,78
Absorción	1,9%

Fuente:	Cerro Minas	
Inmersión:	5/3/2020	
Final:	6/3/2020	
Masa seca (g):		2268,9
Masa superficie saturada seca (g):		2311,3
Masa sumergida (g):		1424,2

Gbs	2,56
Gbss	2,61
Gb	2,69
Absorción	1,9%

Anexo A.2. Resultados de gravedad específica y absorción de agregados finos según INTE C69

Fuente:	Guápiles	
Inmersión:	5/3/2020	
Final:	6/3/2020	
Masa seca (g):		483,7
Masa picnómetro + agua (g):		661,9
Masa picnómetro + muestra + agua (g):		969,4
Masa SSS (g):		500

Gbs	2,51
Gbss	2,60
Gb	2,75
Absorción	3,4%

Fuente:	Cerro Minas	
Inmersión:	5/3/2020	
Final:	6/3/2020	
Masa seca (g):		489,6
Masa picnómetro + agua (g):		660,1
Masa picnómetro + muestra + agua (g):		967,0
Masa SSS (g):		500

Gbs	2,54
Gbss	2,59
Gb	2,68
Absorción	2,1%

Anexo A.3. Resultados de densidad masiva de agregados según INTE C58

Fuente: Guápiles		Fuente: Guápiles	
TMN: 12,5 mm		TMN: 12,5 mm	
Método: Suelto		Método: Varillado	
Datos:			
M_{recip} (g)	4622,0	M_{recip} (g)	4622
V_{recip} (m³)	0,009616	V_{recip} (m³)	0,009616
GBS:	2,64	GBS:	2,64
Repetición			
	1	2	3 Promedio
M_{recip+agr} (g)	19050,1	19080	18940,4 19023,5
Resultados			
γ_b (kg/m³)	1497,7	γ_b (kg/m³)	1552,1
% Vacíos	43,2	% Vacíos	41,1

Fuente: Cerro Minas		Fuente: Cerro Minas	
TMN: 12,5 mm		TMN: 12,5 mm	
Método: Suelto		Método: Varillado	
Datos:			
M_{recip} (g)	4622,0	M_{recip} (g)	4622
V_{recip} (m³)	0,009616	V_{recip} (m³)	0,009616
GBS:	2,56	GBS:	2,56
Repetición			
	1	2	3 Promedio
M_{recip+agr} (g)	19060	18960	19040 19020
Resultados			
γ_b (kg/m³)	1497,3	γ_b (kg/m³)	1538,9
% Vacíos	41,4	% Vacíos	39,8

Anexo A.4. Granulometría de agregados gruesos según INTE C46

Fuente: Guápiles

Masa antes del lavado (g):	5017,8
Masa después del lavado (g):	4936,2
Pérdida por lavado (g):	1,6% CUMPLE

Tamiz		Masa retenida g	Porcentaje retenido	Retenido Acumulado	Porcentaje Pasando	ASTM C33	Cumplimiento
mm	in						
19	3/4	0	0,00	0,00	100,00	100	CUMPLE
12,5	1/2	10,3	0,21	0,21	99,79	90 a 100	CUMPLE
9,5	3/8	982,8	19,88	20,09	79,91	40 a 100	CUMPLE
4,75	Nº4	3813,4	77,15	97,24	2,76	0 a 15	CUMPLE
2,36	Nº8	93,1	1,88	99,13	0,87	0 a 5	CUMPLE
					Porcentaje de pérdida por lavado	1,6%	
TOTAL		4942,7					

Fuente: Cerro Minas

Masa antes del lavado (g):	3593,9
Masa después del lavado (g):	3577,2
Pérdida por lavado (g):	0,5% CUMPLE

Tamiz		Masa retenida g	Porcentaje retenido	Retenido Acumulado	Porcentaje Pasando	Req. Norma	Cumplimiento
mm	in						
19	3/4	0	0,00	0,00	100,00	100	CUMPLE
12,5	1/2	336,1	9,38	9,38	90,62	90 a 100	CUMPLE
9,5	3/8	745,9	20,83	30,21	69,79	40 a 100	CUMPLE
4,75	Nº4	1626,5	45,41	75,62	24,38	0 a 15	NO CUMPLE
2,36	Nº8	754,6	21,07	96,69	3,31	0 a 5	CUMPLE
					Porcentaje de pérdida por lavado	0,5%	
TOTAL		3581,7					

Anexo A.5. Granulometría de agregados finos según INTE C46

Fuente: Guápiles

Masa antes del lavado (g):	1732,9
Masa después del lavado (g):	1694,4
Pérdida por lavado (g):	2,2% CUMPLE

Tamiz	Masa retenida (g)	Porcentaje retenido	Retenido Acumulado	Porcentaje Pasando	Req. Norma	Cumplimiento
9,5 mm	0	0,00	0,00	100,00	100	CUMPLE
4,75 mm (N°4)	25,7	1,51	1,51	98,49	95 a 100	CUMPLE
2,36 mm (N°8)	325,4	19,16	20,68	79,32	80 a 100	NO CUMPLE
1,18 mm (N°16)	422,9	24,91	45,59	54,41	50 a 85	CUMPLE
600 µm (N°30)	417,7	24,60	70,19	29,81	25 a 60	CUMPLE
300 µm (N°50)	280,6	16,53	86,71	13,29	5 a 30	CUMPLE
150 µm (N°100)	157,4	9,27	95,98	4,02	0 a 10	CUMPLE
75 µm (N°200)	58,7	3,46	99,44	0,56	0 a 3	CUMPLE
Porcentaje de pérdida por lavado				2,2%		
				MF	3,21	
TOTAL	1697,9					

Fuente: Cerro Minas

Masa antes del lavado (g):	1740,9
Masa después del lavado (g):	1700,7
Pérdida por lavado (g):	2,3% CUMPLE

Tamiz	Masa retenida g	Porcentaje retenido	Retenido Acumulado	Porcentaje Pasando	Req. Norma	Cumplimiento
9,5 mm	0	0,00	0,00	100,00	100	CUMPLE
4,75 mm (N°4)	2,6	0,15	0,15	99,85	95 a 100	CUMPLE
2,36 mm (N°8)	513,14	30,13	30,29	69,71	80 a 100	NO CUMPLE
1,18 mm (N°16)	515,2	30,25	60,54	39,46	50 a 85	NO CUMPLE
600 µm (N°30)	279,3	16,40	76,94	23,06	25 a 60	NO CUMPLE
300 µm (N°50)	160,6	9,43	86,37	13,63	5 a 30	CUMPLE
150 µm (N°100)	120,4	7,07	93,44	6,56	0 a 10	CUMPLE
75 µm (N°200)	90,8	5,33	98,77	1,23	0 a 3	CUMPLE
Porcentaje de pérdida por lavado				2,3%		
				MF	3,48	
TOTAL	1702,94					

Anexo B. Caracterización del cemento

Anexo B.1. Densidad del cemento hidráulico según INTE C141

Tipo de cemento: MM/B-(P-C)-28	
Productor: CEMEX	
Masa de cemento (g):	64,0
Volumen inicial (mL):	0,8
Volumen final (mL):	22,0
Densidad (g/cm³):	3,02

Anexo B.2. Consistencia normal del cemento hidráulico según INTE C139

Masa de cemento (g):	650,00
-----------------------------	--------

Número	Masa agua (g)	Porcentaje	Penetración (mm)	Cumplimiento
1	165,7	25,5%	6	No cumple
2	171,3	26,4%	9	Cumple

Anexo B.3. Tiempo de fragua por Aguja de Vicat según INTE C137

Masa de cemento (g):	650,00
Agua de consistencia normal (g):	171,3
Porcentaje de agua	26,4%

Observación	Horas	Minutos	Total	Penetración (mm)
1	1	29	89	40,5
2	2	12	132	35,0
3	2	48	168	1,0
4	3	4	184	0,5
5	3	18	198	0,1

FINAL	4	24	264	0
--------------	----------	-----------	------------	----------

Agua de consistencia normal (%)	Tiempo de fragua inicial (min)	Tiempo de fragua final (min)
26,4%	143	264

Anexo B.4. Flujo de mortero de cemento hidráulico según INTE C143

Masa de cemento (g):	500
Masa de arena (g):	1375

Repetición	Agua (g)	Porcentaje	Flujo				Total
			1	2	3	4	
1	221,8	44%	28	27,8	27,9	27,9	111,6

Agua (%)	Flujo
44%	111,6

Anexo B.5. Resistencia a la compresión de cubos de mortero según INTE C57

Espécimen	Edad	Moldeo	Falla	Área (mm ²)	Carga (N)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)
1	7	22/4/2020	29/4/2020	2500	43000	17,2	16,0
2		22/4/2020	29/4/2020	2500	46000	18,4	
3		22/4/2020	29/4/2020	2500	31000	12,4	
4	28	22/4/2020	20/5/2020	2500	59000	23,6	25,1
5		22/4/2020	20/5/2020	2500	63000	25,2	
6		22/4/2020	20/5/2020	2500	66000	26,4	

Anexo C. Diseños de mezcla

Anexo C.1. Detalle de diseño de concreto tipo G210

DATOS GENERALES								
AGREGADOS					Peso unitario total			
					Suelto	Varillado		
Material	M.F	% W dos	% D	Gbs	kg/m³	kg/m³		
Arena	3,21	6,5%	3,4%	2,51	1549,8	-		
Piedra	-	1,1%	1,9%	2,64	1497,7	1552,1		
Tamaño Máximo nominal*			12,7					
CEMENTO								
Tipo	UG							
Densidad (kg/m³)	3019,09							
Gs	3,02							
Ps saco (kg)	50							
V saco (m³)	0,0166							
REQUERIMIENTOS Y DATOS								
Asentamiento	100 ± 25	mm	Tabla A1.5.3.1 de ACI 211					
Contenido de agua	220	kg/m ³	Tabla A1.5.3.3 de ACI 211					
Aire incluido	No	-	-					
Contenido de aire	2,5%	-	Tabla A1.5.3.3 de ACI 211					
f' c especificada (Mpa)	210	kg/cm ²	No se utiliza factor de seguridad					
Volumen masivo de agregado grueso	0,509	m ³ _{ag} /m ³ _{cn}	Tabla A1.5.3.6 de ACI 211					
Relación a/c	0,68	-						
Vb de arena	0,350	m ³						
RESULTADOS								
Ajuste de agua								
Material	Ps (kg)	%ow	%oD	%owlibre	Pw (kg)			
Arena	878,2	6,5%	3,4%	3,1%	27,5			
Piedra	790,0	1,1%	1,9%	-0,8%	-6,5			
				Σ	20,94			
Vw diseño (lt)	220							
Vw dosf (lt)	199,1							
Piedra		Arena						
Ps (kg)	790,0	Ps (kg)	878,2					
γb (kg/m³)	1497,7	γb (kg/m³)	1549,8					
Vm (m³)	0,5	Vm (m³)	0,6					
Pt (kg)	798,7	Vm' (m³)	0,7					
		Pt (kg)	935,3					
Cemento								
Ps(kg)	321,6							
# Sacos	6,4							
Vc (m³)	0,1							
Proporción volumétrica 1 6,58 4,95 Proporción por peso total 1 2,91 2,48 Proporción por peso seco 1 2,73 2,46								
Dosificación para batida de: <table border="1"> <tr> <td>0,0551 m³</td> </tr> <tr> <td>m³ kg</td> </tr> </table> Piedra 0,02908 44,04 Arena 0,03863 51,57 Cemento 0,00587 17,73 Agua 0,01098 10,98							0,0551 m ³	m ³ kg
0,0551 m ³								
m ³ kg								

Anexo C.2. Detalle de diseño de concreto tipo G280

DATOS GENERALES						
AGREGADOS					Peso unitario total	
					Suelto	Varillado
Material	M.F	% W dos	% D	Gbs	kg/m³	kg/m³
Arena	3,21	6,5%	3,4%	2,51	1549,8	-
Piedra	-	1,1%	1,9%	2,64	1497,7	1552,1
Tamaño Máximo nominal*				12,7		
CEMENTO						
Tipo	UG					
Densidad (kg/m³)	3019,09					
Gs	3,02					
Ps saco (kg)	50					
V saco (m³)	0,0166					
REQUERIMIENTOS Y DATOS						
Asentamiento	100 ± 25		mm	Tabla A1.5.3.1 de ACI 211		
Contenido de agua	220		kg/m ³	Tabla A1.5.3.3 de ACI 211		
Aire incluido	No		-	-		
Contenido de aire	2,5%		-	Tabla A1.5.3.3 de ACI 211		
f'c especificada (Mpa)	280		kg/cm ²	No se utiliza factor de seguridad		
Volumen masivo de agregado grueso	0,509		m ³ _{ag} /m ³ _{cn}	Tabla A1.5.3.6 de ACI 211		
Relación a/c	0,58		-			
Vb de arena	0,330		m ³			
RESULTADOS						
Ajuste de agua						
Material	Ps (kg)	%ow	%D	%owlibre	Pw (kg)	
Arena	829,2	6,5%	3,4%	3,1%	26,0	
Piedra	790,0	1,1%	1,9%	-0,8%	-6,5	
				Σ	19,40	
V_w diseño (lt)	220					
V_w dosf (lt)	200,595181					
Piedra		Arena				
Ps (kg)	790,0	Ps (kg)	829,2			
γ_b (kg/m³)	1497,7	γ_b (kg/m³)	1549,8			
V_m (m³)	0,53	V_m (m³)	0,54			
Pt (kg)	798,7	V_{m'} (m³)	0,66			
Cemento		Pt (kg)	883,0			
Ps(kg)	380,6					
# Sacos	7,6					
Vc (m³)	0,126					
Proporción volumétrica						
1	5,25	4,18				
Proporción por peso total						
1	2,32	2,10				
Proporción por peso seco						
1	2,18	2,08				
Dosificación para batida de:						
0,0551 m ³						
m ³ kg						
Piedra	0,02908	44,04				
Arena	0,03647	48,69				
Cement	0,00695	20,99				
Agua	0,01106	11,06				

Anexo C.3. Detalle de diseño de concreto tipo G350

DATOS GENERALES						
AGREGADOS					Peso unitario total	
					Suelto	Varillado
Material	M.F	% W dos	% D	Gbs	kg/m³	kg/m³
Arena	3,21	7,5%	3,4%	2,51	1549,8	-
Piedra	-	0,9%	1,9%	2,64	1497,7	1552,1
Tamaño Máximo nominal*			12,7			
CEMENTO						
Tipo	UG					
Densidad (kg/m³)	3019,09					
Gs	3,02					
Ps saco (kg)	50					
V saco (m³)	0,0166					
REQUERIMIENTOS Y DATOS						
Asentamiento	100 ± 25 mm		Tabla A1.5.3.1 de ACI 211			
Contenido de agua	225 kg/m ³		Tabla A1.5.3.3 de ACI 211			
Aire incluido	No -		-			
Contenido de aire	2,5%		Tabla A1.5.3.3 de ACI 211			
f'c especificada (Mpa)	350 kg/cm ²		No se utiliza factor de seguridad			
Volumen masivo de agregado grueso	0,509 m ³ _{ag} /m ³ _{cn}		Tabla A1.5.3.6 de ACI 211			
Relación a/c	0,55 -		Ajustada según resultados experimentales			
Vb de arena	0,316 m ³					
RESULTADOS						
Ajuste de agua						
Material	Ps (kg)	%ow	%D	%owlibre	Pw (kg)	
Arena	792,9	7,5%	3,4%	4,1%	32,7	
Piedra	790,0	0,9%	1,9%	-1,0%	-8,1	
				Σ	24,62	
Vw diseño (lt)	225,0					
Vw dosf (lt)	200,4					
Piedra		Arena				
Ps (kg)	790,0	Ps (kg)	792,9			
γb (kg/m³)	1497,7	γb (kg/m³)	1549,8			
Vm (m³)	0,53	Vm (m³)	0,51			
Pt (kg)	797,1	Vm' (m3)	0,66			
		Pt (kg)	852,4			
Cemento						
Ps(kg)	409,1					
# Sacos	8,2					
Vc (m3)	0,136					
Proporción volumétrica						
1		4,84	3,89			
Proporción por peso total						
1		2,08	1,95			
Proporción por peso seco						
1		1,94	1,93			
Dosificación para batida de:						
0,0551 m ³						
m ³ kg						
Piedra	0,02908 43,95					
Arena	0,03614 47,00					
Cemento	0,00747 22,56					
Agua	0,01105 11,05					

Anexo C.4. Detalle de diseño de concreto tipo G420

DATOS GENERALES						
AGREGADOS					Peso unitario total	
					Suelto	Varillado
Material	M.F	% W dos	% D	Gbs	kg/m³	kg/m³
Arena	3,21	8,0%	3,4%	2,51	1549,8	-
Piedra	-	0,9%	1,9%	2,64	1497,7	1552,1
Tamaño Máximo nominal*			12,7			
CEMENTO						
Tipo	UG					
Densidad (kg/m³)	3019,09					
Gs	3,02					
Ps saco (kg)	50					
V saco (m³)	0,0166					
REQUERIMIENTOS Y DATOS						
Asentamiento	100 ± 25		mm	Tabla A1.5.3.1 de ACI 211		
Contenido de agua	230		kg/m ³	Tabla A1.5.3.3 de ACI 211		
Aire incluido	No		-	-		
Contenido de aire	2,5%		-	Tabla A1.5.3.3 de ACI 211		
f'c especificada (Mpa)	420		kg/cm ²	No se utiliza factor de seguridad		
Volumen masivo de agregado grueso	0,509		m ³ _{ag} /m ³ _{cn}	Tabla A1.5.3.6 de ACI 211		
Relación a/c	0,48		-	Ajustada según resultados experimentales		
Vb de arena	0,287		m ³			
RESULTADOS						
Ajuste de agua						
Material	Ps (kg)	%ow	%D	%owlibre	Pw (kg)	
Arena	722,0	8,0%	3,4%	4,6%	33,3	
Piedra	790,0	0,9%	1,9%	-1,1%	-8,4	
				Σ	24,87	
Vw diseño (lt)	230					
Vw dosf (lt)	205,126456					
Piedra		Arena				
Ps (kg)	790,0	Ps (kg)	722,0			
γb (kg/m³)	1497,7	γb (kg/m³)	1549,8			
Vm (m³)	0,53	Vm (m³)	0,47			
Pt (kg)	796,8	Vm' (m3)	0,60			
		Pt (kg)	779,6			
Cemento						
Ps(kg)	479,2					
# Sacos	9,6					
Vc (m3)	0,2					
Proporción volumétrica						
1	3,78	3,32				
Proporción por peso total						
1	1,63	1,66				
Proporción por peso seco						
1	1,51	1,65				
Dosificación para batida de:						
0,0561 m ³						
m ³ kg						
Piedra	0,02957	44,67				
Arena	0,03359	43,70				
Cemento	0,00890	26,86				
Agua	0,01150	11,50				

Anexo C.5. Detalle de diseño de concreto tipo CM210 Mezcla 1

DATOS GENERALES																																
AGREGADOS					Peso unitario total		CEMENTO																									
					Suelto	Varillado																										
Material	M.F	% W dos	% D	Gbs	kg/m³	kg/m³	Tipo	UG																								
Arena	3,48	1,1%	2,1%	2,54	1515,3	-	Densidad (kg/m³)	3019,09																								
Piedra	-	0,7%	1,9%	2,56	1497,3	1538,9	Gs	3,02																								
Tamaño Máximo nominal*				12,7																												
REQUERIMIENTOS Y DATOS																																
Asentamiento	100 ± 25	mm	Tabla A1.5.3.1 de ACI 211																													
Contenido de agua	215	kg/m ³	Tabla A1.5.3.3 de ACI 211																													
Aire incluido	No	-	-																													
Contenido de aire	2,5%	-	Tabla A1.5.3.3 de ACI 211																													
f'c especificada (Mpa)	210	kg/cm ²	No se utiliza factor de seguridad																													
Volumen masivo de agregado grueso	0,509	m ³ _{ag} /m ³ _{cn}	Tabla A1.5.3.6 de ACI 211																													
Relación a/c	0,68	-																														
Vb de arena	0,366	m ³																														
RESULTADOS																																
Ajuste de agua																																
Material	Ps (kg)	%ow	%D	%ow_{fibre}	P_w (kg)																											
Arena	927,7	1,1%	2,1%	-1,0%	-9,7																											
Piedra	741,7	0,7%	1,9%	-1,2%	-8,9																											
				Σ	-18,56																											
V_w diseño (lt)	215																															
V_w dosf (lt)	233,556374																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Piedra</th> <th colspan="2">Arena</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Ps (kg)</td> <td>741,7</td> <td>Ps (kg)</td> <td>927,7</td> </tr> <tr> <td>γ_b (kg/m³)</td> <td>1497,3</td> <td>γ_b (kg/m³)</td> <td>1515,3</td> </tr> <tr> <td>V_m (m³)</td> <td>0,50</td> <td>V_m (m³)</td> <td>0,61</td> </tr> <tr> <td>Pt (kg)</td> <td>746,7</td> <td>V_m' (m³)</td> <td>0,61</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>Pt (kg)</td> <td>937,7</td> </tr> </tbody> </table>									Piedra		Arena		Ps (kg)	741,7	Ps (kg)	927,7	γ_b (kg/m³)	1497,3	γ_b (kg/m³)	1515,3	V_m (m³)	0,50	V_m (m³)	0,61	Pt (kg)	746,7	V_m' (m³)	0,61			Pt (kg)	937,7
Piedra		Arena																														
Ps (kg)	741,7	Ps (kg)	927,7																													
γ_b (kg/m³)	1497,3	γ_b (kg/m³)	1515,3																													
V_m (m³)	0,50	V_m (m³)	0,61																													
Pt (kg)	746,7	V_m' (m³)	0,61																													
		Pt (kg)	937,7																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Cemento</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Ps(kg)</td> <td>314,3</td> </tr> <tr> <td># Sacos</td> <td>6,3</td> </tr> <tr> <td>Vc (m³)</td> <td>0,104</td> </tr> </tbody> </table>									Cemento		Ps(kg)	314,3	# Sacos	6,3	Vc (m³)	0,104																
Cemento																																
Ps(kg)	314,3																															
# Sacos	6,3																															
Vc (m³)	0,104																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Proporción volumétrica</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>5,88</td> <td>4,76</td> </tr> <tr> <th colspan="3">Proporción por peso total</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>2,98</td> <td>2,38</td> </tr> <tr> <th colspan="3">Proporción por peso seco</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>2,95</td> <td>2,36</td> </tr> </tbody> </table>									Proporción volumétrica			1	5,88	4,76	Proporción por peso total			1	2,98	2,38	Proporción por peso seco			1	2,95	2,36						
Proporción volumétrica																																
1	5,88	4,76																														
Proporción por peso total																																
1	2,98	2,38																														
Proporción por peso seco																																
1	2,95	2,36																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Dosificación para batida de:</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>0,0505 m³</td> </tr> <tr> <td></td> <td>m³ kg</td> </tr> <tr> <td>Piedra</td> <td>0,02504 37,74</td> </tr> <tr> <td>Arena</td> <td>0,03094 47,39</td> </tr> <tr> <td>Cemento</td> <td>0,00526 15,89</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td>0,01180 11,80</td> </tr> </tbody> </table>									Dosificación para batida de:			0,0505 m ³		m ³ kg	Piedra	0,02504 37,74	Arena	0,03094 47,39	Cemento	0,00526 15,89	Agua	0,01180 11,80										
Dosificación para batida de:																																
	0,0505 m ³																															
	m ³ kg																															
Piedra	0,02504 37,74																															
Arena	0,03094 47,39																															
Cemento	0,00526 15,89																															
Agua	0,01180 11,80																															

Anexo C.6. Detalle de diseño de concreto tipo CM210 Mezcla 2

DATOS GENERALES						
AGREGADOS					Peso unitario total	
					Suelto	Varillado
Material	M.F	% W dos	% D	Gbs	kg/m³	kg/m³
Arena	3,48	1,1%	2,1%	2,54	1515,3	-
Piedra	-	0,7%	1,9%	2,56	1497,3	1538,9
Tamaño Máximo nominal*			12,7			
CEMENTO						
Tipo	UG					
Densidad (kg/m³)	3019,09					
Gs	3,02					
Ps saco (kg)	50					
V saco (m³)	0,0166					
REQUERIMIENTOS Y DATOS						
Asentamiento	100 ± 25		mm	Tabla A1.5.3.1 de ACI 211		
Contenido de agua	225		kg/m ³	Tabla A1.5.3.3 de ACI 211		
Aire incluido	No		-	-		
Contenido de aire	2,5%		-	Tabla A1.5.3.3 de ACI 211		
f' c especificada (Mpa)	210		kg/cm ²	No se utiliza factor de seguridad		
Volumen masivo de agregado grueso	0,509		m ³ _{ag} /m ³ _{cn}	Tabla A1.5.3.6 de ACI 211		
Relación a/c	0,68		-			
Vb de arena	0,351		m ³			
RESULTADOS						
Ajuste de agua						
Material	Ps (kg)	%w	%D	%wlibre	P_w (kg)	
Arena	890,0	1,1%	2,1%	-1,0%	-9,3	
Piedra	741,7	0,7%	1,9%	-1,2%	-8,9	
				Σ	-18,16	
V_w diseño (lt)	225					
V_w dosif (lt)	243,16357					
Piedra			Arena			
Ps (kg)	741,7		Ps (kg)	890,0		
γ_b (kg/m³)	1497,3		γ_b (kg/m³)	1515,3		
V_m (m³)	0,50		V_m (m³)	0,59		
Pt (kg)	746,7		V_m' (m³)	0,59		
			Pt (kg)	899,7		
Cemento						
Ps(kg)	328,9					
# Sacos	6,6					
Vc (m³)	0,109					
Proporción volumétrica						
1	5,39	4,55				
Proporción por peso total						
1	2,73	2,27				
Proporción por peso seco						
1	2,71	2,25				
Dosificación para batida de:						
0,0551 m ³						
m ³ kg						
Piedra	0,02731	41,17				
Arena	0,03238	49,60				
Cemento	0,00601	18,14				
Agua	0,01341	13,41				

Anexo C.7. Detalle de diseño de concreto tipo CM280 Mezcla 1

DATOS GENERALES								
AGREGADOS					Peso unitario total		CEMENTO	
					<i>Suelto</i>	<i>Varillado</i>		
Material	M.F	% W dos	% D	Gbs	kg/m³	kg/m³		
Arena	3,48	1,1%	2,1%	2,54	1515,3	-		
Piedra	-	0,7%	1,9%	2,56	1497,3	1538,9		
Tamaño Máximo nominal*		12,7						
								Tipo
								UG
								Densidad (kg/m³)
								3019,09
							Gs	
							3,02	
							Ps saco (kg)	
							50	
							V saco (m³)	
							0,0166	
REQUERIMIENTOS Y DATOS								
Asentamiento	100 ± 25		mm	Tabla A1.5.3.1 de ACI 211				
Contenido de agua	225		kg/m ³	Tabla A1.5.3.3 de ACI 211				
Aire incluido	No		-	-				
Contenido de aire	2,5%		-	Tabla A1.5.3.3 de ACI 211				
f'c especificada (Mpa)	280		kg/cm ²	No se utiliza factor de seguridad				
Volumen masivo de agregado grueso	0,509		m ³ _{ag} /m ³ _{cn}	Tabla A1.5.3.6 de ACI 211				
Relación a/c	0,60		-	Ajustada según resultados experimentales				
Vb de arena	0,331		m ³					
RESULTADOS								
Ajuste de agua								
Material	Ps (kg)	%ow	%D	%owlibre	P_w (kg)			
Arena	839,4	1,1%	2,1%	-1,0%	-8,6			
Piedra	741,7	0,7%	1,9%	-1,2%	-8,7			
				Σ	-17,27			
V_w diseño (lt)	225							
V_w dosf (lt)	242,26589							
Piedra		Arena						
Ps (kg)	741,7	Ps (kg)	839,4					
γ_b (kg/m³)	1497,3	γ_b (kg/m³)	1515,3					
V_m (m³)	0,50	V_m (m³)	0,55					
Pt (kg)	746,9	V_{m'} (m³)	0,55					
		Pt (kg)	848,6					
Cemento								
Ps(kg)	389,3							
# Sacos	7,8							
Vc (m³)	0,129							
Proporción volumétrica								
1		4,30	3,84					
Proporción por peso total								
1		2,18	1,92					
Proporción por peso seco								
1		2,16	1,91					
Dosificación para batida de:								
0,0551 m ³								
m ³ kg								
Piedra	0,02731	41,18						
Arena	0,03054	46,79						
Cemento	0,00711	21,46						
Agua	0,01336	13,36						

Anexo C.8. Detalle de diseño de concreto tipo CM280 Mezcla 2

DATOS GENERALES						
AGREGADOS					Peso unitario total	
					Suelto	Varillado
Material	M.F	% W dos	% D	Gbs	kg/m³	kg/m³
Arena	3,48	1,1%	2,1%	2,54	1515,3	-
Piedra	-	0,7%	1,9%	2,56	1497,3	1538,9
Tamaño Máximo nominal*				12,7		
CEMENTO						
Tipo	UG					
Densidad (kg/m³)	3019,09					
Gs	3,02					
Ps saco (kg)	50					
V saco (m³)	0,0166					
REQUERIMIENTOS Y DATOS						
Asentamiento	100 ± 25	mm	Tabla A1.5.3.1 de ACI 211			
Contenido de agua	222,5	kg/m ³	Tabla A1.5.3.3 de ACI 211			
Aire incluido	No	-	-			
Contenido de aire	2,5%	-	Tabla A1.5.3.3 de ACI 211			
f'c especificada (Mpa)	280	kg/cm ²	No se utiliza factor de seguridad			
Volumen masivo de agregado grueso	0,509	m ³ _{ag} /m ³ _{cn}	Tabla A1.5.3.6 de ACI 211			
Relación a/c	0,60	-	Ajustada según resultados experimentales			
Vb de arena	0,335	m ³				
RESULTADOS						
Ajuste de agua						
Material	Ps (kg)	%ow	%D	%ow_{fibre}	P_w (kg)	
Arena	849,3	1,1%	2,1%	-1,0%	-8,7	
Piedra	741,7	0,7%	1,9%	-1,2%	-8,7	
				Σ	-17,37	
V_w diseño (lt)	222,5					
V_w dosf (lt)	239,868012					
Piedra		Arena				
Ps (kg)	741,7	Ps (kg)	849,3			
γ_b (kg/m³)	1497,3	γ_b (kg/m³)	1515,3			
V_m (m³)	0,50	V_m (m³)	0,56			
Pt (kg)	746,9	V_m' (m³)	0,56			
		Pt (kg)	858,7			
Cemento						
Ps (kg)	384,9					
# Sacos	7,7					
Vc (m³)	0,128					
Proporción volumétrica						
1	4,40	3,89				
Proporción por peso total						
1	2,23	1,94				
Proporción por peso seco						
1	2,21	1,93				
Dosificación para batida de:						
0,0551 m ³						
m ³ kg						
Piedra	0,02731	41,18				
Arena	0,03090	47,34				
Cemento	0,00703	21,22				
Agua	0,01323	13,23				

Anexo C.9. Detalle de diseño de concreto tipo CM350 Mezcla 1

DATOS GENERALES																		
AGREGADOS					Peso unitario total													
					<i>Suelto</i>	<i>Varillado</i>												
Material	M.F	% W dos	% D	Gbs	kg/m³	kg/m³												
Arena	3,48	1,1%	2,1%	2,54	1515,3	-												
Piedra	-	0,7%	1,9%	2,56	1497,3	1538,9												
Tamaño Máximo nominal*			12,7															
CEMENTO																		
Tipo	UG																	
Densidad (kg/m³)	3019,09																	
Gs	3,02																	
Ps saco (kg)	50																	
V saco (m³)	0,0166																	
REQUERIMIENTOS Y DATOS																		
Asentamiento	100 ± 25 mm		Tabla A1.5.3.1 de ACI 211															
Contenido de agua	220 kg/m ³		Tabla A1.5.3.3 de ACI 211															
Aire incluido	No -		-															
Contenido de aire	2,5% -		Tabla A1.5.3.3 de ACI 211															
f'c especificada (Mpa)	350 kg/cm ²		No se utiliza factor de seguridad															
Volumen masivo de agregado grueso	0,509 m ³ _{ag} /m ³ _{cn}		Tabla A1.5.3.6 de ACI 211															
Relación a/c	0,55 -		Ajustada según resultados experimentales															
Vb de arena	0,333 m ³																	
RESULTADOS																		
Ajuste de agua																		
Material	Ps (kg)	%ow	%D	%ow_{libre}	P_w (kg)													
Arena	843,0	1,1%	2,1%	-1,0%	-8,6													
Piedra	741,7	0,7%	1,9%	-1,2%	-8,7													
				Σ	-17,30													
V_w diseño (lt)	220																	
V_w dosf (lt)	237,303467																	
Piedra		Arena																
Ps (kg)	741,7	Ps (kg)	843,0															
γ_b (kg/m³)	1497,3	γ_b (kg/m³)	1515,3															
V_m (m³)	0,50	V_m (m³)	0,56															
Pt (kg)	746,9	V_m' (m³)	0,56															
		Pt (kg)	852,3															
Cemento																		
Ps(kg)	400,0																	
# Sacos	8,0																	
Vc (m³)	0,132																	
<p><i>Proporción volumétrica</i></p> <p>1 4,20 3,74</p> <p><i>Proporción por peso total</i></p> <p>1 2,13 1,87</p> <p><i>Proporción por peso seco</i></p> <p>1 2,11 1,85</p>																		
<p>Dosificación para batida de:</p> <table border="1"> <tr> <td colspan="2">0,0551 m³</td> </tr> <tr> <td>m³</td> <td>kg</td> </tr> <tr> <td>Piedra</td> <td>0,02731 41,18</td> </tr> <tr> <td>Arena</td> <td>0,03067 46,99</td> </tr> <tr> <td>Cement</td> <td>0,00730 22,05</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td>0,01308 13,08</td> </tr> </table>							0,0551 m ³		m ³	kg	Piedra	0,02731 41,18	Arena	0,03067 46,99	Cement	0,00730 22,05	Agua	0,01308 13,08
0,0551 m ³																		
m ³	kg																	
Piedra	0,02731 41,18																	
Arena	0,03067 46,99																	
Cement	0,00730 22,05																	
Agua	0,01308 13,08																	

Anexo C.10. Detalle de diseño de concreto tipo CM350 Mezcla 2

DATOS GENERALES									
AGREGADOS					Peso unitario total		CEMENTO		
					Suelto	Varillado			
Material	M.F	% W dos	% D	Gbs	kg/m³	kg/m³	Tipo	UG	
Arena	3,48	1,8%	2,1%	2,54	1515,3	-	Densidad (kg/m³)	3019,09	
Piedra	-	1,0%	1,9%	2,56	1497,3	1538,9	Gs	3,02	
Tamaño Máximo nominal*				12,7					
REQUERIMIENTOS Y DATOS									
Asentamiento	100 ± 25		mm	Tabla A1.5.3.1 de ACI 211					
Contenido de agua	225		kg/m ³	Tabla A1.5.3.3 de ACI 211					
Aire incluido	No		-	-					
Contenido de aire	2,5%		-	Tabla A1.5.3.3 de ACI 211					
f'c especificada (Mpa)	350		kg/cm ²	No se utiliza factor de seguridad					
Volumen masivo de agregado grueso	0,509		m ³ _{ag} /m ³ _{cn}	Tabla A1.5.3.6 de ACI 211					
Relación a/c	0,55		-	Ajustada según resultados experimentales					
Vb de arena	0,324		m ³						
RESULTADOS									
Ajuste de agua						Proporción volumétrica			
Material	Ps (kg)	%ow	%D	%ow_{fibre}	P_w (kg)				
Arena	822,7	1,8%	2,1%	-0,3%	-2,7	1 4,01 3,66			
Piedra	741,7	1,0%	1,9%	-0,9%	-6,4	Proporción por peso total			
					Σ	-9,11	1 2,05 1,83		
V_w diseño (lt)	225								
V_w dosf (lt)	234,1								
Piedra						Dosificación para batida de:			
Ps (kg)	741,7	Arena		Ps (kg)	822,7	0,0551 m³			
γ_b (kg/m³)	1497,3	γ_b (kg/m³)	1515,3	V_m (m³)	0,54	m³ kg			
V_m (m³)	0,50	V_m (m³)	0,54	V_m' (m³)	0,54	Piedra 0,02731 41,31			
Pt (kg)	749,2	Pt (kg)	837,5	Arena 0,02994 46,18					
Cemento						Cemento 0,00747 22,56			
Ps(kg)	409,1								
# Sacos	8,2								
Vc (m³)	0,136								
						Agua 0,01291 12,91			

Anexo C.11. Detalle de diseño de concreto tipo CM420

DATOS GENERALES																																										
AGREGADOS <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Material</th> <th rowspan="2">M.F</th> <th rowspan="2">% W dos</th> <th rowspan="2">% D</th> <th rowspan="2">Gbs</th> <th colspan="2">Peso unitario total</th> </tr> <tr> <th>Suelto</th> <th>Varillado</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Arena</td> <td>3,48</td> <td>1,8%</td> <td>2,1%</td> <td>2,54</td> <td>1515,3</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Piedra</td> <td>-</td> <td>0,7%</td> <td>1,9%</td> <td>2,56</td> <td>1497,3</td> <td>1538,9</td> </tr> </tbody> </table>					Material	M.F	% W dos	% D	Gbs	Peso unitario total		Suelto	Varillado	Arena	3,48	1,8%	2,1%	2,54	1515,3	-	Piedra	-	0,7%	1,9%	2,56	1497,3	1538,9	CEMENTO <table border="1"> <thead> <tr> <th>Tipo</th> <th>UG</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Densidad (kg/m³)</td> <td>3019,09</td> </tr> <tr> <td>Gs</td> <td>3,02</td> </tr> <tr> <td>Ps saco (kg)</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>V saco (m³)</td> <td>0,0166</td> </tr> </tbody> </table>					Tipo	UG	Densidad (kg/m ³)	3019,09	Gs	3,02	Ps saco (kg)	50	V saco (m ³)	0,0166
										Material	M.F	% W dos	% D	Gbs	Peso unitario total																											
Suelto	Varillado																																									
Arena	3,48	1,8%	2,1%	2,54	1515,3	-																																				
Piedra	-	0,7%	1,9%	2,56	1497,3	1538,9																																				
Tipo	UG																																									
Densidad (kg/m ³)	3019,09																																									
Gs	3,02																																									
Ps saco (kg)	50																																									
V saco (m ³)	0,0166																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tamaño Máximo nominal*</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>12,7</td> </tr> </tbody> </table>					Tamaño Máximo nominal*			12,7																																		
Tamaño Máximo nominal*																																										
	12,7																																									
REQUERIMIENTOS Y DATOS																																										
Asentamiento		100 ± 25 mm		Tabla A1.5.3.1 de ACI 211																																						
Contenido de agua		240 kg/m ³		Tabla A1.5.3.3 de ACI 211																																						
Aire incluido		No -		-																																						
Contenido de aire		2,5% -		Tabla A1.5.3.3 de ACI 211																																						
f'c especificada (Mpa)		420 kg/cm ²		No se utiliza factor de seguridad																																						
Volumen masivo de agregado grueso		0,509 m ³ _{ag} /m ³ _{cn}		Tabla A1.5.3.6 de ACI 211																																						
Relación a/c		0,48 -		Ajustada según resultados experimentales																																						
Vb de arena		0,279 m ³																																								
RESULTADOS																																										
Ajuste de agua																																										
Material	Ps (kg)	%ow	%D	%owlibre	Pw (kg)																																					
Arena	708,4	1,8%	2,1%	-0,3%	-2,3																																					
Piedra	741,7	0,7%	1,9%	-1,2%	-8,7																																					
				Σ	-10,97																																					
Vw diseño (lt)	240																																									
Vw dosf (lt)	251,0																																									
Piedra		Arena																																								
Ps (kg)	741,7	Ps (kg)	708,4																																							
γb (kg/m ³)	1497,3	γb (kg/m ³)	1515,3																																							
Vm (m ³)	0,50	Vm (m ³)	0,47																																							
Pt (kg)	746,9	Vm' (m ³)	0,47																																							
Cemento		Pt (kg)	721,1																																							
Ps(kg)	500,0																																									
# Sacos	10,0																																									
Vc (m ³)	0,166																																									
					Proporción volumétrica 1 2,82 2,99 Proporción por peso total 1 1,44 1,49 Proporción por peso seco 1 1,42 1,48																																					
					Dosificación para batida de: 0,0574 m ³ <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>m³</th> <th>kg</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Piedra</td> <td>0,02845</td> <td>42,90</td> </tr> <tr> <td>Arena</td> <td>0,02685</td> <td>41,41</td> </tr> <tr> <td>Cemento</td> <td>0,00951</td> <td>28,72</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td>0,01441</td> <td>14,41</td> </tr> </tbody> </table>						m ³	kg	Piedra	0,02845	42,90	Arena	0,02685	41,41	Cemento	0,00951	28,72	Agua	0,01441	14,41																		
	m ³	kg																																								
Piedra	0,02845	42,90																																								
Arena	0,02685	41,41																																								
Cemento	0,00951	28,72																																								
Agua	0,01441	14,41																																								

Anexo D. Resultados de resistencia a la compresión de cilindros

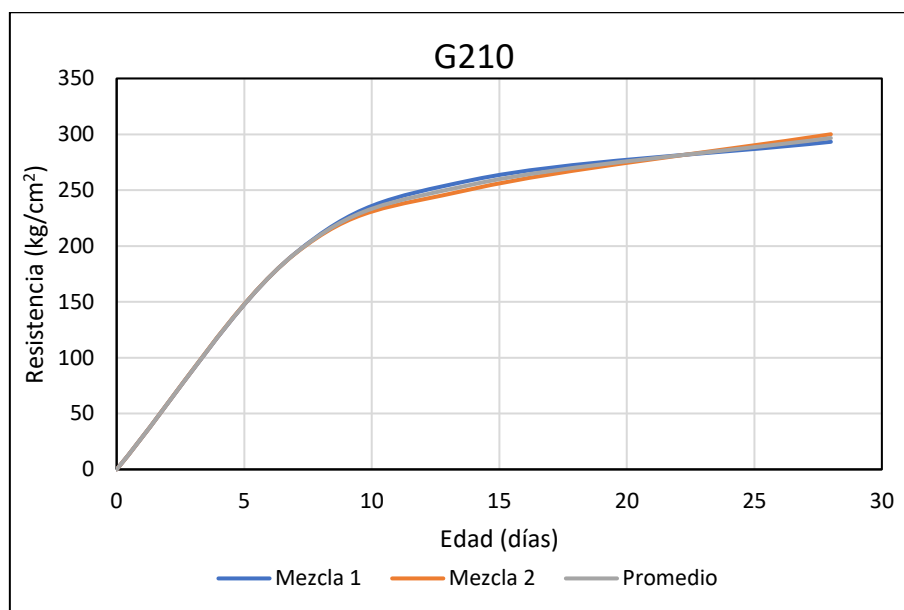
Anexo D.1. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto producidos con agregados de Guápiles

Concreto tipo G210 Mezcla 1			Moldeo: 6/5/2020						
Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	13/5/2020	7	100,4	198	7924	146,2	18,4	188	3
2			101,0	203	8018	147,3	18,4	187	3
3			100,9	202	7997	160,9	20,1	205	3
1	20/5/2020	14	100,1	200	7866	203,9	25,9	264	3
2			100,9	202	7996	195,2	24,4	249	3
3			100,2	199	7878	204,6	26,0	265	3
1	3/6/2020	28	100,1	198	7863	231,5	29,4	300	4
2			101,0	202	8019	233,5	29,1	297	3
3			99,9	199	7846	217,6	27,7	283	3

Concreto tipo G210 Mezcla 2

Moldeo: 6/5/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	13/5/2020	7	100,9	203	8001	151,3	18,9	193	3
2			100,9	202	7998	156,7	19,6	200	3
3			100,8	202	7972	146,1	18,3	187	3
1	20/5/2020	14	101,1	203	8023	187,9	23,4	239	3
2			100,0	199	7857	198,5	25,3	258	3
3			100,0	200	7860	198,5	25,3	258	3
1	3/6/2020	28	100,9	201	7996	240,9	30,1	307	3
2			100,0	198	7852	229,5	29,2	298	3
3			101,1	201	8026	232,1	28,9	295	3



Concreto tipo G280 D1 Mezcla 1

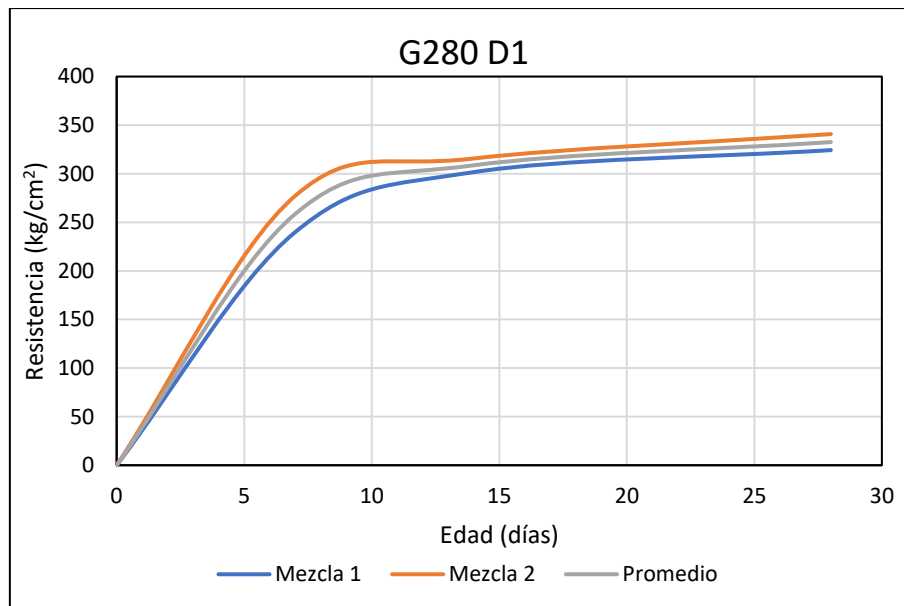
Moldeo: 27/5/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	3/6/2020	7	101,0	203	8013	171,2	21,4	218	3
2			100,8	203	7982	201,5	25,2	257	3
3			100,8	202	7978	191,2	24,0	244	3
1	10/6/2020	14	100,9	203	7990	246,8	30,9	315	3
2			100,8	203	7974	217,2	27,2	278	3
3			100,9	202	7993	244,7	30,6	312	3
1	24/6/2020	28	101,1	202	8030	247,9	30,9	315	3
2			101,0	202	8009	275,8	34,4	351	3
3			100,1	199	7864	236,7	30,1	307	3

Concreto tipo G280 D1 Mezcla 2

Moldeo: 3/6/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	10/6/2020	7	101,2	203	8038	219,1	27,3	278	3
2			101,0	202	8011	214,1	26,7	273	3
3			100,9	203	7990	220,4	27,6	281	3
1	17/6/2020	14	100,0	199	7856	240,3	30,6	312	3
2			100,9	202	7989	258,5	32,4	330	3
3			100,9	203	7998	239,4	29,9	305	3
1	1/7/2020	28	100,9	203	7995	258,9	32,4	330	3
2			100,9	202	8003	279,5	34,9	356	3
3			101,0	203	8010	263,9	32,9	336	3



Concreto tipo G280 D2 Mezcla 1

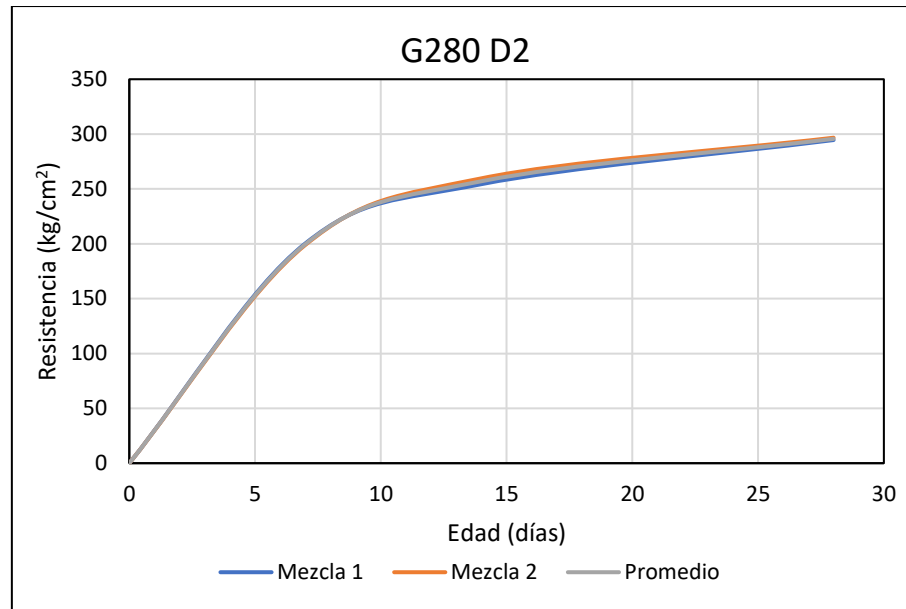
Moldeo: 26/8/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	2/9/2020	7	100,9	202	8000	165,1	20,6	210	2
2			100,9	202	7998	149,6	18,7	191	2
3			100,9	202	7989	156,7	19,6	200	2
1	9/9/2020	14	101,0	203	8014	196,9	24,6	251	3
2			100,8	202	7983	199,3	25,0	255	2
3			100,9	202	7988	202,1	25,3	258	3
1	23/9/2020	28	100,9	200	8002	215,1	26,9	274	2
2			100,6	201	7941	245,9	31,0	316	3
3			100,9	203	7995	230,5	28,8	294	2

Concreto tipo G280 D2 Mezcla 2

Moldeo: 26/8/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	2/9/2020	7	100,0	198	7857	151,8	19,3	197	2
2			100,0	199	7860	156,3	19,9	203	2
3			99,9	199	7833	151,6	19,4	197	2
1	9/9/2020	14	100,9	203	7990	201,2	25,2	257	2
2			101,1	202	8020	213,4	26,6	271	2
3			100,9	202	7991	196,7	24,6	251	3
1	23/9/2020	28	100,9	202	7996	226,2	28,3	288	2
2			100,0	200	7861	229,5	29,2	298	2
3			100,1	199	7877	234,8	29,8	304	2

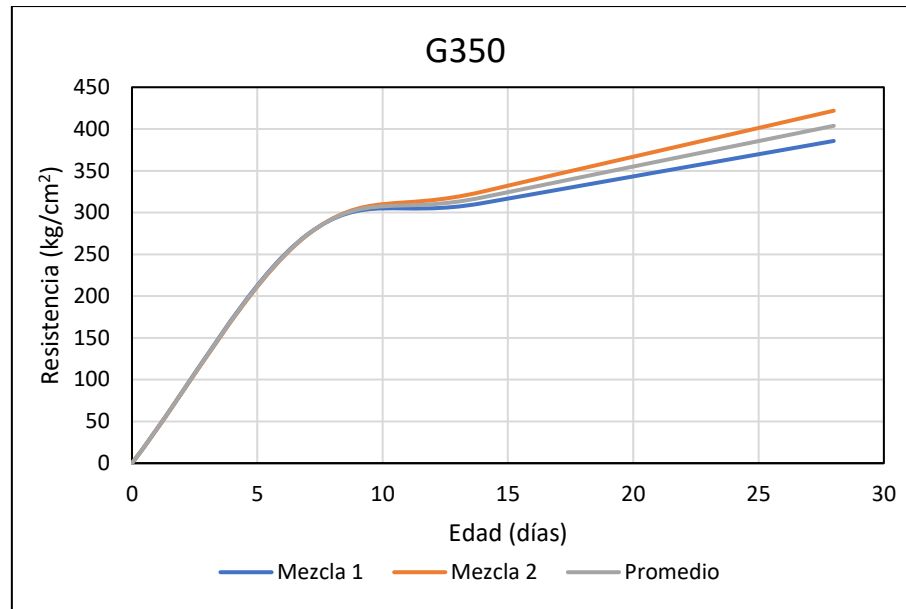


Concreto tipo G350 Mezcla 1 Moldeo: 9/9/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	16/9/2020	7	101,1	202	8035	205,2	25,5	260	3
2			100,1	199	7867	222,5	28,3	288	2
3			101,0	202	8009	214,2	26,7	273	3
1	23/9/2020	14	100,1	199	7871	261,0	33,2	338	2
2			99,5	198	7773	214,9	27,6	282	2
3			101,0	202	8008	246,8	30,8	314	2
1	7/10/2020	28	101,2	202	8047	310,5	38,6	393	4
2			100,9	200	8002	283,9	35,5	362	2
3			100,9	201	7994	315,1	39,4	402	2

Concreto tipo G350 Mezcla 2 Moldeo: 9/9/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	16/9/2020	7	101,0	203	8007	218,8	27,3	279	3
2			101,0	202	8017	210,6	26,3	268	3
1	23/9/2020	14	100,9	202	7998	249,1	31,1	318	2
2			101,0	203	8007	259,8	32,4	331	2
3			100,2	198	7881	252,8	32,1	327	2
1	7/10/2020	28	100,8	201	7983	326,9	41,0	418	2
2			100,1	197	7863	327,6	41,7	425	3
3			100,9	201	7994	331,8	41,5	423	3

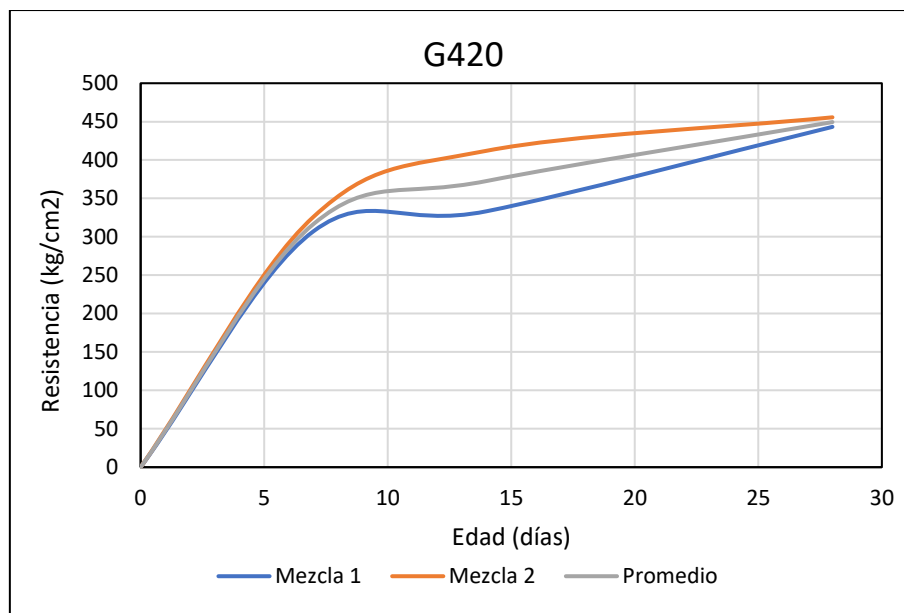


Concreto tipo G420 Mezcla 1 Moldeo: 2/9/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	9/9/2020	7	100,9	203	8002	238,9	29,8	304	3
2			100,9	202	7997	247,9	31,0	316	3
3			101,1	203	8028	237,5	29,6	302	3
1	16/9/2020	14	100,9	203	8002	251,8	31,5	321	3
2			101,0	203	8013	284,7	35,5	362	2
3			101,0	204	8013	248,9	31,1	317	3
1	1/10/2020	29	101,0	200	8009	363,6	45,4	463	2
2			100,3	197	7897	317,1	40,2	409	3
3			100,0	197	7854	352,2	44,8	457	3

Concreto tipo G420 Mezcla 2 Moldeo: 2/9/2020

Especimen	Fecha de	Edad de	Diámetro	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	9/9/2020	7	99,9	200	7843	248,0	31,6	322	4
2			100,8	203	7987	258,3	32,3	330	4
3			101,1	203	8028	257,1	32,0	327	3
1	16/9/2020	14	100,2	199	7893	310,2	39,3	401	3
2			101,0	204	8005	312,8	39,1	398	4
3			100,2	200	7889	338,0	42,8	437	3
1	1/10/2020	29	100,6	202	7949	383,4	48,2	492	2
2			101,0	203	8017	358,3	44,7	456	4
3			100,9	201	7998	329,1	41,1	420	2



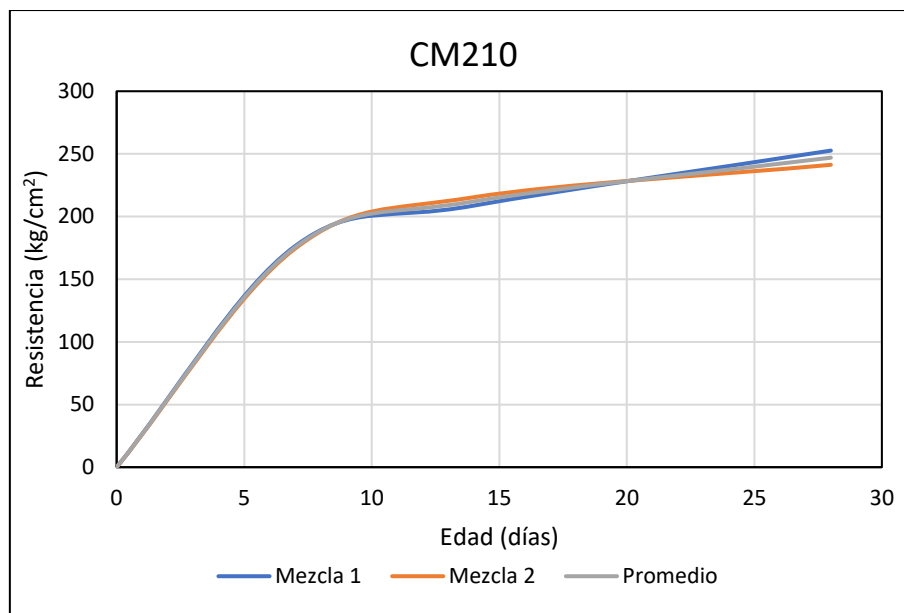
Anexo D.2. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto producidos con agregados de Cerro Minas

Concreto tipo CM210 Mezcla 1 Moldeo: 30/4/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	7/5/2020	7	100,1	199	7873	133,4	16,9	173	3
2			100,9	202	7994	138,9	17,4	177	3
3			100,9	202	7998	140,8	17,6	180	3
1	14/5/2020	14	100,2	200	7887	165,5	21,0	214	3
2			101,0	203	8011	159,2	19,9	203	3
3			100,1	199	7869	161,7	20,5	210	3
1	28/5/2020	28	100,1	199	7875	201,8	25,6	261	3
2			101,0	202	8018	192,7	24,0	245	2
3			100,0	199	7852	193,7	24,7	252	3

Concreto tipo CM210 Mezcla 2 Moldeo: 13/5/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	20/5/2020	7	101,2	202	8041	144,5	18,0	183	3
2			100,2	198	7880	134,4	17,1	174	3
3			101,1	202	8030	131,0	16,3	166	3
1	27/5/2020	14	100,8	202	7978	175,0	21,9	224	3
2			100,0	198	7857	162,7	20,7	211	3
3			100,1	199	7875	163,3	20,7	211	3
1	10/6/2020	28	100,8	200	7975	193,1	24,2	247	3
2			101,0	201	8004	183,0	22,9	233	3
3			101,0	200	8015	191,7	23,9	244	3

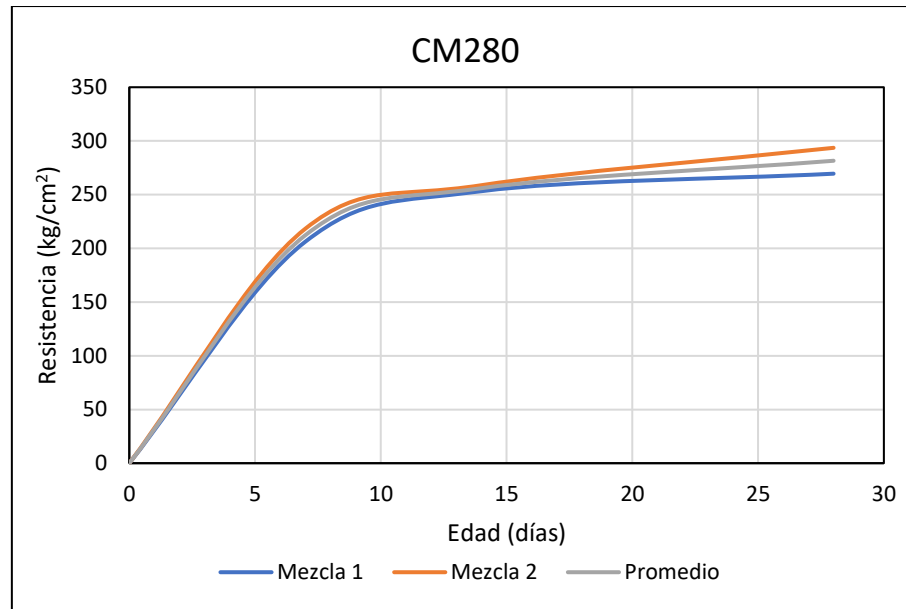


Concreto tipo CM280 Mezcla 1 Moldeo: 13/5/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	20/5/2020	7	100,2	198	7890	166,8	21,1	216	3
2			100,0	199	7859	146,7	18,7	190	3
3			101,0	202	8004	167,1	20,9	213	3
1	27/5/2020	14	100,0	198	7861	205,5	26,1	267	3
2			100,2	198	7887	195,7	24,8	253	2
3			101,0	202	8005	188,5	23,5	240	3
1	10/6/2020	28	101,0	202	8011	202,3	25,3	257	3
2			99,9	196	7844	193,5	24,7	252	3
3			100,2	196	7879	231,4	29,4	299	3

Concreto tipo CM280 Mezcla 2 Moldeo: 20/5/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	27/5/2020	7	100,0	199	7857	163,4	20,8	212	3
2			101,1	202	8032	175,9	21,9	223	3
3			101,0	203	8007	172,5	21,5	220	3
1	3/6/2020	14	101,0	202	8017	206,3	25,7	262	3
2			101,0	202	8013	201,6	25,2	257	3
3			101,2	202	8045	203,1	25,2	257	2
1	17/6/2020	28	100,9	202	7992	226,2	28,3	289	3
2			100,8	201	7987	237,6	29,7	303	3
3			100,9	202	7995	226,5	28,3	289	3

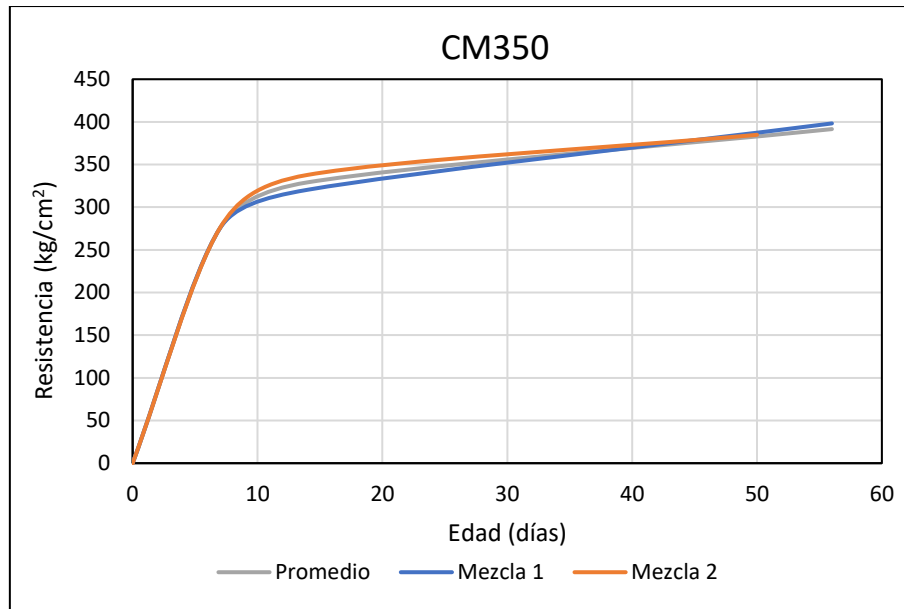


Concreto tipo CM350 Mezcla 1 Moldeo: 10/6/2020

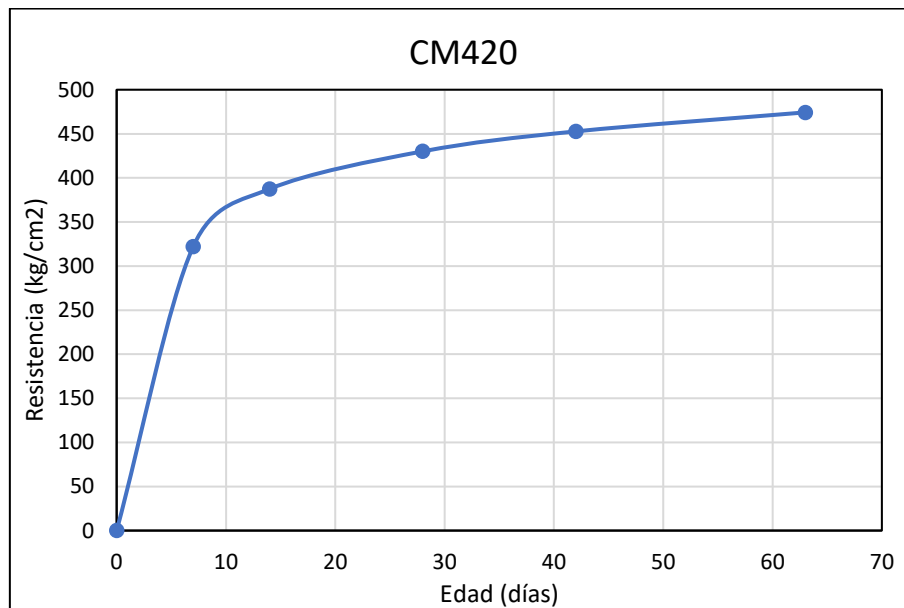
Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	17/6/2020	7	101,0	203	8018	220,9	27,5	281	3
2			100,8	203	7972	202,9	25,4	259	2
3			100,9	201	7997	224,4	28,1	286	4
1	24/6/2020	14	100,9	202	7990	253,9	31,8	324	2
2			100,8	203	7984	265,2	33,2	339	3
3			100,9	203	8001	234,3	29,3	299	3
1	5/8/2020	56	99,9	197	7845	312,2	39,8	406	3
2			101,0	202	8012	310,4	38,7	395	3
3			100,9	201	7997	308,9	38,6	394	3

Concreto tipo CM350 Mezcla 2 Moldeo: 17/6/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	24/6/2020	7	101,0	203	8006	227,9	28,5	290	3
2			100,9	203	7993	213,6	26,7	272	3
3			100,9	203	7988	207,6	26,0	265	3
1	1/7/2020	14	101,0	203	8019	256,6	32,0	326	3
2			101,0	202	8017	278,7	34,8	355	3
3			101,0	203	8016	261,6	32,6	333	3
1	6/8/2020	50	99,9	199	7831	285,3	36,4	371	3
2			101,1	203	8032	330,2	41,1	419	3
3			101,0	203	8008	285,8	35,7	364	3

**Concreto tipo CM420 Mezcla 1****Moldeo: 24/6/2020**

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	1/7/2020	7	101,1	202	8023	259,5	32,3	330	3
2			100,9	202	7999	235,9	29,5	301	3
3			100,9	202	7999	263,2	32,9	336	3
1	5/8/2020	42	100,8	203	7983	354,4	44,4	453	3
2			100,9	203	8000	353,6	44,2	451	2
3			101,0	203	8010	357,3	44,6	455	3
1	26/8/2020	63	100,9	203	7990	383,0	47,9	489	3
2			101,0	202	8010	369,4	46,1	470	3
3			101,0	202	8012	364,5	45,5	464	3



Anexo E. Resultados de resistencia a la tracción

*Anexo E.1. Resultados de resistencia a la tracción de concretos producidos con agregados de Guápiles***Concreto tipo G210 Mezcla 1****Moldeo: 6/5/2020**

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Carga máxima (N)	Resistencia	
						(MPa)	(kg/cm ²)
1	3/6/2020	28	151,8	303,8	178600	2,5	25
2			151,8	304,8	187800	2,6	26

Concreto tipo G210 Mezcla 1**Moldeo: 6/5/2020**

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Carga máxima (N)	Resistencia	
						(MPa)	(kg/cm ²)
1	3/6/2020	28	150,1	299,8	226600	3,2	33
2			149,9	300,3	204000	2,9	29

Concreto tipo G280 D1 Mezcla 1**Moldeo: 27/5/2020**

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Carga máxima (N)	Resistencia	
						(MPa)	(kg/cm ²)
1	24/6/2020	28	152,0	305,1	178100	2,4	25
2			151,9	305,3	184950	2,5	26

Concreto tipo G280 D1 Mezcla 2**Moldeo: 3/6/2020**

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Carga máxima (N)	Resistencia	
						(MPa)	(kg/cm ²)
1	1/7/2020	28	151,7	306,1	243500	3,3	34
2			151,9	306,1	250200	3,4	35

Concreto tipo G280 D2 Mezcla 1**Moldeo: 26/8/2020**

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Carga máxima (N)	Resistencia	
						(MPa)	(kg/cm ²)
1	21/10/2020	56	151,8	305,4	201600	2,8	28
2			151,6	306,5	177900	2,4	25

Concreto tipo G280 D2 Mezcla 2**Moldeo: 26/8/2020**

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Carga máxima (N)	Resistencia	
						(MPa)	(kg/cm ²)
1	21/10/2020	56	149,3	304,2	184700	2,6	26
2			152,0	306,1	235100	3,2	33

Concreto tipo G350 Mezcla 1**Moldeo: 9/9/2020**

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Carga máxima (N)	Resistencia	
						(MPa)	(kg/cm ²)
1	4/11/2020	56	151,6	306,7	233300	3,2	33
2			151,7	306,1	231000	3,2	32

Concreto tipo G350 Mezcla 2**Moldeo: 9/9/2020**

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Carga máxima (N)	Resistencia	
						(MPa)	(kg/cm ²)
1	4/11/2020	56	151,8	305,6	175900	2,4	25
2			151,8	306,6	183200	2,5	26

Concreto tipo G420 Mezcla 1 Moldeo: 2/9/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Carga máxima (N)	Resistencia	
						(MPa)	(kg/cm ²)
1	28/10/2020	56	151,9	305,6	217800	3,0	30
2			151,9	305,5	258800	3,6	36

Concreto tipo G420 Mezcla 2 Moldeo: 2/9/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Carga máxima (N)	Resistencia	
						(MPa)	(kg/cm ²)
1	28/10/2020	56	152,0	305,7	276800	3,8	39
2			151,7	305,6	224600	3,1	31

Anexo E.2. Resistencia a la tracción para concretos producidos con agregados de Cerro Minas

Concreto tipo CM210 Mezcla 1 Moldeo: 30/4/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Carga máxima (N)	Resistencia	
						(MPa)	(kg/cm ²)
1	28/5/2020	28	151,9	304,6	195600	2,7	27
2			151,9	304,6	227100	3,1	32

Concreto tipo CM210 Mezcla 2 Moldeo: 13/5/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Carga máxima (N)	Resistencia	
						(MPa)	(kg/cm ²)
1	10/6/2020	28	151,4	303,4	238400	3,3	34
2			151,7	303,1	216000	3,0	31

Concreto tipo CM280 Mezcla 1 Moldeo: 13/5/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Carga máxima (N)	Resistencia	
						(MPa)	(kg/cm ²)
1	10/6/2020	28	151,5	303,9	270900	3,7	38
2			151,8	303,9	262500	3,6	37

Concreto tipo CM280 Mezcla 2 Moldeo: 20/5/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Carga máxima (N)	Resistencia	
						(MPa)	(kg/cm ²)
1	17/6/2020	28	151,6	304,9	284250	3,9	40
2			151,9	304,6	230700	3,2	32

Concreto tipo CM350 Mezcla 1 Moldeo: 10/6/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Carga máxima (N)	Resistencia	
						(MPa)	(kg/cm ²)
1	5/8/2020	56	151,9	305,0	339400	4,7	48
2			152,0	304,3	344300	4,7	48

Concreto tipo CM350 Mezcla 2 Moldeo: 17/6/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Carga máxima (N)	Resistencia	
						(MPa)	(kg/cm ²)
1	6/8/2020	50	151,7	303,3	334700	4,6	47
2			151,5	304,3	285300	3,9	40

Concreto tipo CM420 Mezcla 1 Moldeo: 24/6/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Carga máxima (N)	Resistencia	
						(MPa)	(kg/cm ²)
1	26/8/2020	63	151,9	305,4	363550	5,0	51
2			151,7	305,7	313850	4,3	44

Anexo F. Resultados de ensayo de módulo de elasticidad

*Anexo F.1. Resultados de módulo de elasticidad para concretos producidos con agregados de Guápiles***Concreto tipo G210 Mezcla 1 Moldeo: 6/5/2020**

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	3/6/2020	28	151,7	303,0	18071	535,5	29,6	302	3
2			151,8	302,8	18089	553,5	30,6	312	3
3			151,7	303,7	18079	-	-	-	-

Punto 1:
S ₁ (MPa): 2,0
ε ₁ : 0,00005

Punto 2:
S ₂ (MPa): 12,1
ε ₂ : 0,00041

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
27798	283466

PROMEDIO	
MPa	kg/cm ²
27861	284101

Punto 1:
S ₁ (MPa): 1,9
ε ₁ : 0,00005

Punto 2:
S ₂ (MPa): 12,1
ε ₂ : 0,00042

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
27923	284735

Concreto tipo G210 Mezcla 1 Moldeo: 6/5/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	3/6/2020	28	151,7	303,0	18072	519,4	28,7	293	3
2			151,7	302,7	18071	494,7	27,4	279	4
3			151,9	302,5	18116	-	-	-	-

Punto 1:
S ₁ (MPa): 2,8
ε ₁ : 0,00005

Punto 2:
S ₂ (MPa): 11,2
ε ₂ : 0,00037

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
26246	267633

PROMEDIO	
MPa	kg/cm ²
26405	269261

Punto 1:
S ₁ (MPa): 2,8
ε ₁ : 0,00005

Punto 2:
S ₂ (MPa): 11,3
ε ₂ : 0,00037

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
26565	270888

Concreto tipo G280 D1 Mezcla 1

Moldeo: 27/5/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	24/6/2020	28	151,7	303,7	18062	544,6	30,2	307	3
2			151,8	305,4	18086	564,2	31,2	318	3
3			151,8	304,6	18096	-	-	-	0

Punto 1:	
S ₁ (MPa):	2,3
ε ₁ :	0,00005

Punto 2:	
S ₂ (MPa):	12,5
ε ₂ :	0,00031

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
39832	406171

PROMEDIO	
MPa	kg/cm ²
39227	400009

Punto 1:	
S ₁ (MPa):	2,2
ε ₁ :	0,00005

Punto 2:	
S ₂ (MPa):	12,4
ε ₂ :	0,00032

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
38623	393847

Concreto tipo G280 D1 Mezcla 2

Moldeo: 3/6/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	1/7/2020	28	151,7	303,2	18075	659,5	36,5	372	3
2			151,7	304,7	18079	654,7	36,2	369	4
3			152,2	303,6	18182	-	-	-	0

Punto 1:	
S ₁ (MPa):	2,0
ε ₁ :	0,00005

Punto 2:	
S ₂ (MPa):	14,7
ε ₂ :	0,00042

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
34235	349104

PROMEDIO	
MPa	kg/cm ²
33055	337071

Punto 1:	
S ₁ (MPa):	2,3
ε ₁ :	0,00005

Punto 2:	
S ₂ (MPa):	14,6
ε ₂ :	0,00044

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
31875	325039

Concreto tipo G280 D2 Mezcla 1

Moldeo: 26/8/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	21/10/2020	56	151,6	305,1	18039	584,7	32,4	331	3
2			151,8	302,6	18089	605,1	33,4	341	3
3			150,0	300,0	17671	-	-	-	0

Punto 1:	
S ₁ (MPa):	5,1
ε ₁ :	0,00005

Punto 2:	
S ₂ (MPa):	13,6
ε ₂ :	0,00031

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
32647	332910

PROMEDIO	
MPa	kg/cm ²
32779	334253

Punto 1:	
S ₁ (MPa):	7,4
ε ₁ :	0,00005

Punto 2:	
S ₂ (MPa):	13,7
ε ₂ :	0,00024

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
32911	335596

Concreto tipo G280 D2 Mezcla 2

Moldeo: 26/8/2020

Especímen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	21/10/2020	56	151,9	303,6	18126	634,8	35,0	357	2
2			152,6	302,5	18286	605,8	33,1	338	2
3			150,0	300,0	17671	-	-	-	0

Punto 1:	
S ₁ (MPa):	2,6
ε ₁ :	0,00005

Punto 2:	
S ₂ (MPa):	14,1
ε ₂ :	0,00044

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
29148	297226

PROMEDIO	
MPa	kg/cm ²
28142	286974

Punto 1:	
S ₁ (MPa):	2,0
ε ₁ :	0,00005

Punto 2:	
S ₂ (MPa):	14,2
ε ₂ :	0,00050

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
27137	276722

Concreto tipo G350 Mezcla 1

Moldeo: 9/9/2020

Especímen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	4/11/2020	56	152,1	302,9	18165	636,9	35,1	358	3
2			151,7	303,5	18079	651,8	36,1	368	3
3			150,0	300,0	17671	-	-	-	-

Punto 1:	
S ₁ (MPa):	2,4
ε ₁ :	0,00005

Punto 2:	
S ₂ (MPa):	14,6
ε ₂ :	0,00035

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
40829	416337

PROMEDIO	
MPa	kg/cm ²
43024	438728

Punto 1:	
S ₁ (MPa):	2,3
ε ₁ :	0,00005

Punto 2:	
S ₂ (MPa):	14,9
ε ₂ :	0,00033

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
45220	461120

Concreto tipo G350 Mezcla 2

Moldeo: 9/9/2020

Especímen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	4/11/2020	56	151,9	302,8	18124	523,4	28,9	294	3
2			152,1	303,2	18172	516,4	28,4	290	2
3			150,0	300,0	17671	-	-	-	-

Punto 1:	
S ₁ (MPa):	1,4
ε ₁ :	0,00005

Punto 2:	
S ₂ (MPa):	11,7
ε ₂ :	0,00039

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
30575	311775

PROMEDIO	
MPa	kg/cm ²
32405	330443

Punto 1:	
S ₁ (MPa):	1,6
ε ₁ :	0,00005

Punto 2:	
S ₂ (MPa):	11,9
ε ₂ :	0,00035

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
34236	349111

Concreto tipo G420 Mezcla 1

Moldeo: 2/9/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	28/10/2020	56	151,8	304,7	18095	872,6	48,2	492	3
2			152,0	303,2	18141	840,0	46,3	472	3
3			150,0	300,0	17671	-	-	-	-

Punto 1:	
S ₁ (MPa):	2,1
ε ₁ :	0,00005

Punto 2:	
S ₂ (MPa):	19,6
ε ₂ :	0,00068

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
27618	281628

PROMEDIO	
MPa	kg/cm ²
30266	308631

Punto 1:	
S ₁ (MPa):	1,8
ε ₁ :	0,00005

Punto 2:	
S ₂ (MPa):	19,5
ε ₂ :	0,00059

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
32914	335635

Concreto tipo G420 Mezcla 2

Moldeo: 2/9/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	28/10/2020	56	151,7	303,2	18080	912,3	50,5	515	0
2			151,8	304,7	18087	890,4	49,2	502	0
3			150,0	300,0	17671	-	-	-	-

Punto 1:	
S ₁ (MPa):	2,0
ε ₁ :	0,00005

Punto 2:	
S ₂ (MPa):	20,4
ε ₂ :	0,00054

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
37188	379211

PROMEDIO	
MPa	kg/cm ²
36908	376361

Punto 1:	
S ₁ (MPa):	1,9
ε ₁ :	0,00005

Punto 2:	
S ₂ (MPa):	20,4
ε ₂ :	0,00055

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
36629	373511

Anexo F.2. Resultados de módulo de elasticidad para concretos producidos con agregados de Cerro Minas

Concreto tipo CM210 Mezcla 1

Moldeo: 30/4/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	28/5/2020	28	151,8	304	18091	437,7	24,2	247	3
2			151,7	303	18065	439,5	24,3	248	3
3			151,8	303	18106	-	-	-	-

Punto 1:	
S ₁ (MPa):	4,2
ε ₁ :	0,000167

Punto 2:	
S ₂ (MPa):	9,7
ε ₂ :	0,00037

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
26993	275255

PROMEDIO	
MPa	kg/cm ²
26954	274851

Punto 1:	
S ₁ (MPa):	4,9
ε ₁ :	0,000167

Punto 2:	
S ₂ (MPa):	9,7
ε ₂ :	0,00035

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
26914	274447

Concreto tipo CM210 Mezcla 2

Moldeo: 13/5/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	10/6/2020	28	151,5	302	18024	443,1	24,6	251	3
2			151,6	302	18056	454,6	25,2	257	3
3			151,8	302	18095	-	-	-	-

Punto 1:	
S ₁ (MPa):	2,6
ε ₁ :	0,00005

Punto 2:	
S ₂ (MPa):	10,0
ε ₂ :	0,00027

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
33663	343266

PROMEDIO	
MPa	kg/cm ²
34943	356317

Punto 1:	
S ₁ (MPa):	2,5
ε ₁ :	0,00005

Punto 2:	
S ₂ (MPa):	10,0
ε ₂ :	0,00026

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
36223	369369

Concreto tipo CM280 Mezcla 1

Moldeo: 13/5/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	10/6/2020	28	151,5	301	18024	451,0	25,0	255	3
2			152,1	303	18159	470,0	25,9	264	3
3			151,9	302	18114	-	-	-	-

Punto 1:	
S ₁ (MPa):	1,8
ε ₁ :	0,00005

Punto 2:	
S ₂ (MPa):	10,2
ε ₂ :	0,00034

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
29391	299701

PROMEDIO	
MPa	kg/cm ²
28912	294824

Punto 1:	
S ₁ (MPa):	1,7
ε ₁ :	0,00005

Punto 2:	
S ₂ (MPa):	10,2
ε ₂ :	0,00035

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
28434	289946

Concreto tipo CM280 Mezcla 2

Moldeo: 20/5/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	17/6/2020	28	151,5	303	18029	502,8	27,9	284	3
2			151,8	303	18089	496,5	27,4	280	2
3			151,5	304	18021	-	-	-	-

Punto 1:	
S ₁ (MPa):	2,6
ε ₁ :	0,00005

Punto 2:	
S ₂ (MPa):	11,6
ε ₂ :	0,00031

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
34037	347085

PROMEDIO	
MPa	kg/cm ²
33698	343625

Punto 1:	
S ₁ (MPa):	2,8
ε ₁ :	0,00005

Punto 2:	
S ₂ (MPa):	11,3
ε ₂ :	0,00030

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
33359	340164

Concreto tipo CM350 Mezcla 1

Moldeo: 10/6/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	5/8/2020	56	151,9	304	18127	682,4	37,6	384	3
2			151,7	303	18067	714,3	39,5	403	3
3			151,7	303	18071	-	-	-	-

Punto 1:
S ₁ (MPa): <u>2,6</u>
ε ₁ : <u>0,00005</u>

Punto 2:
S ₂ (MPa): <u>15,6</u>
ε ₂ : <u>0,00030</u>

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
51404	524179

PROMEDIO	
MPa	kg/cm ²
49689	506685

Punto 1:
S ₁ (MPa): <u>2,3</u>
ε ₁ : <u>0,00005</u>

Punto 2:
S ₂ (MPa): <u>15,6</u>
ε ₂ : <u>0,00033</u>

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
47973	489191

Concreto tipo CM350 Mezcla 2

Moldeo: 17/6/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	6/8/2020	50	151,7	302	18081	650,8	36,0	367	3
2			151,6	304	18041	-	-	-	-

Punto 1:
S ₁ (MPa): <u>2,9</u>
ε ₁ : <u>0,00005</u>

Punto 2:
S ₂ (MPa): <u>14,4</u>
ε ₂ : <u>0,00031</u>

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
43791	446543

PROMEDIO	
MPa	kg/cm ²
44228	450997

Punto 1:
S ₁ (MPa): <u>2,7</u>
ε ₁ : <u>0,00005</u>

Punto 2:
S ₂ (MPa): <u>14,8</u>
ε ₂ : <u>0,00032</u>

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
44664	455452

Concreto tipo CM420 Mezcla 1

Moldeo: 24/6/2020

Especimen	Fecha de falla	Edad de falla	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia		Tipo de falla
							(MPa)	(kg/cm ²)	
1	26/8/2020	63	151,8	303	18109	762,0	42,1	429	3
2			151,5	304	18037	817,9	45,3	462	3
3			151,7	305	18077	-	-	-	-

Punto 1:
S ₁ (MPa): <u>2,0</u>
ε ₁ : <u>0,00005</u>

Punto 2:
S ₂ (MPa): <u>17,7</u>
ε ₂ : <u>0,00056</u>

Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
30468	310693

PROMEDIO	
MPa	kg/cm ²
30666	312705

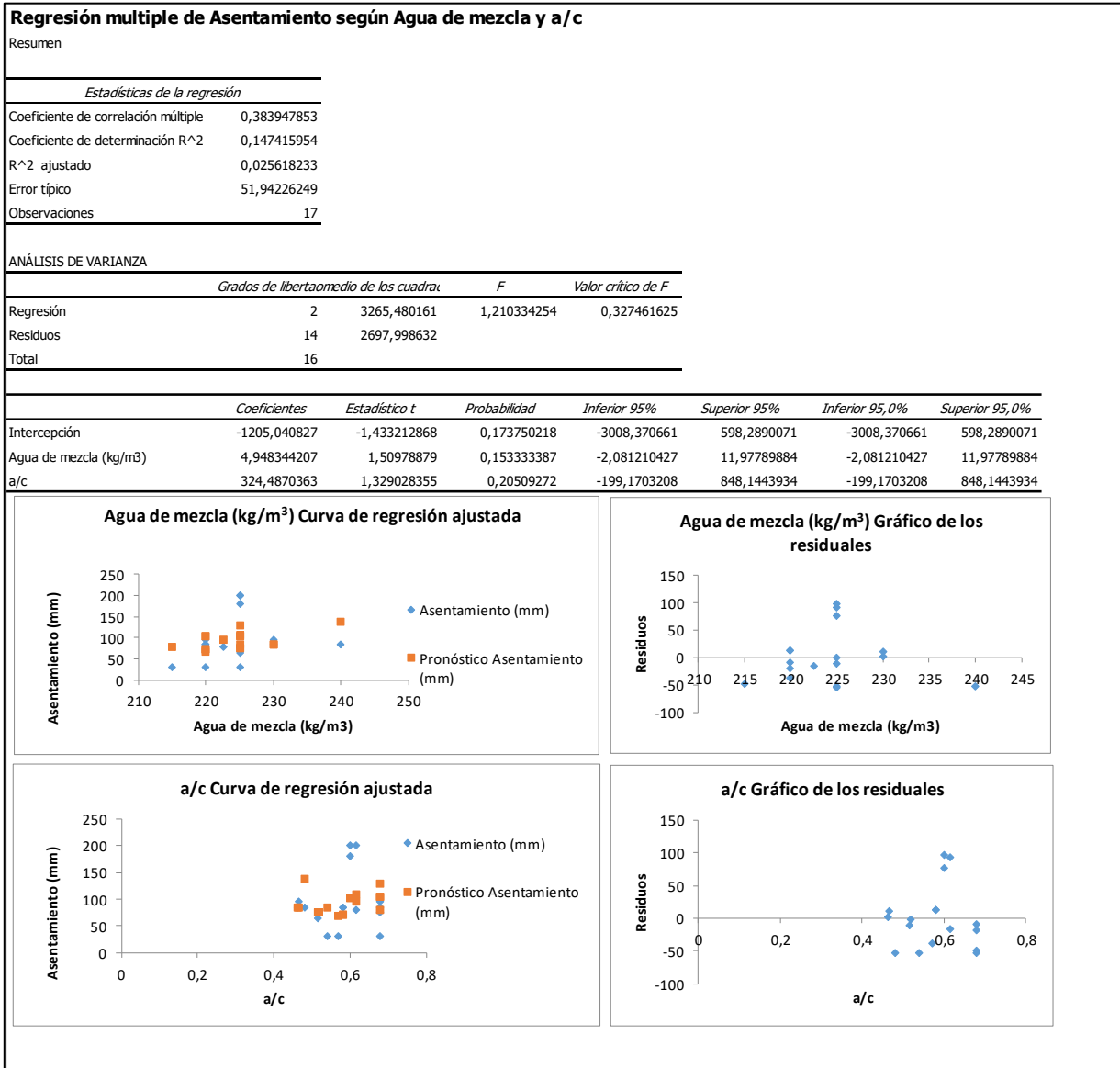
Punto 1:
S ₁ (MPa): <u>2,1</u>
ε ₁ : <u>0,00005</u>

Punto 2:
S ₂ (MPa): <u>17,6</u>
ε ₂ : <u>0,00055</u>

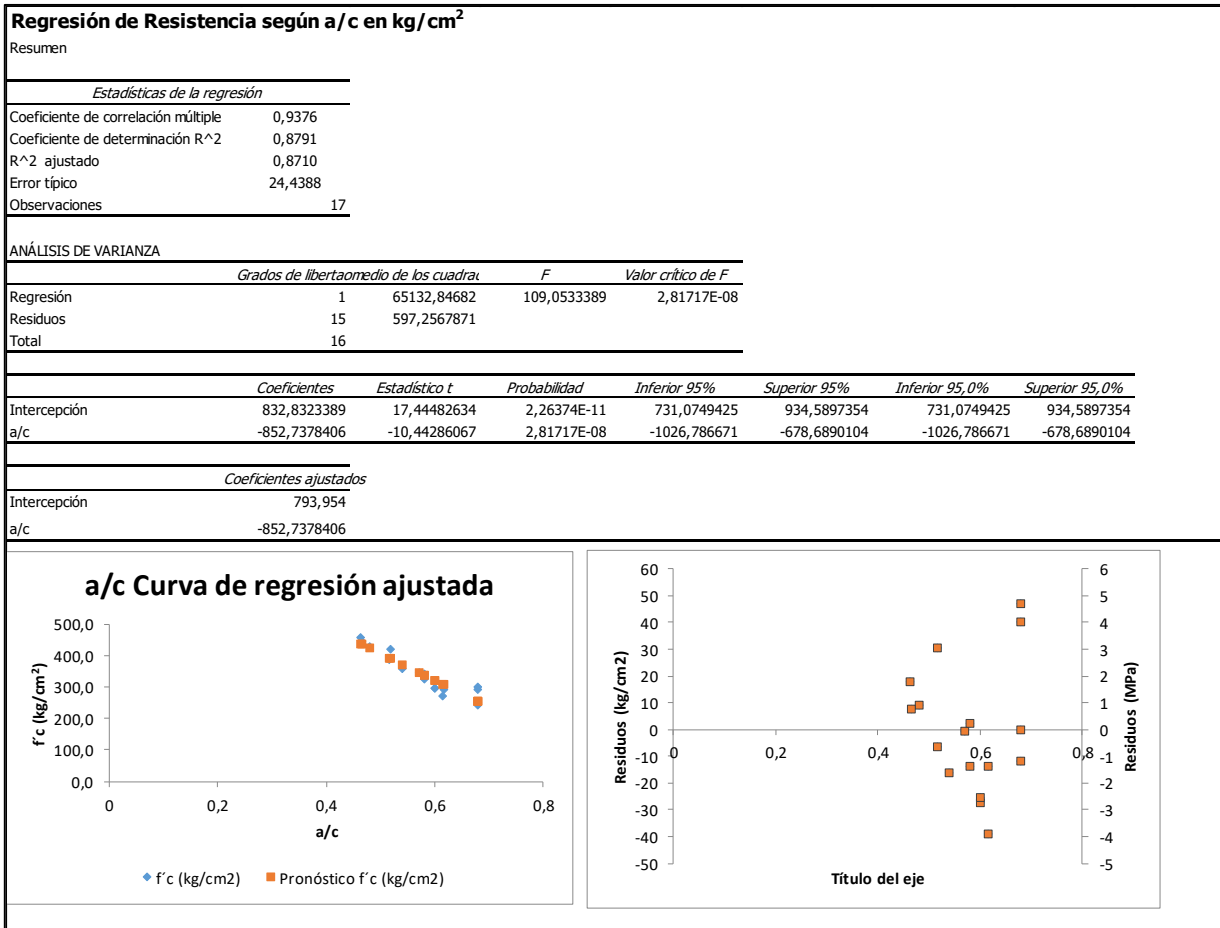
Módulo de elasticidad E	
MPa	kg/cm ²
30863	314718

Anexo G. Detalle de resultados de regresiones

Anexo G.1. Regresión múltiple de Asentamiento en función del contenido de agua y la relación agua/cemento de la mezcla



Anexo G.2. Regresión de resistencia a la compresión según la relación agua/cemento para los todos los resultados



Regresión de Resistencia según a/c en MPa

Resumen

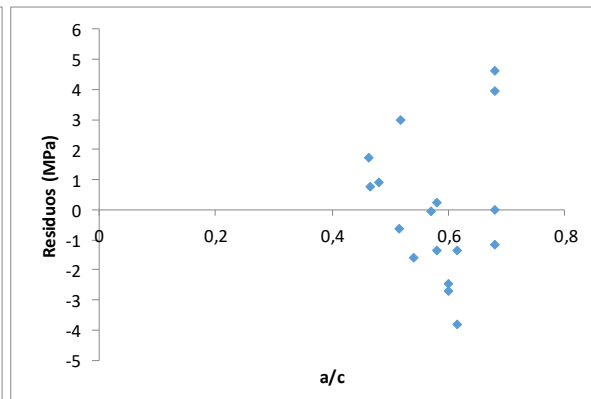
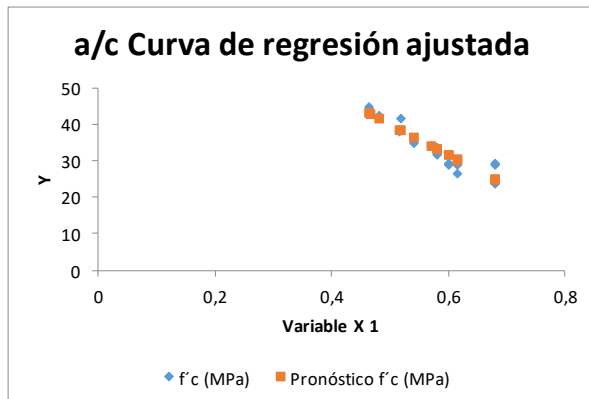
<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,9376
Coefficiente de determinación R ²	0,8791
R ² ajustado	0,8710
Error típico	2,3966
Observaciones	17

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	626,38044	626,3804379	109,0533389	2,81717E-08
Residuos	15	86,156982	5,743798807		
Total	16	712,53742			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	81,673	4,682	17,445	2,26374E-11	71,694	91,652	71,694	91,652
Variable X 1	-83,625	8,008	-10,443	2,81717E-08	-100,693	-66,556	-100,693	-66,556

<i>Coefficientes ajustados</i>	
Intercepción	77,860
a/c	-83,62470488



Anexo G.3. Regresión de resistencia a la compresión según la relación agua/cemento para los concretos con agregados de Guápiles

Regresión de Resistencia según a/c para concretos tipo G [MPa]

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,919926842
Coefficiente de determinación R ²	0,846265395
R ² ajustado	0,829183772
Error típico	2,520234615
Observaciones	11

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	314,673	314,673	49,542	6,06115E-05
Residuos	9	57,164	6,352		
Total	10	371,837			

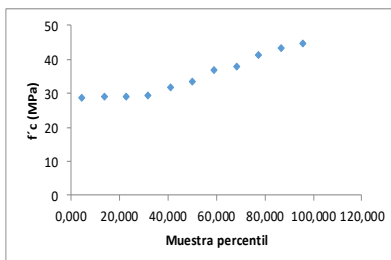
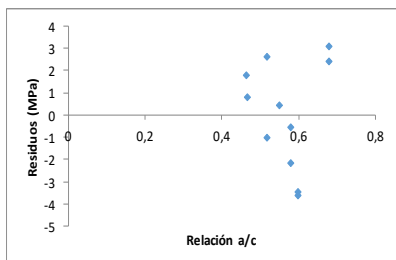
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	78,189	6,177	12,658	4,8806E-07	64,216	92,163	64,216	92,163
Variable X 1	-76,171	10,822	-7,039	6,06115E-05	-100,651	-51,690	-100,651	-51,690

Análisis de los residuales

Observación	Pronóstico para Y	Residuos
1	36,295	0,414
2	26,393	2,371
3	26,393	3,031
4	32,556	-3,667
5	32,556	-3,461
6	34,010	-2,208
7	34,010	-0,592
8	38,850	-1,023
9	38,776	2,599
10	42,705	0,758
11	42,905	1,777

Resultados de datos de probabilidad

Percentil	Y
4,545	28,764
13,636	28,889
22,727	29,096
31,818	29,424
40,909	31,802
50,000	33,418
59,091	36,709
68,182	37,828
77,273	41,375
86,364	43,464
95,455	44,683



Regresión de Resistencia según a/c para concretos tipo G [kg/cm²]

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,920
Coefficiente de determinación R ²	0,846
R ² ajustado	0,829
Error típico	25,699
Observaciones	11

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	32720,601	32720,601	49,542	0,000
Residuos	9	5944,103	660,456		
Total	10	38664,704			

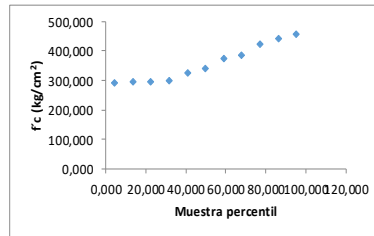
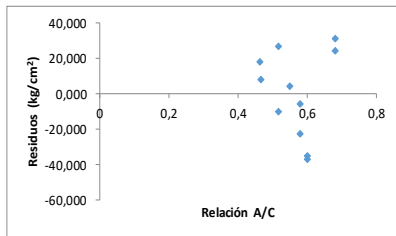
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	797,310	62,989	12,658	4,881E-07	654,819	939,800	654,819	939,800
Variable X 1	-776,726	110,352	-7,039	6,061E-05	-1026,359	-527,093	-1026,359	-527,093

Análisis de los residuales

Observación	Pronóstico para Y	Residuos
1	370,110	4,218
2	269,136	24,179
3	269,136	30,908
4	331,982	-37,394
5	331,982	-35,289
6	346,808	-22,512
7	346,808	-6,041
8	396,165	-10,429
9	395,409	26,503
10	435,476	7,732
11	437,514	18,125

Resultados de datos de probabilidad

Percentil	Y
4,545	293,315
13,636	294,588
22,727	296,693
31,818	300,044
40,909	324,296
50,000	340,768
59,091	374,328
68,182	385,736
77,273	421,911
86,364	443,208
95,455	455,638



Anexo G.4. Regresión de resistencia a la compresión según la relación agua/cemento para los concretos con agregados de Cerro Minas

Regresión de Resistencia según a/c para concretos tipo CM [MPa]

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,977
Coefficiente de determinación R ²	0,955
R ² ajustado	0,946
Error típico	1,550
Observaciones	7

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	254,724	254,724	105,963	0,000148758
Residuos	5	12,019	2,404		
Total	6	266,743			

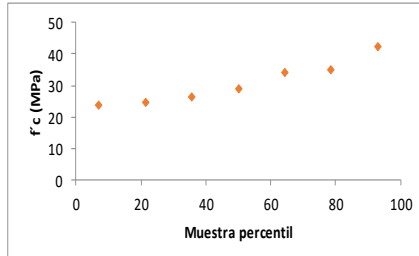
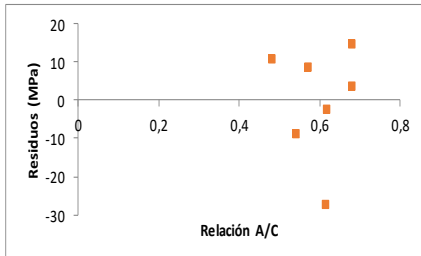
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	83,858	5,200	16,128	1,66984E-05	70,492	97,224	70,492	97,224
Variable X 1	-89,040	8,650	-10,294	0,000	-111,275	-66,805	-111,275	-66,805

Análisis de los residuales

Observación	Pronóstico para Y	Residuos
1	23,311	1,464
2	23,311	0,353
3	29,099	-2,668
4	29,010	-0,218
5	33,106	0,861
6	35,777	-0,851
7	41,119	1,059

Resultados de datos de probabilidad

Percentil	Y
7,143	23,664
21,429	24,775
35,714	26,431
50,000	28,792
64,286	33,967
78,571	34,926
92,857	42,178



Regresión de Resistencia según a/c para concretos tipo CM [kg/cm²]

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,977
Coefficiente de determinación R ²	0,955
R ² ajustado	0,946
Error típico	15,810
Observaciones	7

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	26486,898	26486,898	105,963	0,00015
Residuos	5	1249,820	249,964		
Total	6	27736,718			

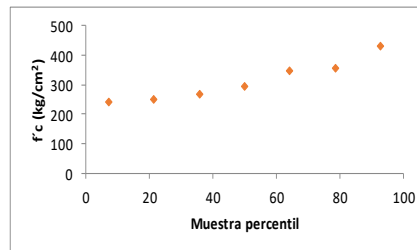
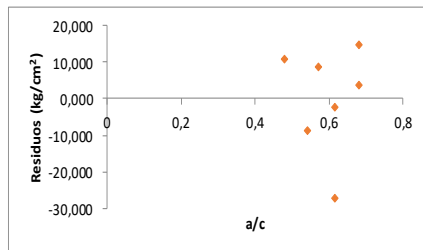
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	855,118	53,021	16,128	1,66984E-05	718,824	991,412	718,824	991,412
Variable X 1	-907,954	88,204	-10,294	0,000148758	-1134,689	-681,219	-1134,689	-681,219

Análisis de los residuales

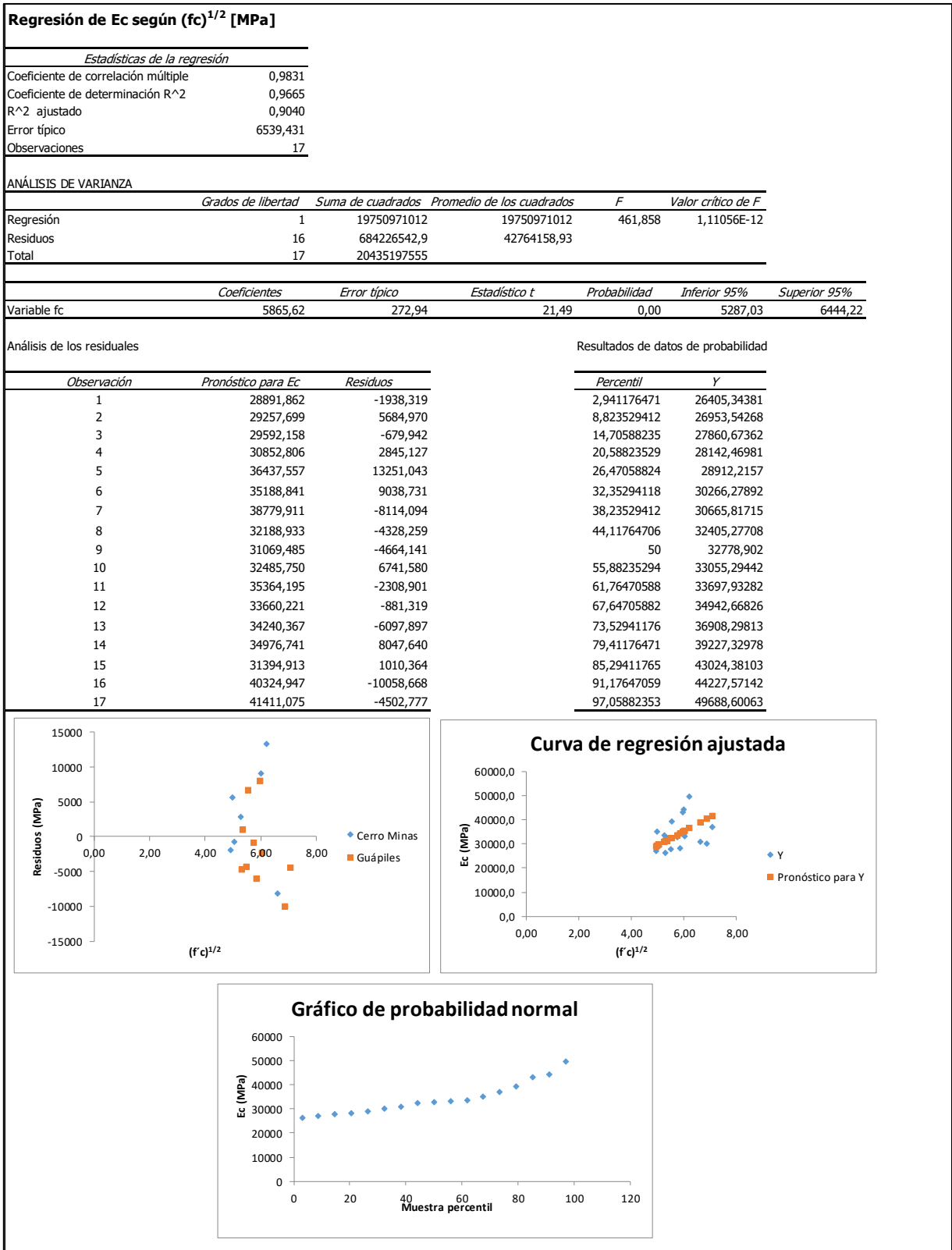
Observación	Pronóstico para Y	Residuos
1	237,709	14,930
2	237,709	3,597
3	296,726	-27,205
4	295,818	-2,224
5	337,584	8,781
6	364,822	-8,674
7	419,300	10,796

Resultados de datos de probabilidad

Percentil	Y
7,143	241,306
21,429	252,639
35,714	269,521
50,000	293,594
64,286	346,364
78,571	356,148
92,857	430,096



Anexo G.5. Regresión de Módulo de Elasticidad según la resistencia a la compresión a la misma edad de falla



Regresión de E_c según $(f_c)^{1/2}$ [kg/cm²]

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,9831
Coefficiente de determinación R ²	0,9665
R ² ajustado	0,9040
Error típico	66684
Observaciones	17

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	2,05376E+12	2,05376E+12	461,858	1,11056E-12
Residuos	16	71147851872	4446740742		
Total	17	2,12491E+12			

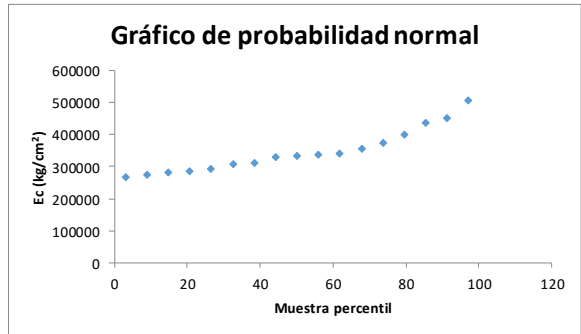
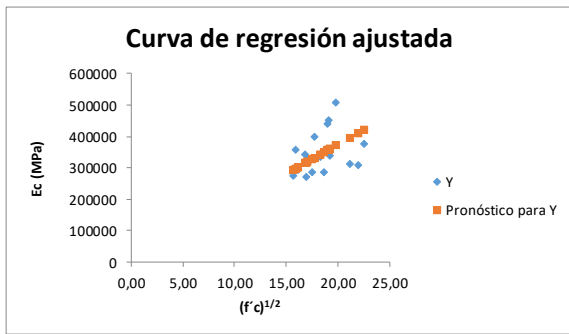
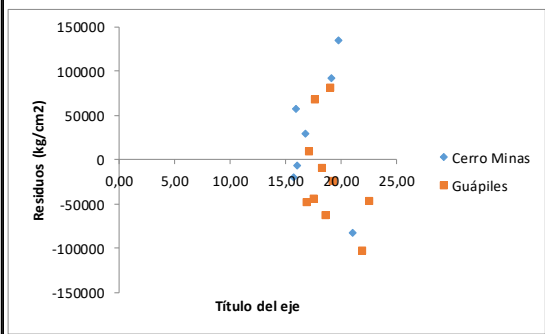
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Variable f_c	18730,732	871,566	21,491	3,15E-13	16883,093	20578,370

Análisis de los residuales

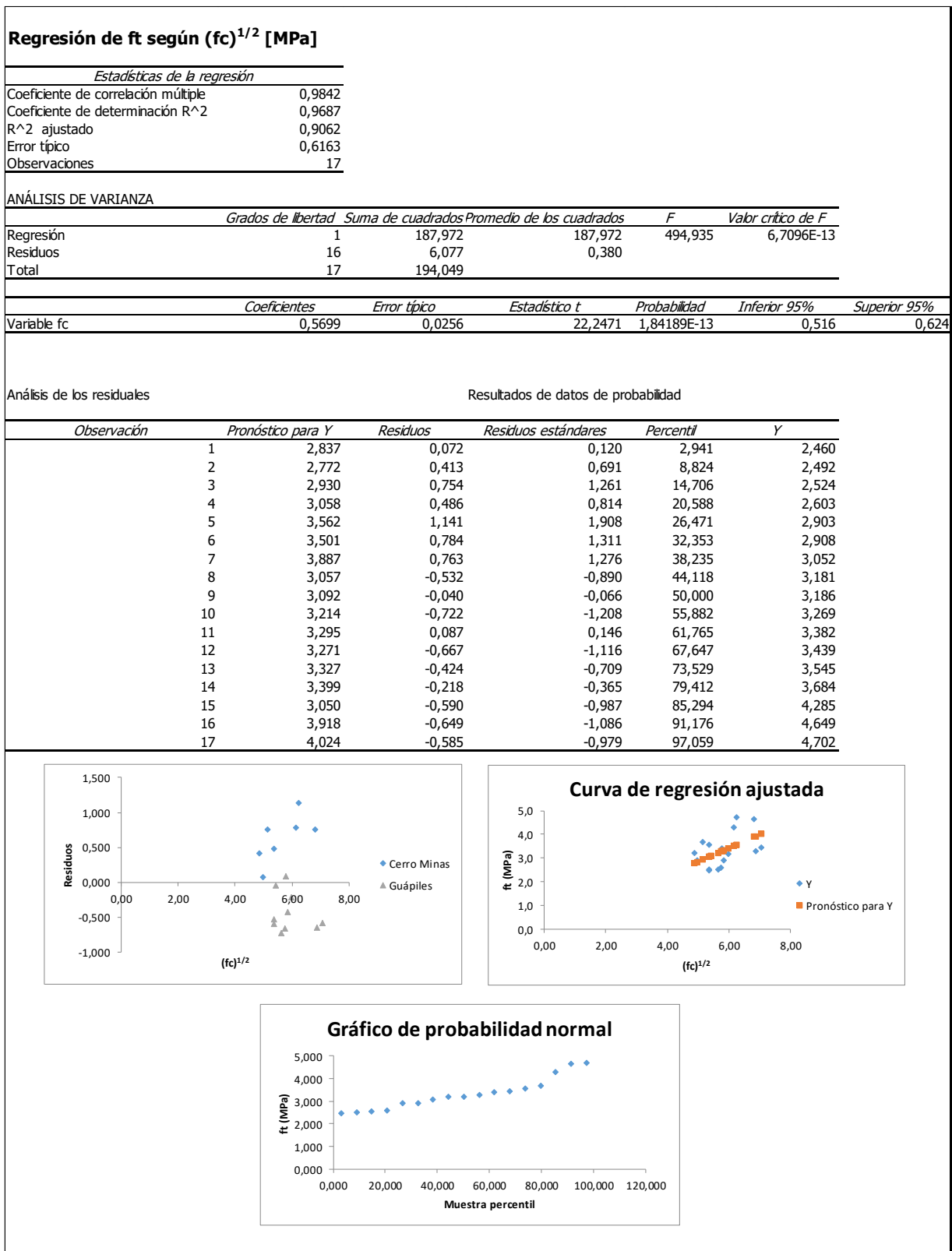
Observación	Pronóstico para Y	Residuos
1	294616,0946	-19765,42913
2	298346,6052	57970,77157
3	301757,1551	-6933,509085
4	314612,2365	29012,32401
5	371561,0599	135123,5384
6	358827,6475	92169,74377
7	395446,5111	-82741,04039
8	328236,9884	-44136,12735
9	316821,7481	-47561,17624
10	331263,6919	68745,23535
11	360615,7709	-23544,32263
12	343240,0104	-8986,990899
13	349155,8693	-62181,47614
14	356664,8203	82063,39794
15	320140,2076	10302,88385
16	411201,5528	-102570,2535
17	422277,0189	-45915,72126

Resultados de datos de probabilidad

Percentil	Y
2,941176471	269260,5719
8,823529412	274850,6654
14,70588235	284100,8611
20,58823529	286974,3931
26,47058824	294823,646
32,35294118	308631,2994
38,23529412	312705,4707
44,11764706	330443,0915
50	334253,0195
55,88235294	337071,4483
61,76470588	343624,5605
67,64705882	356317,3768
73,52941176	376361,2977
79,41176471	400008,9273
85,29411765	438728,2182
91,17647059	450997,3913
97,05882353	506684,5983



Anexo G.6. Regresión de resistencia a la tracción según la resistencia a la compresión a la misma edad de falla



Anexo H. Detalle de resultados de Análisis de Varianza

Anexo H.1. Análisis de varianza y prueba Tukey para resultados de módulo de elasticidad según edades de falla.

Datos para ANOVA			
Ec/fc			
28 días	56 días	50 días	63 días
925,14	995,38	701,57	1228,89
941,14	825,87		
1278,88	1210,00		
909,37	1131,16		
1110,95	640,38		
1404,44	740,49		
1135,94	1287,62		
1217,99			

ANOVA H0: No hay diferencia significativa entre las medias
H1: Al menos uno de los promedios varía de forma significativa

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza	Error Estándar	Inferior 95%	Superior 95%
28 días	8	8923,85	1115,48	32893,39	75,78	951,77	1279,19
56 días	7	6830,91	975,84	61158,77	81,01	800,83	1150,86
50 días	1	701,57	701,57	-	214,33	238,53	1164,61
63 días	1	1228,89	1228,89	-	214,33	765,85	1691,93

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	224604,80	3	74868,27	1,63	0,23	3,41
Dentro de los grupos	597206,34	13	45938,95			
Total	821811,14	16				

Resultado
No hay diferencia significativa

PRUEBA TUKEY HSD/KRAMER alpha 0,05

Grupo	Promedio	n	ss	df	q-crit
28 días	1115,48	8	230253,7158		
56 días	975,84	7	366952,6233		
50 días	701,57	1	0		
63 días	1228,89	1	0		
		17	597206,3391	13	4,151

Q TEST

Grupo 1	Grupo 2	Promedio	Error Estándar	q-stat	Inferior 95%	Superior 95%	p-value	Resultado
28 días	56 días	139,64	78,44	1,78	-185,96	465,23	0,60	No hay diferencias significativas
28 días	50 días	413,91	160,75	2,57	-253,36	1081,19	0,31	No hay diferencias significativas
28 días	63 días	113,40	160,75	0,71	-553,87	780,68	0,96	No hay diferencias significativas
56 días	50 días	274,28	162,02	1,69	-398,27	946,83	0,64	No hay diferencias significativas
56 días	63 días	253,04	162,02	1,56	-419,51	925,59	0,69	No hay diferencias significativas
50 días	63 días	527,32	214,33	2,46	-362,38	1417,02	0,34	No hay diferencias significativas

Anexo H.2. Análisis de varianza y prueba Tukey para resultados de resistencia a la tracción según edades de falla.

Datos para ANOVA			
Datos ANOVA			
28 días	56 días	50 días	63 días
0,09	0,08	0,11	0,10
0,10	0,09		
0,08	0,09		
0,10	0,09		
0,12	0,07		
0,13	0,07		
0,14	0,12		
0,12			

ANOVA H0: No hay diferencia significativa entre las medias
H1: Al menos uno de los promedios varía de forma significativa

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza	Error Estándar	Inferior 95%	Superior 95%
28 días	8	0,89	0,11	4,72E-04	0,01	0,10	0,13
56 días	7	0,60	0,09	3,03E-04	0,01	0,07	0,10
50 días	1	0,11	0,11	-	0,02	0,07	0,16
63 días	1	0,10	0,10	-	0,02	0,06	0,14

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,00	3	0,00	2,18	0,14	3,41
Dentro de los grupos	0,01	13	0,00			
Total	0,01	16				

Resultado
No hay diferencia significativa

TUKEY HSD/KRAMER alpha 0,05

Grupo	Promedio	n	ss	df	q-crit
28 días	0,11	8	0,00331		
56 días	0,09	7	0,00182		
50 días	0,11	1	0		
63 días	0,10	1	0		
		17	0,00512	13	4,151

Q TEST

Grupo 1	Grupo 2	Promedio	Error Estándar	q-stat	Inferior 95%	Superior 95%	p-value	Resultado
28 días	56 días	0,025	0,007	3,477	-0,005	0,055	0,114	No hay diferencias significativas
28 días	50 días	0,003	0,015	0,191	-0,059	0,065	0,999	No hay diferencias significativas
28 días	63 días	0,011	0,015	0,721	-0,051	0,073	0,955	No hay diferencias significativas
56 días	50 días	0,028	0,015	1,872	-0,034	0,090	0,565	No hay diferencias significativas
56 días	63 días	0,015	0,015	0,968	-0,048	0,077	0,901	No hay diferencias significativas
50 días	63 días	0,014	0,020	0,684	-0,069	0,096	0,961	No hay diferencias significativas