



Universidad de Cuenca



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería  
Carrera de Ingeniería Civil

## Análisis de factibilidad y sostenibilidad de hormigones estructurales con fibra de vidrio

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil.

### Autores:

Pedro Mauricio Muñoz Niveló

CI: 1751836345

Correo electrónico: pmauricio.munozn@gmail.com

Adrián Guillermo Martínez Criollo

CI: 1804063327

Correo electrónico: adrian.martinezgc@gmail.com

### Director:

Ing. Daniel Estuardo Mogrovejo Carrasco, PhD

CI: 0301500576

Cueca-Ecuador

18 de enero de 2021



## RESUMEN

El hormigón con fibra de vidrio tuvo su inicio en Rusia en 1940 dando origen a los fibrocementos. El hormigón presenta una buena resistencia a compresión, sin embargo, su principal problema es que carece de resistencia a tracción, la adición de fibra de vidrio, aumenta la resistencia a tracción atenuando este problema, además de brindar otras ventajas como: aligeramiento, control de fisuración, y presentando una resistencia residual que da origen a fallas de tipo dúctil. Se debe recalcar que el uso de la fibra de vidrio no es común en el Ecuador, a pesar que es más barata que la fibra de acero (fibra más usada).

Con el fin de comprobar el incremento de la resistencia a tracción en hormigones con inclusión de fibra de vidrio, se diseñó un hormigón patrón y 3 alternativos con diferentes porcentajes de fibra de vidrio, con el objetivo de encontrar la dotación óptima que nos presente los mejores resultados de: tracción, compresión, trabajabilidad y economía. Demostrando así la factibilidad y sostenibilidad de este hormigón.

Partiendo de investigaciones realizadas por otros autores, escogimos una longitud de fibra de 5cm con el fin de obtener la mayor adherencia entre la matriz cementicia y la interfaz de la fibra, y un porcentaje de partida de 0.5% de masa total del hormigón, los resultados demostraron una disminución excesiva de la trabajabilidad, haciendo que el hormigón sea de consistencia rígida, por esta razón disminuimos los porcentajes de fibra a: 0.25% y 0.35% obteniendo hormigones de consistencia plástica, y a su vez incrementos significativos en la resistencia a tracción, así como la disminución de su peso, sin embargo la resistencia a compresión se ve afectada levemente, es por esto que se utilizó un aditivo reductor de agua (Viscocrete 4100), con el fin de obtener resistencias a compresión mayores a la de un hormigón estructural (20Mpa)

Los resultados demostraron que la fibra de vidrio provoca un aumento significativo (34%) en la resistencia a tracción, directamente proporcional con el porcentaje de adición de la fibra. Además, la fibra de vidrio provoca una incorporación de aire, originando un aumento en su absorción y disminución de su peso.

Debido a la resistencia residual que proporciona la fibra de vidrio, las roturas a tracción y compresión presentaron fallas de tipo dúctil.

**Palabras Clave:** Hormigón con fibra de vidrio. Fibra de vidrio. Trabajabilidad. Resistencia a compresión. Resistencia a tracción. Falla de tipo dúctil.



## ABSTRACT

Fiberglass concrete began in Russia in 1940, giving rise to fiber cement. Concrete has good compressive strength; however, its main problem is that it lacks tensile strength, the addition of fiberglass increases the tensile strength, mitigating this problem, in addition to providing other advantages such as: lightening, control of cracking, and there was a residual resistance causing ductile type failures. It should be noted that the use of fiberglass is not common in Ecuador, although it is cheaper than steel fiber (the most used fiber).

In order to increase the tensile strength in concrete, we design a standard concrete and 3 alternative ones with different percentages of fiberglass, in order to find the optimal endowment that presents us with the best results of: traction, compression, workability and economy. Thus, demonstrating the feasibility and sustainability of this concrete.

Based on research carried out by other authors, we chose a fiber length of 5cm in order to obtain the greatest adherence between the cementitious matrix and the fiber interface, and a starting percentage of 0.5% of the total mass of the concrete, the results demonstrated an excessive decrease in workability, making the concrete of rigid consistency, for this reason we decreased the fiber percentages to: 0.25% and 0.35%, obtaining concretes of plastic consistency, and in turn significant increases in tensile strength, and weight decreases, however the compressive strength is slightly affected, that is why a water-reducing additive (Viscocrete 4100) was used, in order to obtain compressive strengths greater than that of structural concrete ( 20Mpa)

The results demonstrated that the fiberglass causes a significant increase (34%) in the tensile strength, directly proportional to the percentage of addition of the fiber. In addition, fiberglass causes an incorporation of air, causing an increase in its absorption and a decrease in its weight.

Due to the residual strength provided by fiberglass, tensile and compression breaks presented ductile type failures.

**Keywords:** Fiberglass concrete. Fiberglass. Workability Compressive strength. Tensile strength. Ductile type failure.



## INDICE GENERAL

<b>CAPITULO 1: INTRODUCCION .....</b>	<b>15</b>
1.1. ESTADO DEL ARTE .....	15
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.3. JUSTIFICACION .....	16
1.4. HIPOTESIS .....	16
1.5. OBJETIVOS .....	17
1.5.1. Objetivo general .....	17
1.5.2. Objetivos específicos.....	17
1.6. ALCANCE.....	17
<b>CAPITULO 2 MARCO TEORICO: MATERIALES Y METODOLOGIA.....</b>	<b>17</b>
2.1. MATERIALES .....	17
2.1.1. Agregados .....	17
2.1.2. Cemento .....	20
2.1.3. Agua .....	22
2.1.4. Aditivos químicos.....	22
2.1.5. Fibra de vidrio .....	24
2.1.6. Longitud de la fibra de vidrio .....	25
2.2. METODOLOGIA.....	26
2.2.1. Caracterización de los materiales.....	26
2.2.2. Dosificación del aditivo .....	28
2.2.3. Dosificación de la mezcla patrón.....	29
2.2.4. Dosificación de la fibra de vidrio .....	29
2.2.4.1. Según los autores del presente trabajo de titulación.....	38
2.2.5. Procedimiento de mezclado .....	39
2.2.6. Trabajabilidad: .....	43
2.2.7. Resistencia a compresión.....	44
2.2.8. Modos de falla típicas en cilindros de hormigón ensayados a compresión.....	44
2.2.9. Resistencia a tracción.....	45
2.2.10. Peso .....	46
2.2.11. Absorción y densidad .....	46
2.2.12. Ensayo de transmisión de pulso ultrasonico.....	47
2.2.13. Esclerometría.....	48
<b>CAPITULO 3: RESULTADOS Y ANÁLISIS.....</b>	<b>48</b>
3.1. CARACTERISACION DE LOS AGREGADOS.....	48
3.1.1. Granulometría .....	48



3.1.2. Densidad aparente (Suelta y compactada) .....	50
3.1.3. Densidad real y absorción: .....	51
3.1.4. Abrasión .....	53
3.2. DOSIFICACIONES EMPLEADAS .....	54
3.2.1. Hormigón patrón .....	54
3.2.2. Hormigón alternativo (con fibra de vidrio) .....	55
3.3. TRABAJABILIDAD .....	55
3.4. RESISTENCIA A COMPRESIÓN .....	57
3.4.1. Modo de falla .....	59
3.5. RESISTENCIA A TRACCIÓN .....	61
3.5.1. Influencia de la longitud de la fibra de vidrio: .....	62
3.6. DENSIDAD Y ABSORCIÓN .....	64
3.8. ENSAYO DE TRANSMISION DE PULSO ULTRASONICO .....	72
3.9. ANÁLISIS ECONÓMICO DE HORMIGONES ESTRUCTURALES CON FIBRA DE VIDRIO .....	81
3.10. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE HORMIGONES ESTRUCTURALES CON FIBRA DE VIDRIO .....	85
3.10.1. Análisis de costos de energía producida y el CO <sub>2</sub> emitido durante de construcción y Mantenimiento del tramo de vía propuesto .....	98
<b>CAPITULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>103</b>
4.1. CONCLUSIONES .....	103
4.1.1. Con respecto a la caracterización de los materiales pétreos .....	103
4.1.2. Con respecto al diseño de los hormigones .....	103
4.1.3. Con respecto a las propiedades físico-mecánicas de los hormigones .....	103
4.1.4. Con respecto al análisis de costos de los hormigones .....	105
4.1.5. Con respecto al análisis de sostenibilidad .....	105
4.2. RECOMENDACIONES .....	106
4.2.1. Metodologías y ensayos .....	106
4.2.2. Con respecto a investigación futura .....	106
<b>5. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>107</b>
<b>6. ANEXOS .....</b>	<b>110</b>
6.1. HOJA TECNICA DEL CEMENTO HOLCIM TIPO HE .....	110
6.2. HOJA TECNICA DEL ADITIVO SIKA VISCOCRETE 4100 .....	111
6.3. HOJA TECNICA DE LA FIBRA DE VIDRIO TIPO E .....	113
6.4. MATERIALES .....	114
6.5. HORMIGÓN PATRÓN .....	119
6.6. HORMIGÓN F0.25 .....	124



6.7. HORMIGÓN F0.35 .....	127
6.8. Hormigón F0.5 .....	131

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cemento Holcim HE .....	20
Tabla 2. Características físicas del Cemento Holcim HE (Holcim, Holcim Premium. Cemento hidráulico Tipo HE de alta resistencia inicial , 2015) .....	22
Tabla 3. Características del aditivo utilizado (SIKA, 2015). .....	23
Tabla 4. Dosificación según (Castro & Ojeda, 2019) .....	29
Tabla 5. Dosificación para m <sup>3</sup> de hormigón (Muñoz, 2007). .....	29
Tabla 6. Resistencia a compresión a los 28 días (Muñoz, 2007) .....	29
Tabla 7. Resistencia a Flexotracción (Muñoz, 2007) .....	30
Tabla 8. Trabajabilidad (Muñoz, 2007) .....	31
Tabla 9. Dosificación para m <sup>3</sup> de hormigón (Arango & Zapata, 2013). .....	31
Tabla 10. Resistencia a compresión a los 28 días (Arango & Zapata, 2013) .....	32
Tabla 11. Resistencia a Tensión (Arango & Zapata, 2013). .....	32
Tabla 12. Trabajabilidad (Arango & Zapata, 2013) .....	33
Tabla 13. Dosificación en peso seco para 1m <sup>3</sup> de hormigón H-25. .....	34
Tabla 14. Resultados de Ensayo de Trabajabilidad (Bravo Celis, 2003). .....	34
Tabla 15. Resultado de Ensayo a la compresión a los 28 días (Bravo Celis, 2003). .....	35
Tabla 16. Resultado de Ensayo de flexotraccion a los 28 días (Bravo Celis, 2003). .....	36
Tabla 17. Dosificación para m <sup>3</sup> de hormigón (Babar, et al., 2019) .....	36
Tabla 18. Resistencia a compresión a los 28 días (Babar, et al., 2019) .....	37
Tabla 19. Resistencia a Tracción indirecta (Babar, et al., 2019) .....	37
Tabla 20. consistencia según el asentamiento según (Castro & Ojeda, 2019) .....	43
Tabla 21. Granulometría del agregado fino .....	49
Tabla 22. Rango del Módulo de finura (NTC 174) .....	49
Tabla 23. Granulometría del agregado grueso .....	50
Tabla 24. Densidad aparente compactada y suelta (Agregado grueso) .....	51
Tabla 25. Densidad aparente compactada y suelta (Agregado fino) .....	51
Tabla 26. Densidad real y absorción (Agregado Grueso) .....	52
Tabla 27. Densidad real y absorción (Agregado fino) .....	53
Tabla 28. Grado de ensayo (Abrasión) .....	54
Tabla 29. Abrasión .....	54
Tabla 30. Dosificación del hormigón patrón (Corrección por absorción) .....	54
Tabla 31. Dosificación del hormigón patrón .....	54
Tabla 32. Dosificación del hormigón alternativo .....	55
Tabla 33. Asentamientos obtenidos .....	55
Tabla 34. Resistencia a compresión a los 7 días .....	57
Tabla 35. Resistencia a compresión a los 28 días .....	57
Tabla 36. Resistencia a tracción a los 7 días .....	61
Tabla 37. Resistencia a tracción a los 28 días .....	62
Tabla 38. Influencia de la longitud de la fibra de vidrio .....	62
Tabla 39. Dimensiones de los cilindros de hormigón .....	64
Tabla 40. Resultados Densidad y absorción 7 días .....	64
Tabla 41. Resultados Densidad y absorción 28 días .....	64
Tabla 42. Absorción vs Porcentaje de fibra de vidrio 28 días .....	66
Tabla 43. Índice de rebote obtenidos a los 7 días .....	67
Tabla 44 Valores reales de f'c (7 días) .....	67



Tabla 45 valores corregidos de $f'_c$ obtenidos por medio del ensayo esclerómetro (7 días).	69
Tabla 46 índice de rebote obtenido a los 28 días.	70
Tabla 47. Valores reales de $f'_c$ a los 28 días obtenidos del ensayo a compresión.	70
Tabla 48. Factor de Corrección a los 28 días.	71
Tabla 49. Resultados del ensayo de ultrasonido 7 días.	73
Tabla 50. Clasificación del concreto según la velocidad de transito ultrasónica (Pilicer, 2014).	74
Tabla 51. Datos crudos y caracterización de la condición del hormigón 28 días (Ensayo de Ultrasonido)	80
Tabla 52. Precios Unitarios de la Materia Prima. fuente: Índice de precios de materiales de construcción de la ACI.	82
Tabla 53 Precio del Hormigón por metro cubico.	83
Tabla 54. Tabla resumen de precios por metro cubico	83
Tabla 55. Datos tramo de carretera.	84
Tabla 56. Costo de hormigón Patrón para tramo de carretera.	84
Tabla 57. Costo de hormigón F0.35 para tramo de carretera.	85
Tabla 58. Análisis de costos del tramo de vía.	85
Tabla 59 Características de la carretera.	86
Tabla 60. Dimensiones de la subbase.	86
Tabla 61. Dosificación de materiales para la subbase.	86
Tabla 62. Densidades.	86
Tabla 63. Equipo de construcción.	87
Tabla 64. Numero de mantenimientos.	87
Tabla 65. Cantidades de materiales necesarios para 1km de carretera. (Hormigón Patrón).	88
Tabla 66. Producción de energía y $CO_2$ (Hormigón Patrón)	88
Tabla 67. Cantidad de energía y $CO_2$ emitido en la construcción, transporte y equipos. (Hormigón Patrón).	89
Tabla 68. Cantidades de materiales necesarios para 1km de carretera. (Hormigón con 0.35% de fibra).	91
Tabla 69. Producción de energía y $CO_2$ (Hormigón con 0.35% de fibra))	92
Tabla 70. Cantidad de energía y $CO_2$ emitido en la construcción, transporte y equipos. (Hormigón Patrón).	93
Tabla 71. Tabla comparativa de energía emitida entre el hormigón Patrón y el hormigón con 0.35% de fibra (F0.35).	95
Tabla 72. Distribución de la energía en la construcción y el mantenimiento.	95
Tabla 73. Tabla comparativa de $CO_2$ emitida entre el hormigón Patrón y el hormigón con 0.35% de fibra (F0.35).	97
Tabla 74. Distribución del $CO_2$ emitido a la atmósfera en el construcción y mantenimiento.	97
Tabla 75. Análisis de costos.	98
Tabla 76. Costo de energía producida y $CO_2$ emitido con diferentes porcentajes de mantenimiento	100
Tabla 77. Variación de costo total del tramo de vía en función del porcentaje de mantenimiento.	101



## INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Agregado Grueso.....	18
Ilustración 2. Agregado Fino. ....	19
Ilustración 3. fibra de vidrio. ....	24
Ilustración 4. Longitud de fibra de vidrio. ....	25
Ilustración 5. Ensayo granulométrico (finos).....	26
Ilustración 6. Ensayo densidad (finos).....	27
Ilustración 7. Aditivo "Viscocrete 4100" .....	28
Ilustración 8. Resistencia a compresión a los 28 días (Muñoz, 2007) .....	30
Ilustración 9. Resistencia a Flexotracción a los 28 días (Muñoz, 2007).....	30
Ilustración 10. Trabajabilidad (Muñoz, 2007).....	31
Ilustración 11. Resistencia a compresión a los 28 días (Arango & Zapata, 2013) .....	32
Ilustración 12. Resistencia a Tensión a los 28 días (Arango & Zapata, 2013) .....	33
Ilustración 13. Trabajabilidad (Arango & Zapata, 2013).....	33
Ilustración 14. Resultados de Ensayo de Trabajabilidad (Bravo Celis, 2003) .....	35
Ilustración 15. Resultado de Ensayo a la compresión a los 28 días (Bravo Celis, 2003)....	35
Ilustración 16. Resultado de Ensayo de Flexo Tracción a los 28 días (Bravo Celis, 2003)..	36
Ilustración 17. Resistencia a compresión a los 28 días (Babar, et al., 2019) .....	37
Ilustración 18. Resistencia a Tracción indirecta (Babar, et al., 2019). ....	38
Ilustración 19. Agregar 1/3 de agua a la mezcla.....	39
Ilustración 20. Agregar Cemento lentamente. ....	39
Ilustración 21. parar la concretera y desprender el cemento adherido. ....	40
Ilustración 22. 2/3 de agua restantes. ....	40
Ilustración 23. Colocar los 2/3 de agua restantes .....	41
Ilustración 24. Desprender el material adherido en las paredes de la mezcladora. ....	41
Ilustración 25. Agregar la fibra de vidrio lentamente.....	42
Ilustración 26. Finalmente mezclar por 2 últimos minutos. ....	42
Ilustración 27. Parar la concretera y extraer el hormigón. ....	43
Ilustración 28. Trabajabilidad. ....	43
Ilustración 29. Resistencia a compresión. ....	44
Ilustración 30. Fallas típicas a compresión en probetas de hormigón de acuerdo a la (ASTM C39, 2018) .....	45
Ilustración 31. Resistencia a Tracción indirecta.....	45
Ilustración 32. Peso. ....	46
Ilustración 33. ultrasonido. ....	47
Ilustración 34. esclerómetro. ....	48
Ilustración 35. Curva granulométrica del agregado fino.....	49
Ilustración 36. Cuerva granulométrica del agregado grueso.....	50
Ilustración 37. Trabajabilidad de las mezclas. ....	55
Ilustración 38. Asentamientos Vs % de FV.....	56
Ilustración 39. Asentamientos a diferentes longitudes de FV. ....	56
Ilustración 40. Resistencia a compresión a los 7 días. ....	57
Ilustración 41. Resistencia a compresión a los 28 días .....	58
Ilustración 42. Modo de falla 7 días. ....	59
Ilustración 43. Modo de falla 28 días. ....	60
Ilustración 44. Resistencia a tracción 7 días. ....	61
Ilustración 45. Resistencia a tracción a los 28 días .....	62
Ilustración 46. Área de influencia (Fibra L=5cm). ....	63



Ilustración 47. Área de influencia (Fibra L=1.2cm). ....	63
Ilustración 48. Peso seco vs Porcentaje de fibra de vidrio 7 días. ....	65
Ilustración 49. Peso seco vs Porcentaje de fibra de vidrio 28 días. ....	65
Ilustración 50 Absorción vs Porcentaje de fibra de vidrio 7 días. ....	66
Ilustración 51. Correlación del número de rebotes y $f'c$ (Proceq, S.F.) ....	68
Ilustración 52 Puntos desplazados de la curva de conversión (7 días)....	68
Ilustración 53 Curva de conversión desplazada hacia los puntos (7 días)....	69
Ilustración 54. Curva de conversión a los 28 días sin corregir.....	71
Ilustración 55. Curva de conversión a los 28 días multiplicando por el factor de corrección	72
Ilustración 56. Variabilidad de las velocidades en el ensayo del ultrasonido. ....	74
Ilustración 57. Distribución Normal de las velocidades del ensayo de ultrasonido.....	75
Ilustración 58. Distribución Normal de las velocidades obtenidas con el ensayo del ultrasonido a los 28 días .....	81
Ilustración 59 Variabilidad de las velocidades obtenidas con el ensayo del ultrasonido a los 28 días.....	81
Ilustración 60. Precio por metro cubico. ....	83
Ilustración 61. Perfil de carretera.....	86
Ilustración 62 Ilustración comparativa de energía emitida entre el hormigón Patrón y el hormigón con 0.35% de fibra. ....	96
Ilustración 63. Casas iluminadas con la energía emitida. ....	96
Ilustración 64. Ilustración comparativa de $CO_2$ emitido por el hormigón Patrón y el hormigón con 0.35% de fibra .....	97
Ilustración 65. vehículos que emiten el $CO_2$ producido en la construcción. ....	98
Ilustración 66. Análisis de costo energía producida y $CO_2$ emitido. ....	99
Ilustración 67. Costo de energía producida y $CO_2$ emitido con diferentes porcentajes de mantenimiento. ....	100
Ilustración 68. Costo total del tramo de vía con diferentes porcentajes de mantenimiento.101	101
Ilustración 69.secado del material (grava).....	114
Ilustración 70. secado del material (arena).....	114
Ilustración 71. Pesado del cemento Holcim HE.....	115
Ilustración 72. Fibra de vidrio tipo AR.....	115
Ilustración 73. Longitud de la fibra de vidrio AR. ....	116
Ilustración 74. Aditivo Sika Viscocrete 4100.....	116
Ilustración 75. Tamización del agregado grueso. (grava) .....	117
Ilustración 76. Matraz con agregado fino y agua. ....	117
Ilustración 77. Densidad superficialmente seca (SSS) .....	118
Ilustración 78. Mescla del hormigón Patrón.....	119
Ilustración 79. Trabajabilidad del hormigón Patrón.....	119
Ilustración 80. Peso del cilindro de hormigón Patrón.....	120
Ilustración 81. Ensayo esclerométrico en un cilindro de hormigón Patrón. ....	120
Ilustración 82. Ensayo de velocidad ultrasónica en un cilindro de hormigón Patrón. ....	121
Ilustración 83. Ensayo de resistencia a compresión en un cilindro de hormigón Patrón. ....	121
Ilustración 84. Falla frágil conseguida en la prensa hidráulica del hormigón Patrón (Resistencia a compresión).....	122
Ilustración 85. Ensayo de tracción indirecta del hormigón Patrón.....	122
Ilustración 86. Falla conseguida en la prensa hidráulica (Tracción indirecta) .....	123
Ilustración 87. Mezcla del hormigón con 0.25% de fibra del peso total.....	124
Ilustración 88. Trabajabilidad del hormigón con 0.25% de fibra de vidrio de su peso total	124
Ilustración 89. Ensayo de resistencia a la compresión de un cilindro con 0.25% de fibra de vidrio de su peso.....	125
Ilustración 90. Falla frágil – dúctil del hormigón con 0.25% de fibra de vidrio del peso.....	125



Ilustración 91. Ensayo de tracción indirecta del hormigón con 0.25% de fibra de vidrio del peso.....	126
Ilustración 92. Rotura por resistencia a la tracción indirecta del hormigón con 0.25% de fibra del peso.....	126
Ilustración 93. Mezcla del hormigón con 0.35% de fibra de vidrio del peso.....	127
Ilustración 94. Trabajabilidad del hormigón con 0.35% de fibra de vidrio del peso.....	127
Ilustración 95. Ensayo esclerométrico del cilindro de hormigón con 0.35% de fibra de vidrio del peso.....	128
Ilustración 96. Ensayo de velocidad ultrasónica del cilindro de hormigón con 0.35% de fibra de vidrio del peso.....	128
Ilustración 97. Falla dúctil en el ensayo de resistencia a la compresión.....	129
Ilustración 98. Falla frágil en el hormigón con 0.35% de fibra de vidrio de peso.....	129
Ilustración 99. Falla producida por el ensayo de tracción indirecta.....	130
Ilustración 100. Falla producida por tracción indirecta del hormigón con 0.35% de fibra de vidrio de peso.....	130
Ilustración 101. Trabajabilidad del hormigón con 0.5% de fibra de vidrio en peso.....	131
Ilustración 102. Ensayo de velocidad ultrasónica del hormigón con 0.5% de fibra de vidrio en peso.....	131
Ilustración 103. Ensayo de resistencia a la compresión del hormigón con 0.5% de fibra de vidrio en peso.....	132
Ilustración 104. Falla dúctil en el hormigón con 0.5% de fibra de vidrio en peso.....	132
Ilustración 105. Ensayo de tracción indirecta en el hormigón con 0.5% de fibra de vidrio en peso.....	133
Ilustración 106. Falla producida por el ensayo de tracción indirecta.....	133



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio  
Institucional

Adrián Guillermo Martínez Criollo en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Análisis de factibilidad y sostenibilidad de hormigones estructurales con fibra de vidrio”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 18 de enero del 2021

Adrián Guillermo Martínez Criollo

C.I: 1804063327



---

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio  
Institucional

---

Pedro Mauricio Muñoz Niveló en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Análisis de factibilidad y sostenibilidad de hormigones estructurales con fibra de vidrio”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 18 de enero del 2021

Pedro Mauricio Muñoz Niveló

C.I: 1751836345



### Cláusula de Propiedad Intelectual

Adrián Guillermo Martínez Criollo, autor/a del trabajo de titulación "Análisis de factibilidad y sostenibilidad de hormigones estructurales con fibra de vidrio", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 18 de enero de 2021

Adrián Guillermo Martínez Criollo

C.I: 1804063327



### Cláusula de Propiedad Intelectual

Pedro Mauricio Muñoz Nivel, autor/a del trabajo de titulación "Análisis de factibilidad y sostenibilidad de hormigones estructurales con fibra de vidrio", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 18 de enero de 2021

Pedro Mauricio Muñoz Nivel

C.I: 1751836345



## CAPITULO 1: INTRODUCCION

### 1.1. ESTADO DEL ARTE

Las Mezclas de hormigón con fibra de vidrio han sido usadas en diversos países del mundo (Rusia, Estados Unidos, Colombia, etc.) dando como resultados incrementos significativos en la tracción y tensión, ampliando así la utilización del hormigón para estructuras que trabajen a este tipo de esfuerzos como: vigas, muros estructurales e inclusive estatuas y obras artísticas las cuales por sus formas angulares y esbeltas necesitan altos módulos de elasticidad, estas construcciones no serían posible realizarlas con un hormigón normal, pero al adicionarle fibra de vidrio su realización es posible.

“Al adicionar fibra de vidrio mejoramos algunas propiedades tanto del hormigón como del mortero aumentando principalmente el esfuerzo a tracción, este método dio origen a los fibrocementos los cuales al inicio eran creados con fibra de asbesto o amianto pero debido a que este material producía efectos negativos en la salud de las personas fue prohibido en varios países y remplazado por diversos materiales como: acero, nylon, polipropileno, carbono, vidrio, etc.” (Sanchez & Sanchez, 1991)

En el Ecuador el hormigón normalmente es compuesto por cemento, agua, agregados, y aditivos de diferentes índoles como: reductores de agua, retardantes de fraguado, acelerantes de fraguado, etc. y si se requiere resistencia a tracción se recurre a colocar acero de refuerzo incrementando sustancialmente el costo de la mezcla, sin embargo como se mencionó anteriormente existen otros materiales que también pueden proporcionar resistencia a tracción al hormigón, como las fibras de diferentes materiales (acero, vidrio, etc.) A nivel nacional las fibras de acero son las más usadas mientras que la fibra de vidrio tiene poco uso debido a que no es muy conocida, sin embargo, la fibra de vidrio podría presentar resultados de tracción similares a la fibra de acero además de presentar múltiples beneficios adicionales como: un menor costo y un menor peso, por esta razón en la presente investigación se estudiara a detalle la factibilidad y sostenibilidad que presenta el hormigón con fibra de vidrio.

Debido a que investigadores de numerosos países han logrado con éxito mejorar las características del hormigón al emplear fibra de vidrio, esta investigación consta con una gran probabilidad de éxito y es de suma importancia realizarla, debido a que en el Ecuador como ya se mencionó antes, la fibra de vidrio no es muy usada, y sus propiedades se estarían desperdiando.

### 1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El hormigón es uno de los materiales más utilizados en el mundo dentro del ámbito ingenieril y arquitectónico, este es utilizado para numerosas construcciones como: vías, veredas, casas, monumentos, edificios, etc. El hormigón es considerado como uno de los materiales de gran importancia en el desarrollo de la humanidad, por esta razón resulta imprescindible realizar estudios e investigaciones enfocados en mejorar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de este, obteniendo así hormigones que permitan un mayor desarrollo ingenieril.

El presente trabajo surge de la necesidad de mejorar las características físico – mecánicas del hormigón principalmente la propiedad a tracción.



“El hormigón presenta muy buenas características ante la compresión, como les ocurre a las piedras naturales, pero ofrece muy escasa resistencia a la tracción, por lo que resulta inadecuado para piezas que tengan que trabajar a flexión o tracción.” (Osorio, 2013) Esta característica ha conducido a numerosas investigaciones y desarrollos para mejorar las resistencias ante estos sometimientos.

Una solución a este problema son las adiciones de otros materiales como es el caso de la fibra, la cual puede ser de diferentes naturalezas como: acero, sintéticas, naturales procesadas y no procesadas y en el caso de este estudio de vidrio.

### **1.3. JUSTIFICACION**

Con la adición de la fibra de vidrio se planea principalmente obtener la máxima capacidad a tracción sin afectar la capacidad a compresión del hormigón, para obtener la máxima resistencia a compresión del hormigón emplearemos cemento de alta resistencia y aditivos reductores de agua, mientras que para aumentar la resistencia a tracción del hormigón se empleara la fibra de vidrio como sustituto de los materiales pétreos, cabe recalcar que todos los materiales serán de origen nacional empleando: cemento Holcim tipo HE, aditivo reductor de agua y plastificante Viscocrete 4100 y agregados procedentes de minas de la región.

Otra de las ventajas del uso de la fibra de vidrio es evitar las fisuras por contracción plástica que se presentan generalmente en superficies horizontales, “debido a la evaporación excesivamente rápida del agua de la superficie del concreto. Las grietas pueden formarse durante las primeras horas después del vaciado, cuando la resistencia a la tracción del concreto es superada por las fuerzas de retracción.” (Osorio, 2013) Dado que, inmediatamente después de su vaciado, la resistencia a la tracción del concreto es casi de cero, la adición de cantidades incluso muy pequeñas de fibras de vidrio hace que el concreto pueda resistir las fuerzas de agrietamiento, consiguiendo al mismo tiempo una ligazón adecuada para soportar los esfuerzos al interior de la masa de hormigón.

### **1.4. HIPOTESIS**

Al agregarle al hormigón fibra de vidrio, el cual según (Godoy, 2015) “es un material compuesto consistente en fibras continuas o discontinuas embebidas en una matriz plástica con una densidad entre  $2\text{g/cm}^3$  y  $3\text{g/cm}^3$ ” otorgamos al hormigón grandes resistencias a tracción, además de proveer una falla dúctil, conjugada con un carácter inocuo y seguro.

Este material sirve principalmente para aumentar la resistencia a tracción en el hormigón, esto debido a la resistencia originada entre la interfaz de la fibra y la matriz cementicea, además al tratarse de un material con una densidad baja, la fibra sirve también para aligerar en cierto porcentaje al hormigón.

Consiguiendo de esta manera hormigones con excelentes características de resistencia tanto a compresión como a tracción, ampliando sustancialmente los tipos de uso que se puede dar a este material.



## 1.5. OBJETIVOS

### 1.5.1. Objetivo general

- Analizar la factibilidad y sostenibilidad del hormigón con diferentes porcentajes de fibra de vidrio en términos de: sus características físico - mecánicas, economía, y análisis de ciclo de vida.

### 1.5.2. Objetivos específicos

- Caracterización de los materiales pétreos que se utilizaran en el hormigón patrón y mezclas alternativas con fibra de vidrio.
- Diseñar y confeccionar el hormigón patrón.
- Investigar las características físico-mecánicas que presenta un hormigón alternativo con diferentes porcentajes y longitudes de fibra de vidrio.
- Encontrar el diseño alternativo óptimo de fibra de vidrio y confeccionar el hormigón alternativo que presente las mejores características.
- Comparar las características físico – mecánicas del hormigón patrón vs hormigón alternativo con fibra de vidrio en términos de: compresión, tracción, asentamiento, peso, densidad y calidad del hormigón (ultrasonido)
- Análisis de costos del hormigón patrón vs el hormigón alternativo (con el porcentaje óptimo de fibra de vidrio).
- Análisis de sostenibilidad del hormigón alternativo en términos de L.C.A.

## 1.6. ALCANCE

El proyecto incluye la realización y posterior análisis de 4 mezclas con diferentes porcentajes de adición de fibra de vidrio, así como la realización de ensayos físico-mecánicos (trabajabilidad, compresión, tracción, densidad, ultrasonido, esclerómetro) en cilindros de hormigón de 20cm de altura y 10cm de diámetro, se crearon 12 cilindros por mezcla ensayándolos a los 7 días y 28 días.

También se incluye un análisis económico de los hormigones patrón y alternativos, y un análisis del ciclo de vida de los mismos.

En base a los resultados y análisis obtenidos, se determinó una dotación optima de la fibra de vidrio en el hormigón.

## CAPITULO 2 MARCO TEORICO: MATERIALES Y METODOLOGIA

### 2.1. MATERIALES

#### 2.1.1. Agregados

Los agregados a utilizar deberán cumplir con la norma ASTM C33 para hormigón “esta norma sirve para definir los requisitos de granulometría para el agregado tanto fino como grueso, el tamaño máximo nominal del agregado, la calidad del agregado y otros requisitos específicos de clasificación, esta información es de vital importancia ya que en base a esta se obtendrá el tamaño máximo de agregado y las proporciones de agregado fino y grueso que formaran parte de la mezcla de hormigón.” (ASTM C33, 2018)

“Los agregados constituyen aproximadamente entre el 60% al 80% del volumen del hormigón. Por esta razón estos deben tener una adecuada resistencia mecánica, los



agregados no deben contener materiales que puedan causar deterioro del concreto (materiales de origen orgánico)" (Bohorquez, 2011).

## Agregado grueso



Ilustración 1. Agregado Grueso

El agregado grueso es el material que es retenido en su totalidad por el tamiz #4 o un tamiz superior, este es uno de los principales elementos que componen el hormigón, por ende, es muy importante realizar la elección correcta del agregado, para la elección de este se debe tomar en cuenta ciertas propiedades, como son: la absorción, desgaste, densidad, naturaleza, granulometría, etc.

De acuerdo a su naturaleza los agregados gruesos pueden ser:

Agregado redondeado: se obtiene principalmente de ríos, su grano es redondeado a causa de la rodadura que produce el cauce del río, este agregado nos proporciona una mayor trabajabilidad, un menor consumo de agua y una mayor limpieza.

Agregado triturado: es producto de un proceso mecánico de trituración de rocas, este agregado nos da una mayor resistencia a tracción debido a que la textura de este genera una mayor adherencia entre partículas, sin embargo, genera un mayor consumo de agua y una menor trabajabilidad.

“Es importante tener en cuenta que una correcta elección del agregado nos permitirá tener una mayor durabilidad y resistencia en el hormigón, además de ayudarnos a prevenir la segregación.” (Martinez, 2011)

La elección del tamaño máximo del agregado grueso deberá realizarse en función de las dimensiones de la pieza a crear, en este caso en función de las dimensiones del cilindro de hormigón, a mayor tamaño del agregado, se necesita una menor cantidad agua para el amasado, y también un menor contenido de cemento.

Los hormigones tanto patrón como alternativo deben mantener la granulometría, la forma y origen del agregado constantes, la granulometría debe ser continua, es decir que debe contar con todos los tamaños de agregado, obteniendo de esta forma un hormigón más regular, compacto y resistente.



Considerando lo descrito anteriormente, para el hormigón desarrollado en este estudio se utilizó agregado triturado con un tamaño de agregado máximo de 3/4" buscando de esta forma la mayor resistencia a tracción y compresión posible, Además de realizarse un cuarteo lo más homogéneo posible.

### Agregado fino



Ilustración 2. Agregado Fino.

El agregado fino o arena es el material que pasa en su totalidad el tamiz #4, la elección de este agregado influye directamente en la cantidad de agua a utilizar, y en el nivel de asentamiento que se quiera conseguir, entre las principales características que definen la calidad de este material tenemos, absorción, densidad, tamaño de grano, etc.

“El agregado fino se clasifica de acuerdo a su tamaño pudiendo ser: de grano fino, grano medio y grano grande, el agregado de grano medio y grande nos da una mayor resistencia a compresión y si se trata además de un grano redondeado nos da una mayor trabajabilidad, pero tienen el inconveniente de necesitar mucha más pasta de conglomerante para llenar sus huecos. Los agregados de grano fino (redondeados) por su parte requieren menor cantidad de agua de mezclado, pero producen hormigones con consistencia pegajosa y de difícil compactabilidad” (Martinez, 2011).

Considerando lo descrito anteriormente, para el hormigón desarrollado se empleará arena redondeada de grano medio, buscando una mayor trabajabilidad y mayor resistencia a compresión y tracción.



### 2.1.2. Cemento

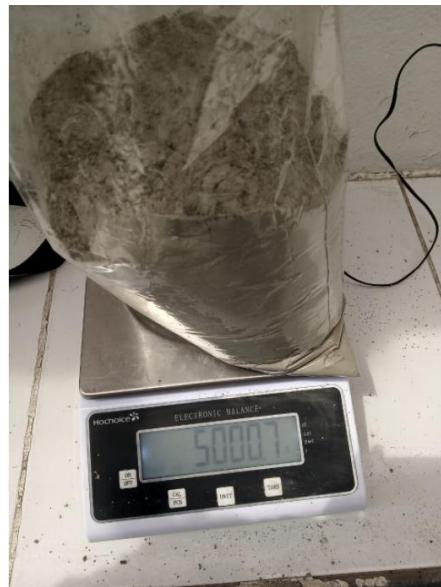


Tabla 1. Cemento Holcim HE.

El cemento a usarse deberá cumplir con las normativas ASTM C150 o C595 y la NTN INEN 152, el cemento es un material que se obtiene a partir de piedras caliza, arenas silíceas, arcilla, esquistos, etc. para producir el cemento se tiene que pasar por un complejo proceso industrial el cual consta de varias etapas, en estas se tritura la piedra caliza y se le mezcla con otros materiales para luego ser calentado a elevadas temperaturas en hornos especiales, esto provoca cambios químicos y físicos a las materias primas formándose así el Clinker. Finalmente se tritura el material resultante o Clinker hasta alcanzar un alto grado de finura.

“La característica más importante del cemento es que al mezclarse con cierta cantidad de agua, forma una pasta aglomerante que tiene propiedades adhesivas y cohesivas. Esta pasta, junto a los agregados forma el hormigón, el cual es el material más usado en el medio de las construcciones. La función principal del cemento en dicha mezcla es otorgarle a la misma fluidez y lubricación en estado fresco y la resistencia adecuada una vez que el concreto se encuentre en estado sólido” (Arango & Zapata, 2013).

#### Cemento portland

El cemento portland puede ser de diferentes tipos, los cuales son usados de acuerdo a las exigencias y necesidades que presente determinada construcción. Según la (ASTM C150, 2007) el cemento portland puede clasificarse en:

Tipo I: Este cemento se utiliza cuando no se requiere propiedades especiales.

Tipo IA: Posee los mismos usos que el cemento tipo I e adicionalmente incorporación de aire.

Tipo II: Este cemento es para uso general, en especial cuando se necesita una resistencia moderada a sulfatos o calor de hidratación moderado.



Tipo IIA: Posee los mismos usos que el cemento tipo II e adicionalmente incorporación de aire.

Tipo III: se utiliza cuando se desea una alta resistencia inicial o temprana.

Tipo IIIA: Posee los mismos usos que el cemento tipo III e adicionalmente incorporación de aire.

Tipo IV Se utiliza cuando se desea un bajo calor de hidratación.

Tipo V: Se utiliza cuando se desea una alta resistencia a los sulfatos.

Este tipo de cementos producen grandes cantidades de CO<sub>2</sub>, que se desprenden la atmósfera por procesos físico-químicos en su fabricación, es una de las razones por la cual este tipo de cementos está en desuso.

#### Cementos hidráulicos compuestos

Según (Holcim, Evolución de la normas, 2016) puede ser:

IP – Cemento portland puzolánico

IS – Cemento portland de escoria de altos hornos

IT – Cemento compuesto ternario

En Este tipo de cementos se sustituye en Clinker por componentes minerales, de tal manera que se logre cementos con desempeño parecidos a los cementos puros.

Una de las ventajas es que generan menor cantidad de CO<sub>2</sub> en su proceso de fabricación.

Cumple con *La normativa Nacional: NTE INEN 490*

#### Cementos hidráulicos por desempeño

Según (Holcim, Evolución de la normas, 2016) puede ser:

GU – Uso general

HE – Alta resistencia inicial

HS – Alta resistencia a los sulfatos

MS – Moderada resistencia a los sulfatos

MH – Moderado calor de hidratación

LH – Bajo calor de hidratación

Este tipo de cemento elimina restricciones en la composición química del cemento con el objetivo de cumplir con ciertos niveles de desempeño independientemente de cómo se logren los mismos.

El cemento que se utilizó en esta investigación es de la marca HOLCIM PREMIUM de tipo HE, el cual es un cemento hidráulico de alta resistencia, cumpliendo con la norma ecuatoriana NTE INEN 2380 (ASTM 1157).



Se lo llama HE por sus siglas en inglés de “high early-strength” (alta resistencia temprana).

### Especificaciones técnicas

#### Requisitos químicos

No se especifica la composición química para el cemento. Sin embargo, el cemento debe ser analizado para propósitos informativos.

#### Requisitos físicos

Características físicas (Cemento Holcim HE)		
	INEN 2380	Valor referencial
Cambio de longitud por autoclave, % máximo	0.8	-0.04
Tiempo de fraguado, método de Vicat		
No menos de, minutos	45	150
No más de, minutos	420	
Contenido de aire del mortero, en volumen, %		3
Resistencia a la compresión, MPa, mínimo		
1 día	12	14
3 días	24	25
7 días	-	32
28 días	-	40
Expansión en barras de mortero 14 días, % máx.	0.020	0.001

Tabla 2. Características físicas del Cemento Holcim HE (Holcim, Holcim Premium. Cemento hidráulico Tipo HE de alta resistencia inicial , 2015)

#### 2.1.3. Agua

El agua a utilizarse tanto para la creación de cilindros de hormigón como para su posterior curado debe cumplir con los requisitos de la norma (NTE INEN 1108, 2014) , el agua debe tener ciertas características como: presentar un nivel de PH similar a 5 o superior, no debe presentar materia orgánica, etc. esto con el fin de no perjudicar las propiedades del hormigón.

Se utilizó agua potable de la universidad de Cuenca, la cual es suministrada por la empresa pública ETAPA, cumpliendo con la norma NTE INEN 1108 y las características entes descritas.

#### 2.1.4. Aditivos químicos

Los aditivos son elementos que agregados al hormigón modifican ciertas propiedades de este, la cantidad de aditivo que se le agrega al hormigón depende de que tanto queremos modificar cierta propiedad del hormigón y del tipo de aditivo. El rango de adición de un aditivo puede ir desde 0.1% hasta el 5% del peso total del hormigón.

La eficiencia de un aditivo depende principalmente de: el porcentaje de aditivo a utilizarse, la marca del aditivo que se utilizara, la cantidad del material cementante, granulometría, dosificación del hormigón, tiempo de mezcla y temperatura del concreto.

En el presente trabajo se emplea un aditivo plastificante reductor de agua, el cual debe cumplir con la norma (ASTM C494, 2005) según esta norma los aditivos plastificantes se pueden clasificar en:



- Tipo A: Aditivos reductores de agua,
- Tipo B: Aditivos retardadores,
- Tipo C: Aditivos aceleradores,
- Tipo D: Aditivos reductor de agua y retardador,
- Tipo E: Aditivos reductor de agua y acelerador,
- Tipo F: Aditivos reductores de agua, de alto rango,
- Tipo G: Aditivos reductores de agua, de alto rango, y retardadores.
- Tipo S: Aditivos de comportamiento específico.

Para la creación de los hormigones tanto patrón como alternativo se seleccionó un aditivo tipo A reductor de agua (Viscocrete 4100), cuyo efecto principal es el aumento de la resistencia a compresión del hormigón.

Además de aumentar la resistencia en el hormigón, estos aditivos tienen múltiples beneficios los cuales según (Sika Ecuador, 2018) son los siguientes:

- Producir mezclas más fáciles de colocar, sin necesidad de aumentar ni el contenido de cemento, ni el contenido de agua.
- Reducir los esfuerzos de vibrado al plastificar el hormigón fresco.
- Disminuir los riesgos de colocar mezclas poco manejables en elementos densamente armados o en encofrados esbeltos.
- Reduce el costo por m<sup>3</sup> de hormigón al poder reducir la cantidad de cemento de la mezcla.
- No altera el tiempo del fraguado inicial de la mezcla.
- Disminuye los inconvenientes de mezclas con alto contenido de cemento.

Este aditivo posee las siguientes características físicas.

Características físicas (Viscocrete 4100)	
Características	ViscoCrete 4100
Aspecto	Líquido translúcido
Densidad	1.1 g/cc aprox
Dosis recomendada.	0.19% a 0.9% del peso del cemento.
Dosis empleada	0.9%

Tabla 3. Características del aditivo utilizado (SIKA, 2015).



### 2.1.5. Fibra de vidrio



Ilustración 3. fibra de vidrio.

La fibra de vidrio es de origen inorgánico (mineral), este es “un material compuesto consistente en fibras continuas o discontinuas de vidrio embebidas en una matriz plástica” (Arango & Zapata, 2013), la agregación de fibra de vidrio en el hormigón influye las propiedades mecánicas de este, en especial mejorando: la resistencia por compresión, impacto y esfuerzo de corte.

“La eficiencia de los hormigones con fibra radica principalmente en: la resistencia que posee la fibra y la cantidad de fibra agregada al hormigón; la longitud tanto como la forma de la fibra también influirá en la resistencia del hormigón; presentando una mayor resistencia las fibras con longitudes más largas debido a que la resistencia entre la interfaz de la fibra y la matriz cementicea aumenta, esto sucede de igual manera en fibras con secciones pequeñas y no circulares ya que presentan una mayor superficie por unidad de volumen, entonces podemos concluir que una alta relación Sección/diámetro produce un gran aumento en la resistencia a tracción, esta relación se denomina “Aspecto de la fibra”” (Carmona & Cabrera, 2009)

La fibra de vidrio genera una falla dúctil de la pieza del hormigón debido a que la falla se produce de forma gradual, esto depende en gran parte: del nivel de adherencia entre la fibra y la matriz cementicea, la orientación y disposición de las fibras y del grado en que se transmite la carga desde la matriz cementicea a las fibras. Evitando de esta forma que se produzcan fallas rápidas y posiblemente catastróficas.

Otras características importantes de la fibra de vidrio son que: al poseer una densidad baja aligera el hormigón, resulta ser muy económica, presenta un nivel alto de disponibilidad en el mercado nacional.

La fibra de vidrio puede ser de diferentes tipos, los cuales son utilizados dependiendo de las necesidades y características que se necesiten, según (Arango & Zapata, 2013) pueden ser:

- Tipo E: Este tipo de fibra posee características dieléctricas, bajo costo y una buena impermeabilización, se usa generalmente en la industria textil.
- Tipo R: I Este tipo de fibra posee altas propiedades mecánicas como resistencia a la fatiga, humedad y altas temperaturas, es utilizada para la industria aeronáutica.
- Tipo D: Este tipo de fibra posee características dieléctricas superiores, presentan cierta permeabilidad ante ondas electromagnéticas, son utilizadas para la fabricación de ventanas electromagnéticas.
- Tipo AR: Este tipo de fibra posee gran resistencia a los álcalis, es utilizada para reforzar el hormigón previniendo así la corrosión y mejorando la resistencia a tensión, la impermeabilidad y reduciendo la retracción en el fraguado.
- Tipo C: este tipo de fibra es resistente a agentes químicos. Se utiliza para recubrir materiales que son afectados por la corrosión.

Debido a la falta de disponibilidad de fibras de vidrio tipo AR en el mercado nacional, se eligió fibra de vidrio tipo E, la cual es la única disponible en la ciudad de Cuenca, Ecuador.

#### 2.1.6. Longitud de la fibra de vidrio



Ilustración 4. Longitud de fibra de vidrio.

La longitud de la fibra de vidrio es de suma importancia para producir una mejor transmisión de las cargas entre la matriz cementicea y la interfaz de la fibra, la longitud está condicionada por el tamaño máximo del árido grueso, obteniendo así un refuerzo eficiente del hormigón cuando el tamaño máximo del agregado grueso no sobrepase los 2/3 de longitud de la fibra.

De acuerdo a la relación que existe entre la longitud de la fibra a usar ( $L$ ) y de la longitud crítica ( $L_c$ ), la fibra de vidrio será considerada como:

- Fibra continua si:  $L > L_c$
- Fibra discontinua o corta si:  $L < L_c$



La longitud crítica se obtiene con la siguiente formula:

$$L_c = \frac{\sigma_f * d}{\tau_c}$$

Donde:

$\sigma_f$  = Resistencia a la tracción.

$\tau_c$  = Resistencia de la unión entre la matriz cementicea y la fibra.

$d$  = Diametro de la fibra.

Según (Bravo, 2003) para obtener los mejores resultados de resistencia y trabajabilidad se utilizan longitudes de fibra que normalmente oscilan entre los 6 y 25 mm.

Por motivos experimentales, con el fin de incrementar la longitud de desarrollo entre la matriz cementicea y la interfaz de la fibra aumentando de esta forma el área de resistencia frente a fuerzas de tracción, se empleó una longitud de fibra de 5cm.

## 2.2. METODOLOGIA

### 2.2.1. Caracterización de los materiales

Para la caracterización de agregados se propone los siguientes ensayos

- **Granulometría:**



Ilustración 5. Ensayo granulométrico (finos).

Se puede definir a la granulometría como la distribución, en porcentaje, de los distintos tamaños del agregado en una muestra.

Para evitar el uso excesivo de cemento, los agregados deben tener una buena “distribución granulométrica”, o sea, “que los granos sean de diversos tamaños y puedan así dejar el mínimo de huecos en la mezcla, esto se logra con una granulometría corrida, en la cual, los espacios de los tamaños mayores son llenados con los subsiguientes tamaños menores.” (Corral\*, 2012). Se seguirá la norma AASHTO T-27 para este ensayo.

- **Densidad Relativa**



Ilustración 6. Ensayo densidad (finos)

La Densidad, de un material se define, como la masa por unidad de volumen de un material, expresada en  $\text{kg}/\text{m}^3$  ( $\text{lb}/\text{pie}^3$ ). Para el caso de los agregados pueden obtenerse distintos valores, en función de la condición en que la masa se esté considerando en el cálculo, pudiéndose encontrar los agregados en las siguientes condiciones:

- Secados al horno (SH), condición en la cual han sido secados por calentamiento en un horno a  $110.5^\circ\text{C}$  por suficiente tiempo para alcanzar una masa constante.
- Saturados superficialmente secos (SSS), condición en la cual los poros permeables de las partículas de agregado son llenados con agua, a través de una prolongada inmersión en agua por un período de tiempo prescrito, pero sin agua libre sobre la superficie de las partículas.

La norma ASTM C 128 define y manda la determinación de las siguientes densidades:

- Densidad (SH), la masa de las partículas de agregado secadas al horno por unidad de volumen de partículas de agregado, incluyendo el volumen de poro permeables e impermeables en las partículas, pero sin incluir los vacíos entre ellas.
- Densidad (SSS), la masa de agregado saturado superficialmente seco por unidad de volumen de las partículas de agregado, incluyendo el volumen de vacíos impermeables y poros llenos de agua dentro de las partículas, pero no incluye los poros entre las partículas.
- Densidad aparente, la masa por unidad de volumen de la porción impermeable de las partículas de agregado.

- d) Densidad relativa (gravedad específica), la relación de la densidad de un material a la densidad del agua a una temperatura declarada, los valores son adimensionales.
- e) Densidad relativa (gravedad específica), (SH), la relación de la densidad (SH) del agregado a la densidad del agua a una temperatura declarada.
- f) Densidad relativa (gravedad específica), (SSS), la relación de la densidad (SSS) del agregado a la densidad del agua a una temperatura declarada.
- g) Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente), la relación de la densidad aparente de agregado a la densidad del agua a una temperatura declarada. (CAÑAS, 2010)

- **Absorción del agregado Fino**

Se conoce como absorción, al incremento en masa del agregado debido a la penetración de agua en los poros de las partículas, durante un período de tiempo prescrito, sin incluir el agua adherida en la superficie de las partículas, expresado como porcentaje de la masa seca. (CAÑAS, 2010). Para el cálculo de la absorción se seguirá el procedimiento detallado en la norma ASTM C 128 – 01.

- **Resistencia a la abrasión del Agregado Grueso.**

Este ensayo es una medida de la degradación de un agregado mineral de gradación estándar, resultado de una combinación de acciones incluyendo la abrasión o desgaste, impacto y trituración en un tambor de acero rotatorio que contiene un número específico de esferas de hacer, dependiendo de la granulometría de la muestra. La norma en la que se basa este ensayo es la ASTM C131.

#### 2.2.2. Dosificación del aditivo



Ilustración 7. Aditivo "Viscocrete 4100"

Se empleará un aditivo reductor de agua de alto rango y superplastificante, aumentando principalmente la trabajabilidad y resistencia a la compresión del hormigón, el porcentaje del aditivo que se incorporará al hormigón patrón y al alternativo será el máximo recomendado por la casa fabricante del aditivo. En el caso de este estudio se empleará el "aditivo Viscocrete 4100 de la casa fabricante Sika,



con un porcentaje máximo recomendado del 0.9% del peso del cemento, sugerido para reducciones de agua mayores al 25%.” (SIKA, 2015)

### 2.2.3. Dosificación de la mezcla patrón.

Se empleara la dosificación realizada por los autores José Castro y Gabriela Ojeda en la investigación denominada “Diseño y elaboración de hormigones especiales de alto desempeño” realizada en la Universidad de Cuenca, se escogió esta dosificación por los buenos resultados de resistencia a compresión y trabajabilidad obtenidos, además de trabajar con materiales similares a los de nuestra investigación, empleando agregados con características similares, mismo tipo de cemento (Holcim He) y miso aditivo reductor de agua (Viscocrete 4100).

Dosificación según (Castro & Ojeda, 2019)					
a/c	Agua (kg/m <sup>3</sup> )	Arena (kg/m <sup>3</sup> )	Grava (kg/m <sup>3</sup> )	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Viscocrete 4100 (kg/m <sup>3</sup> )
0.24	217.8	698.3	783.6	721.7	6.5

Tabla 4. Dosificación según (Castro & Ojeda, 2019)

### 2.2.4. Dosificación de la fibra de vidrio.

A continuación, se presenta un análisis de los resultados obtenidos por diferentes autores, al emplear diferentes porcentajes de fibra de vidrio, esto con el fin de utilizar la dosificación optima de estas investigaciones, en la realización de los hormigones del presente trabajo de titulación.

#### Según “COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO.”

En esta investigación realizada por (Muñoz, 2007) se empleó fibra de vidrio tipo AR con una longitud de 1.2cm como material adicional del hormigón, variando en porcentajes del 0%, 0.03%, 0.5%, 1% y 1.5% del peso total de la mezcla, se empleó la siguiente dosificación.

Dosificación para m <sup>3</sup> de hormigón (Muñoz, 2007)					
Relación a/c	Agua (Ltr)	Cemento (kg)	Grava (kg)	Gravilla (kg)	Arena (kg)
0.5	170	340	842	505	524

Tabla 5. Dosificación para m<sup>3</sup> de hormigón (Muñoz, 2007).

A medida que se va variando el porcentaje de incorporación de fibra de vidrio en la mezcla de hormigón, se obtienen los siguientes resultados de: compresión, flexo tracción y Dociilidad.

Resistencia a compresión a los 28 días (Muñoz, 2007)			
% Fibra de vidrio	Resistencia a compresión (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Variación (%)	
0	282	100	
0.03	285	101.1	
0.5	288	102.1	
1	291	103.2	
1.5	297	105.3	

Tabla 6. Resistencia a compresión a los 28 días (Muñoz, 2007).

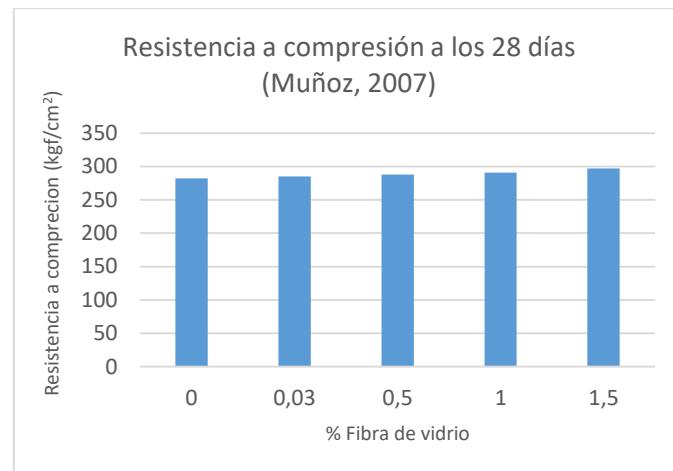


Ilustración 8. Resistencia a compresión a los 28 días (Muñoz, 2007)

La resistencia a compresión aumenta a medida que se incrementa la cantidad de fibra de vidrio, el máximo incremento es del 5.32% y se da con una incorporación del 1.5% de fibra de vidrio, se concluye que el incremento de la resistencia a compresión es mínima por lo tanto la fibra de vidrio no tiene mayor influencia en el aumento de la misma.

Resistencia a Flexotracción (Muñoz, 2007)		
% Fibra de vidrio	Resistencia a Flexotracción (Kgf/cm²)	Variación (%)
0	37.4	100
0.03	38.8	103.7
0.5	40.5	108.3
1	43	115
1.5	45	<b>120.3</b>

Tabla 7. Resistencia a Flexotracción (Muñoz, 2007).

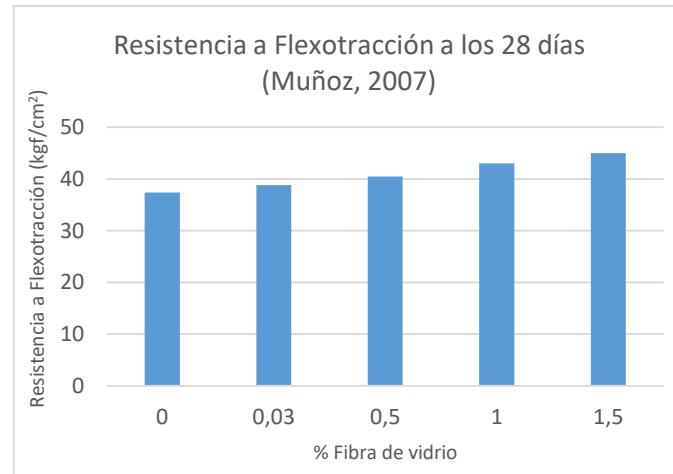


Ilustración 9. Resistencia a Flexotracción a los 28 días (Muñoz, 2007)..

El porcentaje de aumento de la resistencia a Flexotracción, va desde el 3.7% hasta un 20.32%, produciéndose un gran aumento con una dosis del 1% y del 1.5%, Concluyendo así que la incorporación de la fibra de vidrio es un factor relevante para el aumento de la resistencia a Flexotracción del hormigón



Trabajabilidad (Muñoz, 2007)		
% Fibra de vidrio	Cono (cm)	Variación (cm)
0	7.5	0
0.03	7	0.5
0.5	6.2	1.3
1	5.3	2.2
1.5	2.8	4.7

Tabla 8. Trabajabilidad (Muñoz, 2007)

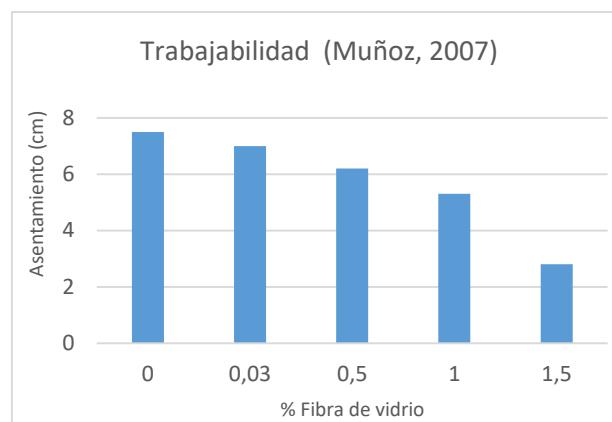


Ilustración 10. Trabajabilidad (Muñoz, 2007).

La fibra de vidrio afecta en gran medida a la docilidad, a medida que se incrementa el porcentaje de incorporación de la fibra el asentamiento de la mezcla disminuye, llegando a su máxima disminución del 4.7cm con la incorporación del 1.5% de fibra de vidrio, esta propiedad resulta imprescindible a la hora de escoger la dotación optima de fibra de vidrio, se observa que el máximo salto de variación del asentamiento se da en los porcentajes del 1% y 1.5%, pasando de una disminución del 2.2cm a 4.7cm.

En base a lo analizado, se estima una dotación optima del 1%, produciendo un incremento del 3.19% en la resistencia a compresión, un incremento del 14.97% en la resistencia a Flexotracción, y una disminución del asentamiento de 2.2cm, la cual se podría aceptar dependiendo del asentamiento inicial y el asentamiento buscado.

#### Según, “INFLUENCIA DE LA FIBRA DE VIDRIO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MEZCLAS DE CONCRETO”

En esta investigación realizada por (Arango & Zapata, 2013) se analizó la influencia de la fibra de vidrio en el comportamiento mecánico del hormigón, se empleó fibra de vidrio tipo AR, con una longitud de 1.2 cm como material adicional en porcentaje del peso total de la mezcla de hormigón, se empleó los siguientes porcentajes de fibra de vidrio: 0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5%, los cuales fueron adicionados a la siguiente dosificación patrón:

Dosisificación para $m^3$ de hormigón (Arango & Zapata, 2013)					
Relación a/c	Agua (Ltr)	Cemento (kg)	Grava (kg)	Arena (kg)	Aditivo (kg)
0.51	235	460	892	759	4.65

Tabla 9. Dosisificación para  $m^3$  de hormigón (Arango & Zapata, 2013).



De acuerdo a los porcentajes de fibra de vidrio agregados a la mezcla se obtuvieron los siguientes resultados de: Compresión, tensión, docilidad.

<b>Resistencia a compresión a los 28 días (Arango &amp; Zapata, 2013)</b>		
% Fibra de vidrio	Resistencia a compresión (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Variación (%)
0	311.01	100
0.5	305.91	98.4
1	312.03	100.3
1.5	297.75	95.7
2	265.12	85.3
2.5	145.82	<b>46.9</b>

Tabla 10. Resistencia a compresión a los 28 días (Arango & Zapata, 2013).

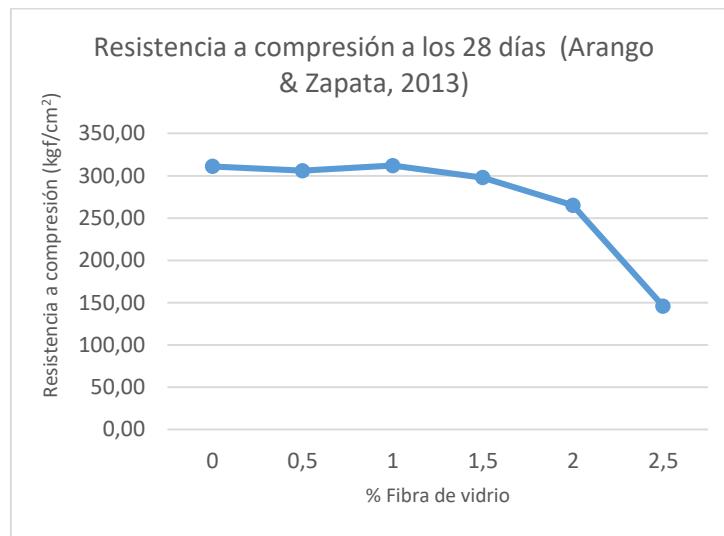


Ilustración 11. Resistencia a compresión a los 28 días (Arango & Zapata, 2013).

Con una adición de fibra de vidrio de hasta el 1.5% la resistencia a compresión tuvo un comportamiento similar a la resistencia a compresión del hormigón patrón, sin embargo, a partir de una adición del 2% y del 2,5%, la resistencia tendió a disminuir drásticamente llegando a una disminución del 46.89%

<b>Resistencia a Tensión a los 28 días (Arango &amp; Zapata, 2013)</b>		
% Fibra de vidrio	Resistencia a Tensión (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Variación (%)
0	36.71	100
0.5	40.38	110.
1	40.99	111.7
1.5	44.97	122.5
2	49.25	134.2
2.5	50.17	136.7

Tabla 11. Resistencia a Tensión (Arango & Zapata, 2013).

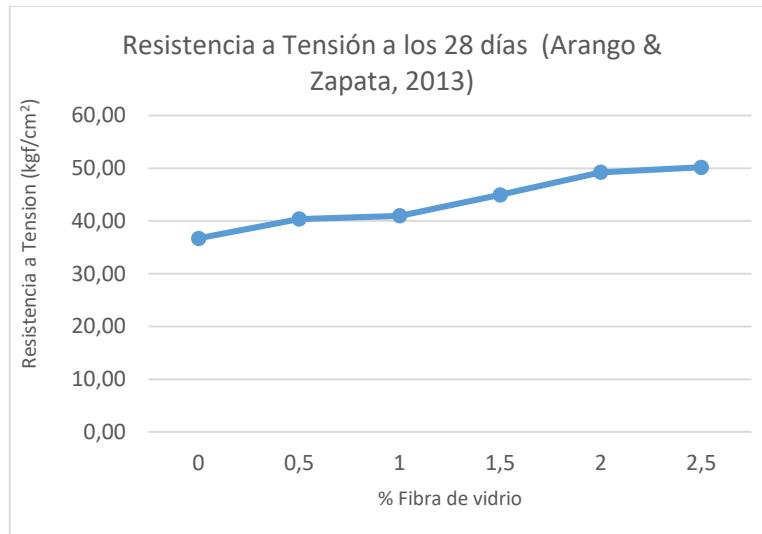


Ilustración 12. Resistencia a Tensión a los 28 días (Arango & Zapata, 2013)

A medida que se incrementa el porcentaje de fibra adicionada la resistencia a tensión tiende a subir, llegando a su máximo aumento del 36.67% con una adición del 2.5%, y un aumento del 11.7% con una adición de fibra del 1%, siendo aumentos relevantes en la resistencia a tensión.

Trabajabilidad (Arango & Zapata, 2013)		
% Fibra de vidrio	Cono (cm)	Variación (cm)
0	19.7	0
0.5	18	1.7
1	14	5.7
1.5	11	8.7
2	7	12.7
2.5	3	16.7

Tabla 12. Trabajabilidad (Arango & Zapata, 2013)

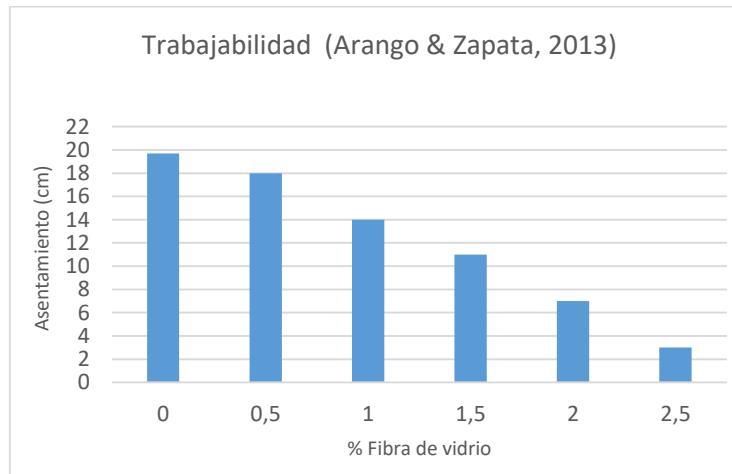


Ilustración 13. Trabajabilidad (Arango & Zapata, 2013).

El asentamiento de la mezcla disminuye a medida que se incrementa el porcentaje de fibra de vidrio, llegando a una disminución de 16.7 cm con un porcentaje del 2.5%, occasionando que la mezcla no sea trabajable.



La dosificación óptima en este trabajo de investigación fue del 1%, dotación que no afectó la resistencia a compresión, incrementó la resistencia a tensión en un 11.7% y cuyo asentamiento de 14cm corresponde a un hormigón trabajable.

### **Según “Comportamiento Mecánico del Hormigón Reforzado con Fibra de Vidrio: Influencia del Porcentaje de Fibra Adicionado”**

Al igual que el resto de investigaciones el objetivo de esta fue la de conocer la influencia de la fibra de vidrio en el comportamiento mecánico del hormigón, pero en esta investigación realizada por (Bravo Celis, 2003), la fibra de vidrio adicionada osciló entre el 0,05% y el 0,4% en peso del hormigón, un porcentaje mucho menor a los estudios anteriores.

<b>Dosificación en peso seco para <math>m^3</math> de hormigón H-25</b>						
Cement o(kg)	Grav a(kg)	Aren a (kg)	Agua de amasado. (kg)	Agua de Absorción. (Kg)	Aditivo Plastiment H.E.R.(Kg)	Relación agua/cement o
460	645	900	245	37	4.6	0.53

Tabla 13. Dosificación en peso seco para  $1m^3$  de hormigón H-25.

Los moldes utilizados en esta investigación fueron de forma prismática, con las siguientes medidas, 15 cm de ancho, 15 cm de alto y 53 cm de largo.

La fibra de vidrio utilizada es Álcali-Resistentes. El diámetro de la fibra es de 14 micras y su longitud de 12 mm.

Los porcentajes adicionados de fibra de vidrio en esta investigación están comprendidos entre valores del 0,05% al 0,4% en peso del hormigón.

<b>Resultados de Ensayo de Trabajabilidad (Bravo Celis, 2003).</b>		
Porcentaje de fibra de vidrio	Promedio Asentamiento de cono [cm]	Variación en porcentaje (%)
0%	7.8	100
0.05%	7.7	99
0.10%	7.3	95
0.20%	6.9	95
0.40%	6.3	91

Tabla 14. Resultados de Ensayo de Trabajabilidad (Bravo Celis, 2003).

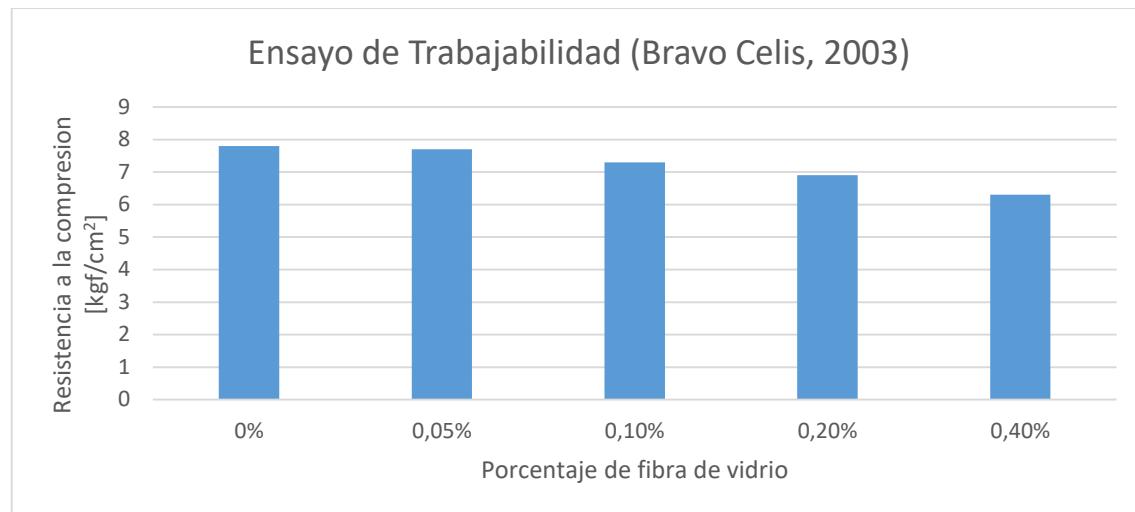


Ilustración 14. Resultados de Ensayo de Trabajabilidad (Bravo Celis, 2003).

El ensayo de trabajabilidad demostró que el porcentaje de fibra adicionado a la mezcla es inversamente proporcional a la trabajabilidad, teniendo su máximo asentamiento el hormigón patrón y su mínima trabajabilidad, en estos ensayos con el hormigón que se adicionó 0.4% de fibra de vidrio.

<b>Resultado de Ensayo a la compresión a los 28 días (Bravo Celis, 2003).</b>		
Porcentaje de fibra de vidrio	Promedio de Resistencia a la compresión [kgf/cm <sup>2</sup> ]	Variación en porcentaje (%)
0%	257	100
0.05%	262	102
0.10%	262	102
0.20%	263	102
0.40%	267	104

Tabla 15. Resultado de Ensayo a la compresión a los 28 días (Bravo Celis, 2003).

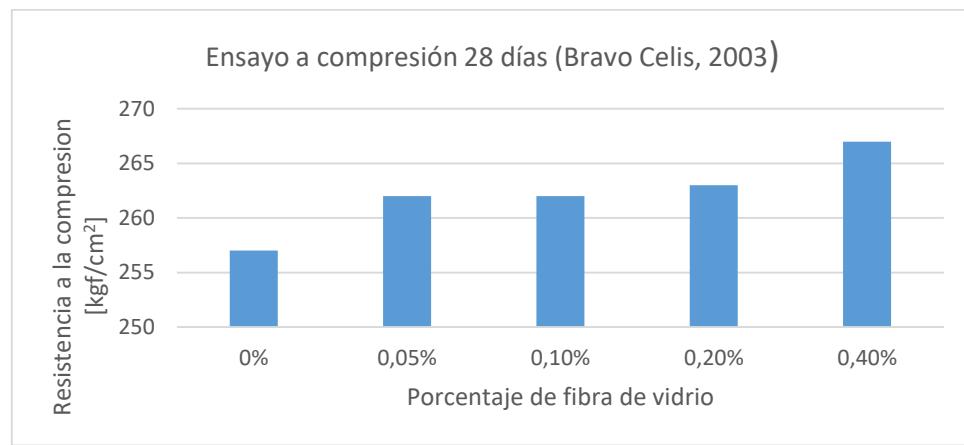


Ilustración 15. Resultado de Ensayo a la compresión a los 28 días (Bravo Celis, 2003).

El ensayo a compresión realizado en esta investigación demostró que las fibras de vidrio no mejoran de forma significativa la resistencia a compresión, llegando a un 4% más de resistencia comparado con el hormigón patrón.



Resultado de Ensayo de Flexo Tracción a los 28 días (Bravo Celis, 2003).		
Porcentaje de fibra de vidrio	Promedio de Resistencia a la flexo tracción [kg/cm <sup>2</sup> ]	Variación en porcentaje
0%	37.7	100
0.05%	39	103
0.10%	41.3	110
0.20%	44	117
0.40%	46.8	124

Tabla 16. Resultado de Ensayo de flexotracción a los 28 días (Bravo Celis, 2003).

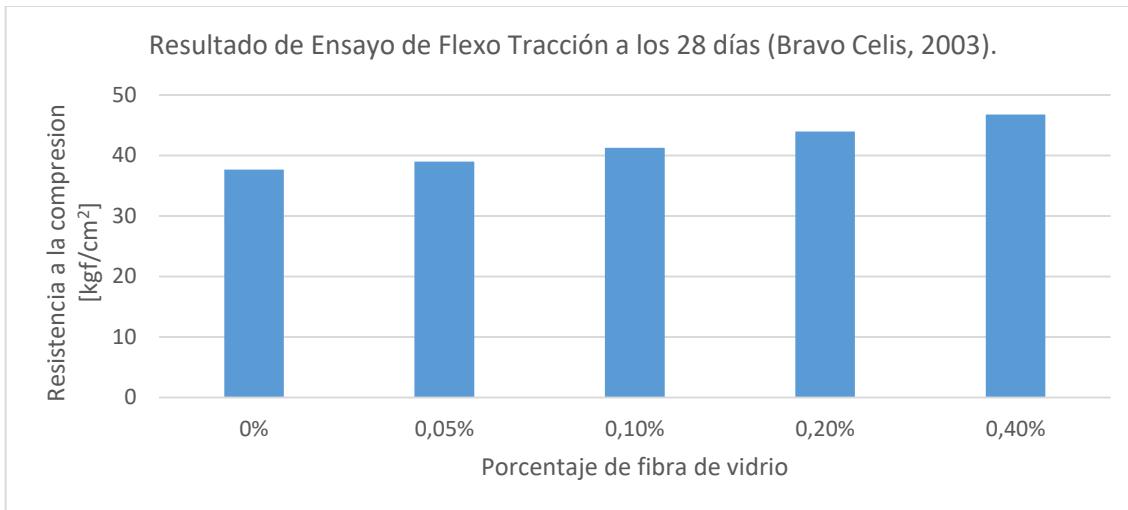


Ilustración 16. Resultado de Ensayo de Flexo Tracción a los 28 días (Bravo Celis, 2003).

A medida que se aumenta el porcentaje de fibra de vidrio, aumenta de manera significativa la resistencia del hormigón a la flexotracción, teniendo un incremento de hasta el 24%.

#### Según “Influence of Glass Fibers on Mechanical Properties of Concrete with Recycled Course Aggregates”

Este artículo realizado por (Babar, y otros, 2019) estudio la influencia de la fibra de vidrio en el hormigón, en porcentajes del 0.28%, 0.56% y 0.86% del peso total de la mezcla, Se empleó fibra de vidrio Tipo AR de una longitud de 1.8 cm, y se utilizó la siguiente dosificación patrón.

Dosisificación para m <sup>3</sup> de hormigón (Babar, et al., 2019)				
Relación a/c	Agua (Ltr)	Cemento (kg)	Grava (kg)	Arena (kg)
0.57	221.38	390	880	845

Tabla 17. Dosisificación para m<sup>3</sup> de hormigón (Babar, et al., 2019)

La trabajabilidad se mantuvo entre 8-10cm, para esto se agregó un mayor porcentaje de aditivo plastificante a medida que se aumentaba el porcentaje de fibra de vidrio.

En el artículo analizado se hicieron pruebas de compresión, tracción indirecta y flexión obteniendo los siguientes resultados.



Resistencia a compresión a los 28 días (Babar, et al., 2019)		
% Fibra de vidrio	Resistencia a compresión (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Variación (%)
0	397.07	100
0.28	435.51	109.7
0.56	430.93	108.5
0.83	422.77	106.5

Tabla 18. Resistencia a compresión a los 28 días (Babar, et al., 2019)

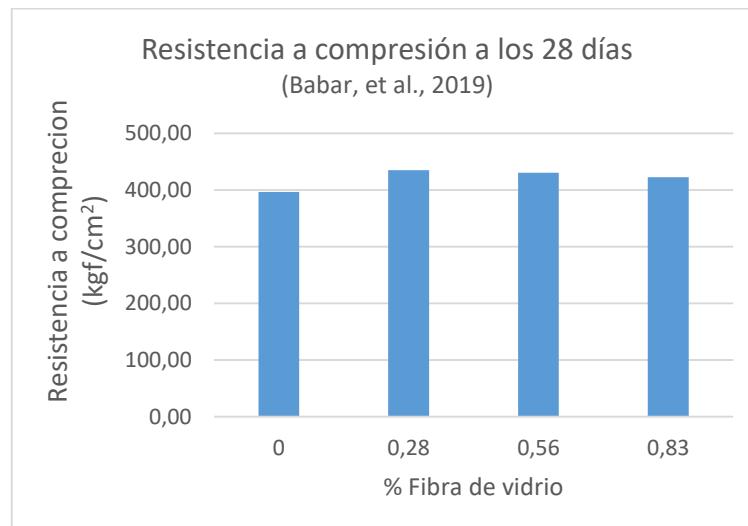


Ilustración 17. Resistencia a compresión a los 28 días (Babar, et al., 2019)

La resistencia a compresión tuvo su mayor aumento con un porcentaje del 0.56% de F.V. cabe recalcar que si bien la resistencia a compresión aumentó, este no es significativo.

Resistencia a Tracción indirecta (Babar, et al., 2019)		
% Fibra de vidrio	Resistencia a Tracción indirecta (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Variación (%)
0	32.02	100
0.28	36.40	113.7
<b>0.56</b>	<b>37.83</b>	<b>118.2</b>
0.83	37.22	116.2

Tabla 19. Resistencia a Tracción indirecta (Babar, et al., 2019).

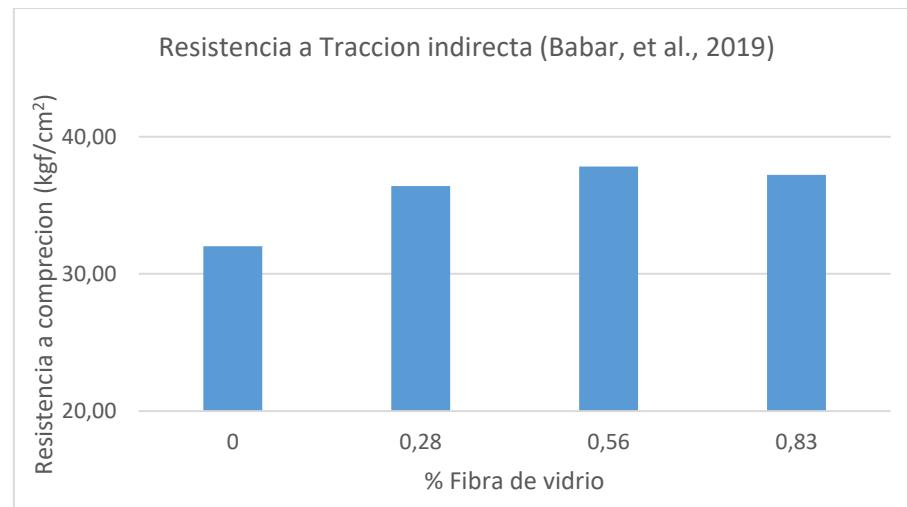


Ilustración 18. Resistencia a Tracción indirecta (Babar, et al., 2019).

La resistencia a tracción indirecta tuvo su mayor aumento con la incorporación de un 0.56% de F.V. aumentando un 18.15% en relación con el hormigón patrón.

El porcentaje óptimo según este artículo fue del 0.56% de F.V. el cual dio los mejores resultados tanto a Tracción como compresión.

#### 2.2.4.1. Segundo los autores del presente trabajo de titulación.

De acuerdo a las investigaciones analizadas, se confeccionó hormigones con 4 porcentajes de adición de fibra de vidrio con relación al peso total de la mezcla, partiendo de una dosificación de 0.5% (dotación óptima según (Babar, y otros, 2019).

En función de la trabajabilidad del hormigón con dosificación de 0.5% de fibra de vidrio, se eligió los demás porcentajes a analizar, en este caso debido a que la disminución de la trabajabilidad fue casi total en la mezcla de 0.5% de fibra de vidrio, se decidió disminuir el porcentaje de fibra, proponiendo los siguientes porcentajes de adición de fibra de vidrio:

- **0%** Hormigón patrón: este hormigón será utilizado para el análisis de la influencia de la fibra de vidrio en las propiedades mecánicas de los Hormigones alternativos.
- **0.25%** Hormigón Alternativo
- **0.35%** Hormigón Alternativo
- **0.5%** Hormigón alternativo: Dosis óptima según varios autores analizados, produciendo un aumento en la resistencia a tracción, además de no afectar la resistencia a compresión, produciendo aumento o disminuciones no relevantes. De acuerdo a la Bibliografía analizada, porcentajes mayores a este provocan que la trabajabilidad del hormigón disminuya drásticamente por debajo de límites recomendados.



### 2.2.5. Procedimiento de mezclado

1. Agregar la grava a la concretera.
2. Agregar 1/3 del agua de mezcla, y mezclar en la concretera por 30 segundos.



Ilustración 19. Agregar 1/3 de agua a la mezcla.

3. Agregar el cemento lentamente y mezclar por 1.5 minutos.



Ilustración 20. Agregar Cemento lentamente.

4. Parar la concretera y desprender el material adherido a las paredes de esta.



Ilustración 21. parar la concretera y desprender el cemento adherido.

5. Agregar la arena y mezclar por 30 segundos.
6. Colocar el aditivo en los 2/3 de agua restantes y agregarles a la mezcla, mezclar por 3 minutos.



Ilustración 22. 2/3 de agua restantes.



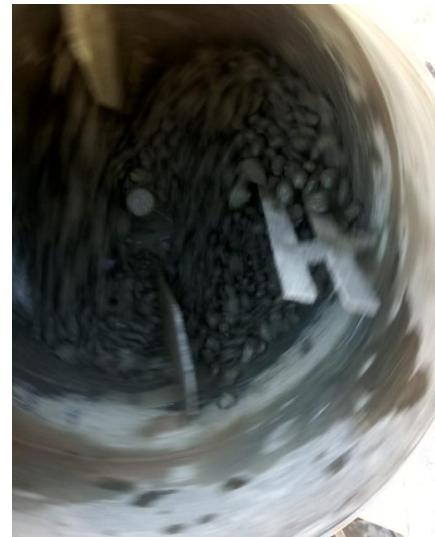
*Ilustración 23. Colocar los 2/3 de agua restantes*

7. Desprender el material adherido en las paredes y mezclar por 30 segundos.



*Ilustración 24. Desprender el material adherido en las paredes de la mezcladora.*

8. Agregar la fibra de vidrio de manera homogénea, haciendo que esta caiga a manera de una lluvia, de este modo esparciéndose por toda la mezcla evitando formar grumos.



*Ilustración 25. Agregar la fibra de vidrio lentamente.*

9. Mezclar por 2 minutos más y parar la concretera.



*Ilustración 26. Finalmente mezclar por 2 últimos minutos.*



Ilustración 27. Parar la concretera y extraer el hormigón.

#### 2.2.6. Trabajabilidad:



Ilustración 28. Trabajabilidad.

El ensayo de trabajabilidad se realizará de acuerdo a lo descrito en la norma ASTM C143 o H0304 del “MANUAL DE ENSAYOS DE SUELOS Y MATERIALES”, para esto se emplea el cono de abramos y según el asentamiento producido se clasificará según la siguiente tabla:

Consistencia	Asentamiento mm
Extremadamente seco	-
Muy rígido	-
Rígido	0 a 25
Plástico rígido	25 a 75
Plástico	75 a 125
Muy plástico	125 a 190

Tabla 20. consistencia según el asentamiento según (Castro & Ojeda, 2019).



### 2.2.7. Resistencia a compresión



Ilustración 29. Resistencia a compresión.

EL ensayo a compresión se realizará de acuerdo a lo indicado en la norma (ASTM C39, 2018) obteniendo así la resistencia a compresión del hormigón o deformación ante un esfuerzo de compresión, los resultados de este ensayo nos ayudará a determinar: la calidad, el uso que se le dará al hormigón y el cumplimiento de exigencias deseadas.

Para este ensayo se empleará una prensa, el cilindro de hormigón y dos neoprenos obteniendo de esta manera como primer resultado, la carga máxima aplicada al cilindro para posteriormente calcular resistencia a compresión mediante la siguiente formula:

$$f'c = \frac{P}{d^2 * \frac{\pi}{4}}$$

Donde:

$f'c$ : esfuerzo a compresión ( $kg/cm^2$ )

P: máxima carga aplicada (kgf)

d: diámetro del neopreno (cm)

### 2.2.8. Modos de falla típicas en cilindros de hormigón ensayados a compresión.

Los cilindros de hormigón pueden fallar de diferentes modos, el modo de falla depende de varios factores como: el tipo de cara de aplicación de carga de la probeta (convexa, cóncava, etc), deficiencias en el material de refrenado, Rugosidad en las



placas de carga, etc. según la (ASTM C39, 2018) los modos de fallas típicas en cilindros de hormigón son los siguientes:

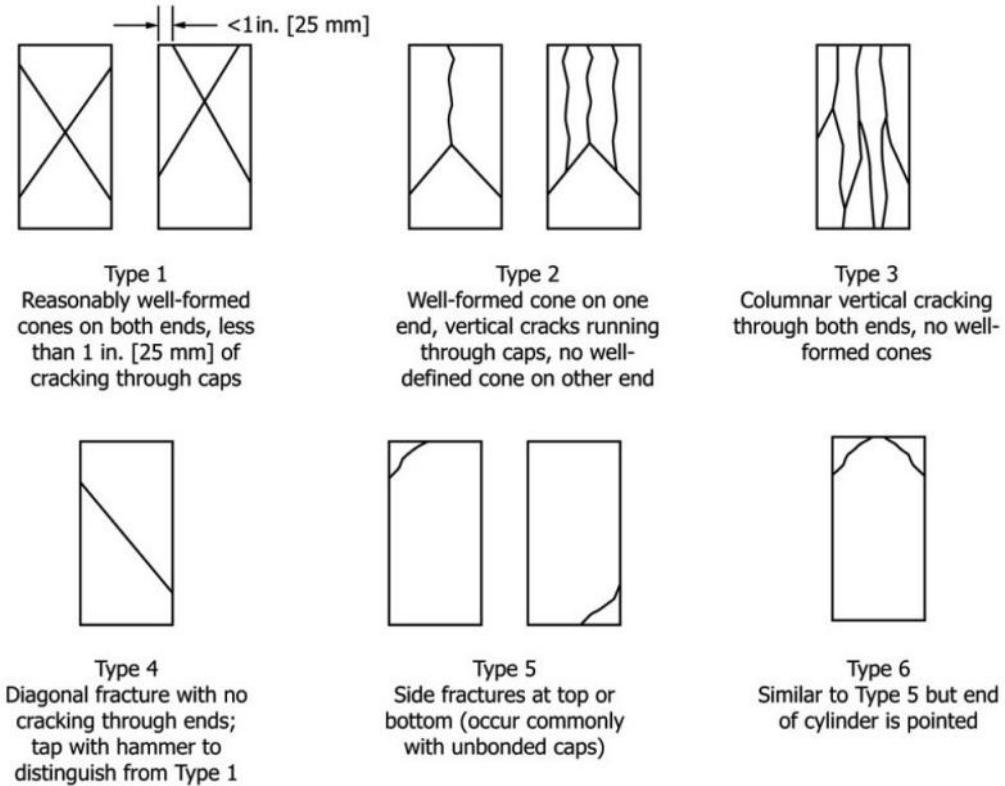


FIG. 2 Schematic of Typical Fracture Patterns

Ilustración 30. Fallas típicas a compresión en probetas de hormigón de acuerdo a la (ASTM C39, 2018)

## 2.2.9. Resistencia a tracción



Ilustración 31. Resistencia a Tracción indirecta.

La resistencia a tracción es una propiedad mecánica del hormigón esta propiedad se utiliza para: diseñar miembros estructurales de hormigón, calcular la longitud de



desarrollo del refuerzo y evaluar la resistencia a corte del hormigón. El ensayo de resistencia a tracción se realizará de acuerdo a lo especificado en la norma (ASTM C496, 2017)

Obteniendo así el esfuerzo a tracción mediante la siguiente formula:

$$T = \frac{2 * P}{\pi * l * d}$$

Donde:

T: esfuerzo de tracción ( $kg/cm^2$ )

P: máxima carga aplicada (kgf)

l: longitud del cilindro (cm)

d: diámetro del cilindro (cm)

#### 2.2.10. Peso



Ilustración 32. Peso.

Con la ayuda de una balanza se procederá a tomar el peso de los cilindros de hormigón con los diferentes porcentajes de fibra de vidrio, para así comparar el peso del hormigón alternativo con el hormigón patrón, y obtener el porcentaje de aligeramiento otorgado por la fibra debido a que este se considera como un material ligero.

#### 2.2.11. Absorción y densidad

La obtención de la densidad y del porcentaje de absorción del hormigón se realizará de acuerdo a lo especificado en la norma (ASTM C642, 1997), este procedimiento se basa principalmente en secar la probeta de hormigón mediante el uso del horno registrar su peso y volumen sumergir la probeta de hormigón por un periodo de hasta 48 horas e igualmente registrar su peso de esta manera obtenemos la absorción y densidad del hormigón.

### 2.2.12. Ensayo de transmisión de pulso ultrasonico.



Ilustración 33. ultrasonido.

Es un método no destructivo, utilizado para realizar un diagnóstico del hormigón y encontrar posibles patologías del mismo. La norma utilizada es la ASTM C-597.

Según la norma ASTM C-597, El ensayo consiste en calcular la velocidad de pulso producida por los pulsos de ondas de esfuerzo longitudinal, los cuales son generados por un transductor electro-acústico que es mantenido en contacto con una superficie de concreto bajo prueba. Después de atravesar el concreto, los pulsos son recibidos y convertidos en energía eléctrica por un segundo transductor colocado a una distancia L del transductor transmisor. El tiempo de transito T es medido electrónicamente. La velocidad del pulso V se calcula dividiendo L entre T. (ASTM C597 -16, 2016).

“La velocidad de pulso, V, de ondas longitudinales de esfuerzo en una masa de concreto es relativa a sus propiedades elásticas y su densidad de acuerdo con la siguiente relación”. (ASTM C597 -16, 2016).

$$v = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}$$

De donde:

E= Módulo de elasticidad dinámico.

$\rho$  = densidad.

$\mu$  =Relación de Poisson dinámica.



### 2.2.13. Esclerometría.



Ilustración 34. esclerómetro.

Es un método no destructivo, que sirve para comprobar la resistencia del hormigón en estructuras ya fabricadas. La norma utilizada es ASTM C805 / C805M - 18

El índice esclerométrico determinado por medio de este método puede ser utilizado para verificar la uniformidad del hormigón in situ, para determinar las zonas o áreas de hormigón en un soporte que tiene una escasa calidad o que estén estropeadas. (ASTM C805, 2018)

## CAPITULO 3: RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1. CARACTERISACION DE LOS AGREGADOS

Como agregado grueso se empleó grava triturada proveniente de la mina “ROCA AZUL” localizada en el sector el descanso de la parroquia Victoria del Portete –Azuay y como agregado fino se empleó arena de grano medio, proveniente del río Paute.

#### 3.1.1. Granulometría

El ensayo se realizó de acuerdo a lo especificado en la norma H0104 descrito en el “MANUAL DE ENSAYOS DE SUELOS Y MATERIALES, obteniendo los siguientes resultados

#### Granulometría agregado fino



Se empleó una muestra cuarteada de 600 gr, obteniendo los siguientes porcentajes de material retenido y que pasa.

GRANULOMETRÍA AGREGADO FINO					MF	3.07	
TAMIZ #	Abertura(mm)	%Passing (min)	%Passing (max)	Retenido (gr)	Retenido Parcial (%)	Retenido Acumulado (%)	% Pasa
4	4.75	100%	100%	0.00	0.00%	0%	<b>100.00%</b>
8	2.36	80%	100%	31.07	5.18%	5%	<b>94.82%</b>
16	1.18	50%	85%	217.60	36.27%	41%	<b>58.56%</b>
30	0.6	25%	60%	200.24	33.37%	75%	<b>25.18%</b>
50	0.3	5%	30%	82.12	13.69%	89%	<b>11.50%</b>
100	0.15	0%	10%	53.30	8.88%	97%	<b>2.61%</b>
200	0.074	0%	5%	8.41	1.40%	99%	<b>1.21%</b>
			Fondo	7.27	1.21%	100%	<b>0.00%</b>
			Total	600.00			

Tabla 21. Granulometría del agregado fino.

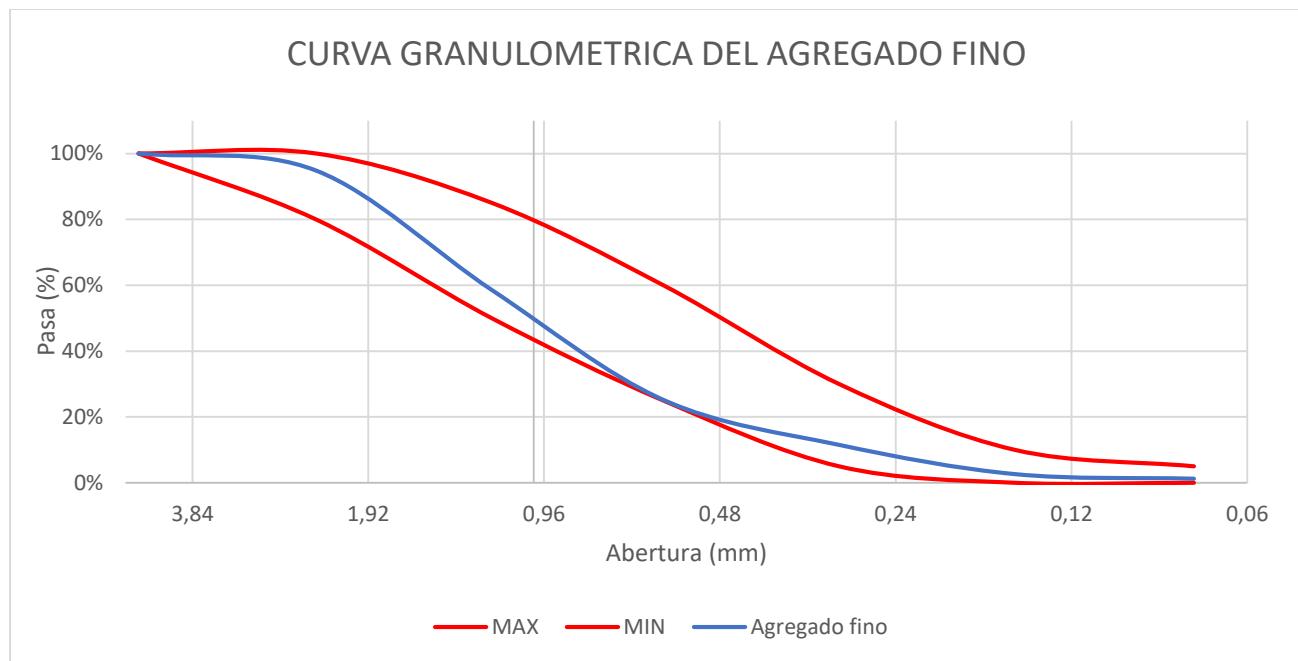


Ilustración 35. Curva granulométrica del agregado fino.

Se observa que la curva granulométrica se encuentra dentro de los límites establecidos en la norma ASTM C33 (tendiendo al límite mínimo), además al poseer un módulo de finura de 3.07, según la norma NTC 174 el material se consideraría como ideal.

Módulo de finura	
Ideal	2.8-3.4
Tolerable	2.7-3.5

Tabla 22. Rango del Módulo de finura (NTC 174)



### Granulometría agregado grueso

Se empleo una muestra cuarteada de 8000gr, obtenido los siguientes resultados de material pasante y retenido.

Granulometría agrado grueso						MF	1.90
TAMIZ #	Abertura(mm)	%Passing (min)	%Passing (max)	Retenido (gr)	Retenido parcial (%)	Retenido Acumulado (%)	Pasa (%)
1 ½	37.50	100%	100%	0.00	0.00%	0%	100%
1	25.00	100%	100%	0.00	0.00%	0%	100%
¾	<b>19.00</b>	<b>90%</b>	<b>100%</b>	<b>365.50</b>	<b>4.57%</b>	<b>5%</b>	<b>95%</b>
½	<b>12.50</b>	<b>20%</b>	<b>55%</b>	<b>4326.32</b>	<b>54.08%</b>	<b>59%</b>	<b>41%</b>
3/8	<b>9.50</b>	<b>0%</b>	<b>15%</b>	<b>2194.46</b>	<b>27.43%</b>	<b>86%</b>	<b>14%</b>
4	<b>4.75</b>	<b>0%</b>	<b>5%</b>	<b>1049.80</b>	<b>13.12%</b>	<b>99%</b>	<b>1%</b>
8	2.36	0%	0%	63.92	0.80%	100%	0%
		<b>Total</b>	<b>8000.00</b>				

Tabla 23. Granulometría del agregado grueso.

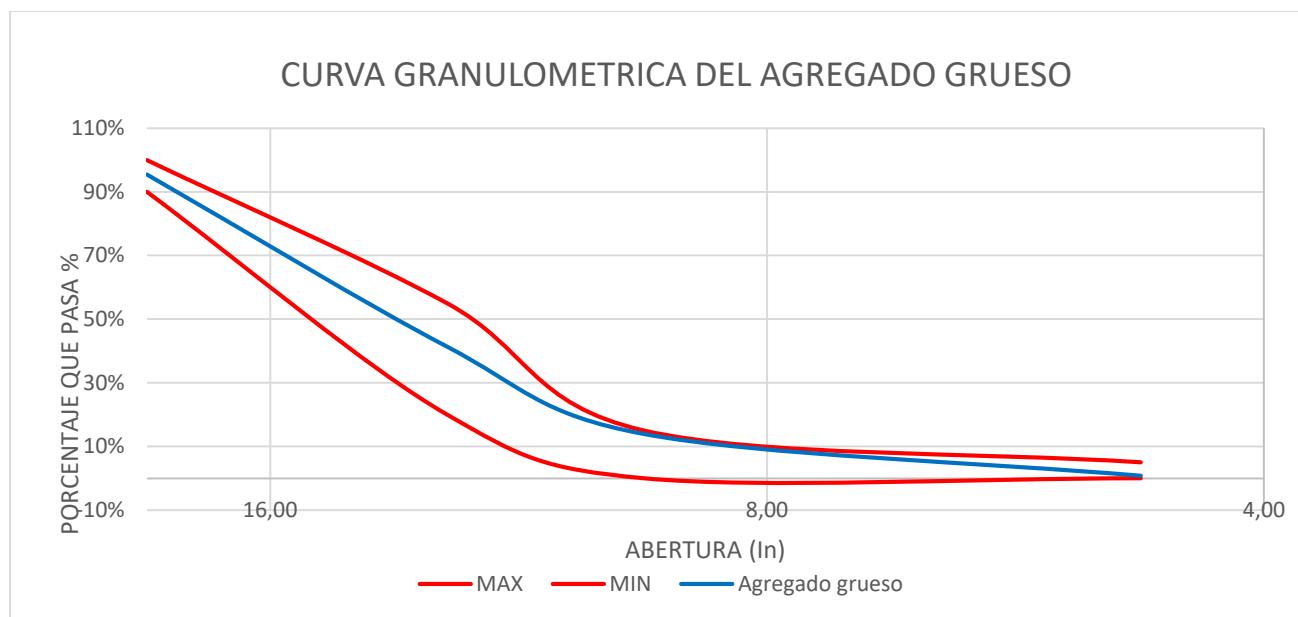


Ilustración 36. Curva granulométrica del agregado grueso.

Se observa que la curva granulométrica se encuentra dentro de los límites establecidos en la norma (ASTM C33, 2018) (tendiendo al límite máximo), considerándose un material bien graduado.

#### 3.1.2. Densidad aparente (Suelta y compactada)

Se emplea el ensayo H0108 descrito en el “MANUAL DE ENSAYOS DE SUELOS Y MATERIALES”, el cual se basa en las siguientes formulas.

$$\rho_{ac} = \frac{mc}{V}$$



$$\rho_{as} = \frac{ms}{V}$$

Donde:

mc= Masa compactada (kg)

ms= Masa suelta (kg)

V= Volumen ( $cm^3$ )

Se realizó dos ensayos para el caso de la arena y grava, los resultados fueron promediados

**Agregado grueso:**

Agregado grueso		
Datos		
Ensayos	1	2
Masa compactada (mc) (kg)	13.80	13.75
Masa suelta (ms)(kg)	12.73	12.67
Volumen ( $cm^3$ )	9901.907	
Resultados		
Densidad aparente compactada ( $\rho_{ac}$ ) ( $kg/m^3$ )	1391.237	
Densidad aparente suelta ( $\rho_{as}$ ) ( $kg/m^3$ )	1282.505	

Tabla 24. Densidad aparente compactada y suelta (Agregado grueso).

**Agregado fino:**

Agregado fino		
Datos		
Ensayos	1	2
Masa compactada (kg)	4.76	4.82
Masa suelta(kg)	4.235	4.227
Volumen ( $cm^3$ )	2944	
Resultados		
Densidad aparente compactada ( $\rho_{ac}$ ) ( $kg/m^3$ )	1627.038	
Densidad aparente suelta ( $\rho_{as}$ ) ( $kg/m^3$ )	1437.160	

Tabla 25. Densidad aparente compactada y suelta (Agregado fino).

### 3.1.3. Densidad real y absorción:

**Agregado grueso**

Se emplea el ensayo H0109 descrito en el “MANUAL DE ENSAYOS DE SUELOS Y MATERIALES”, el cual se basa en las siguientes formulas:

$$\rho_{sss} = \frac{M_{sss}}{M_{sss} - M_{sum}} * 1000 (kg/m^3)$$



$$\rho_{RS} = \frac{M_s}{M_{sss} - M_{sum}} * 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$\rho_N = \frac{M_s}{M_s - M_{sum}} * 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$\alpha = \frac{M_{sss} - M_s}{M_s} (\%)$$

Donde:

$M_{sss}$ : Masa saturada superficialmente seca (gr)

$M_{sum}$ : Masa sumergida (gr)

$M_s$ : Masa seca (gr)

$\rho_{sss}$ : Densidad real de áridos en estado SSS (Kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_{RS}$ : Densidad real de áridos seco (Kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_N$ : Densidad neta (Kg/m<sup>3</sup>)

$\alpha$ : Absorción de agua (%)

Obteniendo:

Agregado grueso		
Datos		
Masa saturada superficialmente seca (M <sub>sss</sub> )	3036.50	gr
Masa sumergida (M <sub>sum</sub> )	1884.00	gr
Masa seca (M <sub>s</sub> )	3000.00	gr
Resultados		
Densidad real de áridos en estado SSS ( $\rho_{sss}$ )	2634.707	Kg/m <sup>3</sup>
Densidad real de áridos seco ( $\rho_{RS}$ )	2603.037	Kg/m <sup>3</sup>
Densidad neta ( $\rho_N$ )	2688.172	Kg/m <sup>3</sup>
Absorción de agua ( $\alpha$ )	1.217	%

Tabla 26. Densidad real y absorción (Agregado Grueso).

### Agregado fino

Se emplea el ensayo H0110 descrito en el “MANUAL DE ENSAYOS DE SUELOS Y MATERIALES”, el cual se basa en las siguientes formulas (Perez, y otros, 2007):

$$\rho_{sss} = \frac{M_{sss}}{M_a + M_{sss} - M_m} * 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$\rho_{RS} = \frac{M_s}{M_a + M_{sss} - M_m} * 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$\rho_N = \frac{M_s}{M_a + M_s - M_m} * 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$



$$\alpha = \frac{M_{sss} - M_s}{M_s} (\%)$$

Donde:

$M_{sss}$ : Masa saturada superficialmente seca (gr)

$M_s$ : Masa seca (gr)

$M_m$ : Masa del matraz + agua + muestra (gr)

$M_a$ : Masa del matraz + agua (gr)

$\rho_{sss}$ : Densidad real de áridos en estado SSS (Kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_{RS}$ : Densidad real de áridos seco (Kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_N$ : Densidad neta (Kg/m<sup>3</sup>)

$\alpha$ : Absorción de agua (%)

Obteniendo:

Agregado fino		
Datos		
Masa seco (Ms)	57.3	gr
Masa Saturada superficialmente seco (Msss)	60	gr
Masa (matraz+agua+muestra) (Mm)	422.8	gr
M (matraz+agua) (Ma)	389.4	gr
Resultados		
Densidad real de áridos SSS ( $\rho_{sss}$ )	2255.639	kg/m <sup>3</sup>
Densidad real de áridos seco ( $\rho_{RS}$ )	2154.135	kg/m <sup>3</sup>
Densidad neta ( $\rho_N$ )	2397.49	kg/m <sup>3</sup>
Absorción de agua ( $\alpha$ )	4.712	%

Tabla 27. Densidad real y absorción (Agregado fino).

### 3.1.4. Abrasión

Se emplea el ensayo H0111 de “MANUAL DE ENSAYOS DE SUELOS Y MATERIALES”, el cual se basa en las siguientes formula:

$$P\% = \frac{(mi - mf)}{mi} * 100$$

Donde:

mi: Masa inicial (gr)

mf: Masa final (gr)

P: Pérdida de masa(%)

Debido a que el agregado posee un tamaño máximo nominal de  $\frac{3}{4}$ " se emplea un grado de ensayo # 5 el cual tiene las siguientes características:



Grado de ensayo # 5		
Tamaño nominal máximo	3/4	in
3/4"-1/2"	2500±10	gr
1/2"-3/8"	2500±10	gr
Masa inicial (mi)	5000±10	gr
# esferas	11	
# revoluciones	500	

Tabla 28. Grado de ensayo (Abrasión)

Obteniendo el siguiente porcentaje de perdida de muestra (desgaste)

Resultados Abrasión		
Masa inicial (mi)	5004.5	gr
Masa final (mf)	4139.1	gr
Pérdida de masa (P)	<b>17.29</b>	%

Tabla 29. Abrasión.

según las especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes (MOP-001-F 2002) se permite un porcentaje de desgaste a la abrasión de hasta un 50% como máximo para pavimentos de hormigón.

Según la ASTM C131, AASHTO T96 Y LA INEN 860 permiten una perdida por abrasión de hasta un 35 % para pavimentos de hormigón.

Según la ACI, la abrasión no constituye una consideración estructural en el caso de construcción de columnas, vigas, losas.

En base a los límites establecidos por la MOP, ASTM, AASHTO, INEN, el porcentaje de desgaste obtenido, está dentro de los rangos permitidos para la construcción de estructuras de hormigón.

### 3.2. DOSIFICACIONES EMPLEADAS

#### 3.2.1. Hormigón patrón

Para la creación del hormigón patrón se empleó la dosificación descrita en la sección 2.2.3, a la cual se le realiza una corrección por absorción de los agregados:

Dosificación para $m^3$ de hormigón patrón (Corrección por absorción)								
a/c	Agua (kg)	Cemento (kg)	Arena (kg)	Grava (kg)	Viscocrete 4100 (kg)	Agua adicional para arena (kg)	Agua adicional para grava (kg)	Agua total (kg)
0.25	180.43	721.7	689.3	783.6	6.50	32.48	9.53	215.94

Tabla 30. Dosificación del hormigón patrón (Corrección por absorción).

Obteniendo la siguiente dosificación del hormigón patrón para  $m^3$

Dosificación para $m^3$ de hormigón patrón					
a/c	Agua (kg)	Cemento (kg)	Grava (kg)	Arena (kg)	Viscocrete 4100 (kg)
0.25	215.94	721.7	783.6	689.3	6.5

Tabla 31. Dosificación del hormigón patrón.

Esta dosificación será utilizada también para realizar el hormigón alternativo con los diferentes porcentajes de adición de fibra de vidrio que serán planteados posteriormente.



### 3.2.2. Hormigón alternativo (con fibra de vidrio)

Se emplea los porcentajes de fibra de vidrio descritos en la sección 2.2.4, obteniendo las siguientes dosificaciones de hormigones alternativos para m<sup>2</sup>.

Mezclas (m <sup>3</sup> )									
Código	Relación a/c	Agua (kg/m <sup>3</sup> )	Cemento (kg)	Arena (kg)	Grava (kg)	% Aditivo	Aditivo (kg)	% Fibra	Fibra (kg)
P	0.25	215.94	721.70	689.30	783.60	0.90	6.50	0.00	0.00
F0.25	0.25	215.94	721.70	689.30	783.60	0.90	6.50	0.25	6.04
F0.35	0.25	215.94	721.70	689.30	783.60	0.90	6.50	0.35	8.46
F0.5	0.25	215.94	721.70	689.30	783.60	0.90	6.50	0.5	12.09

Tabla 32. Dosificación del hormigón alternativo.

### 3.3. TRABAJABILIDAD

Mezcla	P	F0.25	F0.35	F0.5
Trabajabilidad				

Ilustración 37. Trabajabilidad de las mezclas.

Los ensayos de trabajabilidad se realizaron según lo descrito en la norma H0304 de “MANUAL DE ENSAYOS DE SUELOS Y MATERIALES”

Obteniendo los siguientes asentamientos de las mezclas realizadas:

Asentamientos			
Código	Asentamiento (cm)	% variación	Consistencia
P	26.5	100.00	Muy plástico
F0.25	11	41.51	Plástico
F0.35	5	18.87	Plástico-rígido
F0.5	2	7.55	Rígido

Tabla 33. Asentamientos obtenidos.

Podemos observar que a medida que se va incrementando el porcentaje de adición de fibra de vidrio, la trabajabilidad en el hormigón va disminuyendo, llegando a su máxima disminución con la adición de 0.5% de fibra de vidrio, perdiendo casi en su totalidad la trabajabilidad obtenida en el hormigón patrón

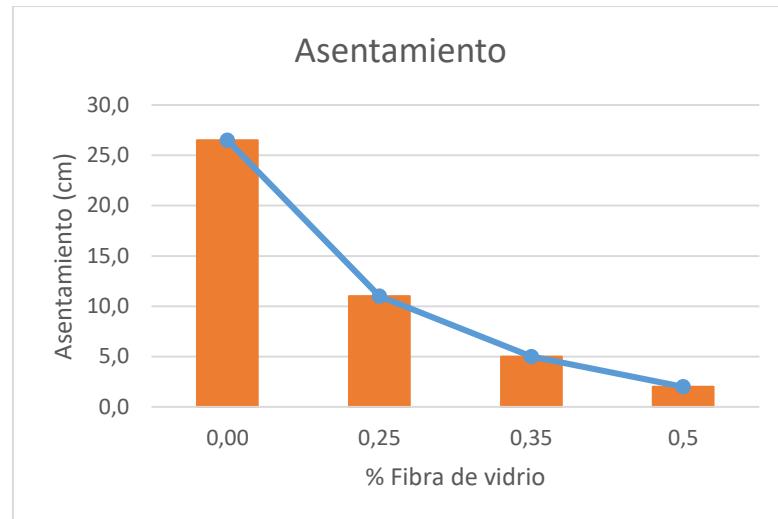


Ilustración 38. Asentamientos Vs % de FV.

En base a los resultados analizados en la literatura y a los obtenidos en la presente investigación, podemos observar que la longitud de la fibra de vidrio tiene una gran influencia en la trabajabilidad.

Se emplean los resultados de trabajabilidad obtenidos por (Arango & Zapata, 2013) al emplear una longitud de 1.2 cm de fibra de vidrio.

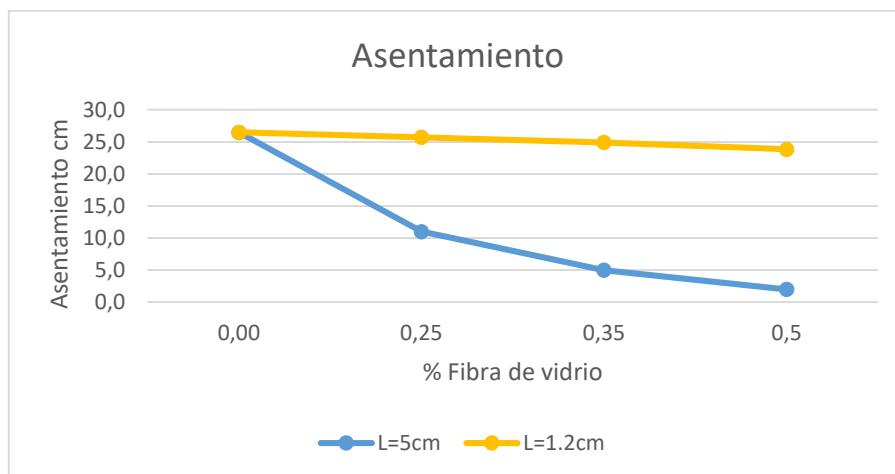


Ilustración 39. Asentamientos a diferentes longitudes de FV.

Si bien existen diversos parámetros que no permiten que la comparación realizada sea totalmente fidedigna, se puede llegar a una conclusión netamente hipotética que dicta lo siguiente: Mientras más grande sea la longitud de la fibra de vidrio, más grande será la disminución de la trabajabilidad:



### 3.4. RESISTENCIA A COMPRESIÓN

El ensayo se realizó de acuerdo a lo especificado en la sección 2.2.7 obteniendo los siguientes resultados.

Resistencia a compresión a los 7 días				
Código	% fibra de vidrio	Carga máxima a compresión (kgf)	Esfuerzo a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	% Variación
P	0	53728.299	684.090	100
F0.25	0.25	48434.458	616.687	90.2
F0.35	0.35	47451.841	604.176	88.3
F0.5	0.5	44841.851	570.944	83.5

Tabla 34. Resistencia a compresión a los 7 días.

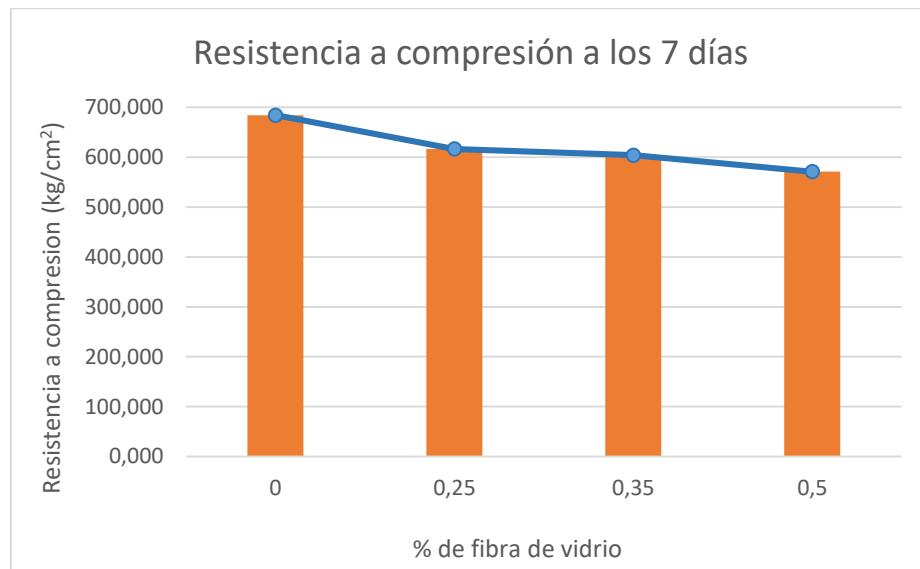


Ilustración 40. Resistencia a compresión a los 7 días.

La resistencia a compresión disminuye conforme se incorpora la fibra de vidrio, produciéndose su máxima disminución (16.54 %) con la incorporación del 0.5% de fibra de vidrio.

Resistencia a compresión a los 28 días				
Código	% fibra de vidrio	Carga máxima a compresión (kgf)	Esfuerzo a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	% Variación
P	0	58179.051	740.759	100
F0.25	0.25	54595.282	695.129	93.8
F0.35	0.35	54595.282	679.219	91.7
F0.5	0.5	52105.684	663.430	89.6

Tabla 35. Resistencia a compresión a los 28 días.

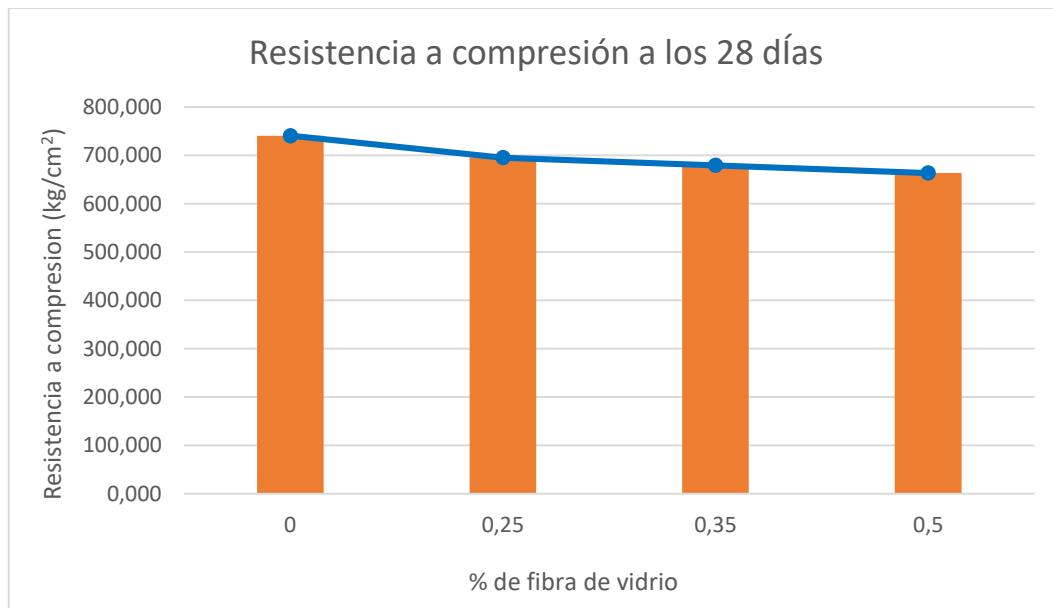


Ilustración 41. Resistencia a compresión a los 28 días

El comportamiento de la resistencia a los 28 días, tiene la misma tendencia que a los 7 días, produciéndose una reducción en la compresión conforme se aumenta el porcentaje de adición de fibra de vidrio. Teniendo una reducción máxima del 11%.

Si bien existe disminución en esta propiedad mecánica, la misma puede considerarse no significativa debido al pequeño porcentaje de reducción, además que ninguno de estos hormigones deja de ser considerado como hormigón estructural ( $>20\text{MPa}$  según EHE) a causa de sus altas resistencias obtenidas a la compresión, las cuales son mayores a  $20\text{MPa}$ , resistencia mínima para que un hormigón sea considerado estructural según la Norma EHE “Instrucción de hormigón estructural”.



### 3.4.1. Modo de falla

El tipo de falla a compresión que presentan tanto los cilindros de hormigón patrón, como alternativo, se clasifica de acuerdo a lo especificado en la sección 2.2.8.

Obteniendo lo siguiente:

Modo de falla (7 días)	
 <p>Código: P Tipo de falla (ASTM C39) : Tipo 4 Tipo de fractura: Frágil</p>	 <p>Código: F0.25 Tipo de falla (ASTM C39) : Tipo 2 Tipo de fractura: Frágil</p>
 <p>Código: F0.35 Tipo de falla (ASTM C39) : Tipo 5 Tipo de fractura: Frágil-Dúctil</p>	 <p>Código: F0.5 Tipo de falla (ASTM C39) : Tipo 5 Tipo de fractura: Dúctil</p>

Ilustración 42. Modo de falla 7 días.



Modo de falla (28 días)			
	Código: P		Código: F0.25
<b>Tipo de falla (ASTM C39) :</b> Tipo 4		<b>Tipo de falla (ASTM C39) :</b> Tipo 5	
<b>Tipo de fractura:</b> Frágil		<b>Tipo de fractura:</b> Frágil	
	Código: F0.35		Código: F0.5
<b>Tipo de falla (ASTM C39) :</b> Tipo 5		<b>Tipo de falla (ASTM C39) :</b> Tipo 5	
<b>Tipo de fractura:</b> Frágil-Dúctil		<b>Tipo de fractura:</b> Frágil-Dúctil	

Ilustración 43. Modo de falla 28 días.

La adición de la fibra de vidrio influye en el tipo de rotura que presenta el hormigón ante una carga a compresión, proporcionando mayor ductilidad mientras mayor sea la incorporación de la fibra.

### 3.5. RESISTENCIA A TRACCIÓN

El ensayo se realizó de acuerdo a lo especificado en la sección 2.2.9 obteniendo los siguientes resultados:

Resistencia a tracción a los 7 días				
Código	% fibra de vidrio	Carga máxima a tracción. (kgf)	Esf. a tracción (kg/cm <sup>2</sup> )	% Variación
P	0	9415.774	29.971	100
F0.25	0.25	10817.012	34.432	114.9
<b>F0.35</b>	<b>0.35</b>	<b>12663.382</b>	<b>40.309</b>	<b>134.5</b>
F0.5	0.5	11847.588	37.712	125.8

Tabla 36. Resistencia a tracción a los 7 días.

La Resistencia a tracción aumenta conforme se incorpora la fibra de vidrio, teniendo su máximo aumento (34.5%) con un porcentaje de 0.35% de adición de fibra de vidrio, para luego disminuir paulatinamente con un porcentaje mayor a este. Esta disminución puede atribuirse a la dificultad en la dispersión de las fibras dentro de la mezcla, según lo observado por (Jiang, Fan, & Wu, 2014).

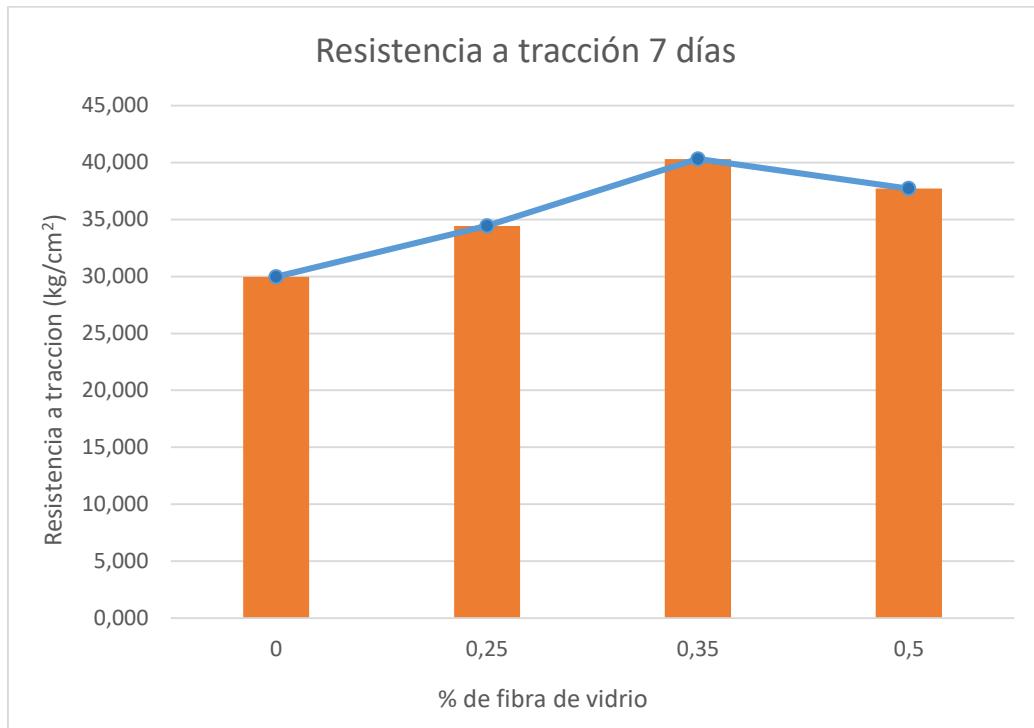


Ilustración 44. Resistencia a tracción 7 días.

El aumento de esta propiedad mecánica puede considerarse significativa, ya que se logra un incremento de aproximadamente 1/3 de la resistencia original.

Resistencia a tracción a los 28 días				
Código	% fibra de vidrio	Carga máxima a tracción. (kgf)	Esf. a tracción (kg/cm <sup>2</sup> )	% Variación
P	0	10654.166	33.913	100
F0.25	0.25	11964.480	38.084	112.3
<b>F0.35</b>	<b>0.35</b>	<b>14030.120</b>	<b>44.659</b>	<b>131.7</b>
F0.5	0.5	13885.595	44.199	130.3

Tabla 37. Resistencia a tracción a los 28 días

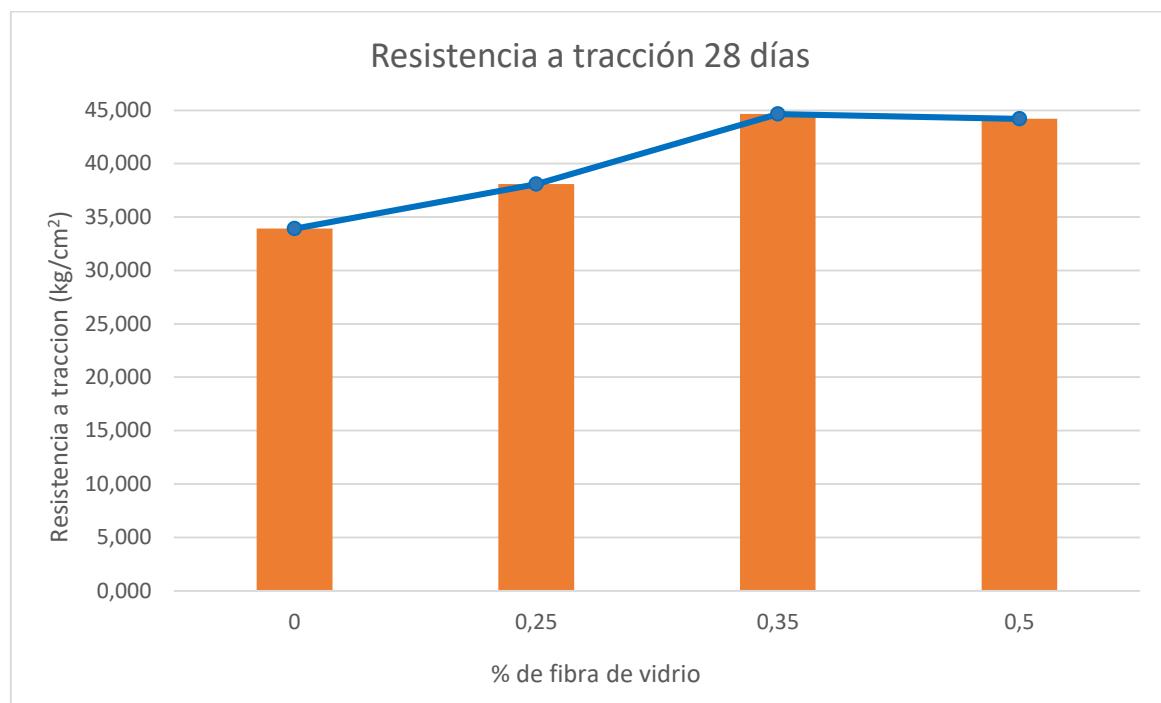


Ilustración 45. Resistencia a tracción a los 28 días

La resistencia a tracción a los 28 días sigue el mismo comportamiento que la resistencia a tracción a los 7 días, llegando a un aumento máximo del 31% con un porcentaje de adición de fibra de vidrio del 0.35%.

En base a este aumento de resistencia y a la disminución de la trabajabilidad descrita en la sección 3.3, se puede aproximar como dotación optima de fibra de vidrio un porcentaje de adición del 0.35% del peso total de la mezcla, la cual brindaría la máxima resistencia a tracción y una trabajabilidad plástica-rígida, porcentajes mayores a este vuelven a la mezcla rígida, y muy poco trabajable.

### 3.5.1. Influencia de la longitud de la fibra de vidrio:

La longitud de la fibra de vidrio es proporcional a la resistencia a tracción, aumentando esta propiedad conforme se incrementa la longitud de fibra a emplear.

En base a lo obtenido en esta investigación al emplear fibra de vidrio con una longitud de 5cm, y empleado los resultados obtenidos por la literatura analizada ( (Babar, et al., 2019) al emplear una longitud de 1.2cm, obtenemos la siguiente tabla comparativa:

Influencia de la longitud de la fibra de vidrio		
Longitud de fibra de vidrio (cm)	% óptimo de Fibra de vidrio	% Aumento máximo (Resistencia a tracción)
1.2	0.56	18.2
5	0.35	34.5

Tabla 38. Influencia de la longitud de la fibra de vidrio

La longitud de fibra de vidrio, tiene influencia tanto en el aumento de resistencia a tracción, como en la dotación de fibra necesaria para obtener el aumento máximo.

La resistencia a tracción aumenta mientras se incremente la longitud de la fibra, y el porcentaje de adición de fibra necesaria para llegar al aumento máximo (dotación óptima) disminuye.

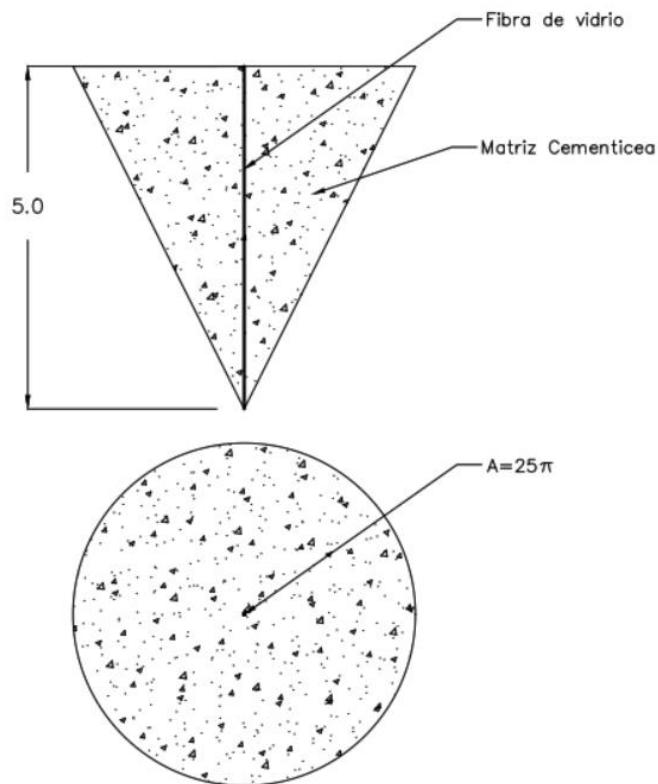


Ilustración 46. Área de influencia (Fibra  $L=5\text{cm}$ ).

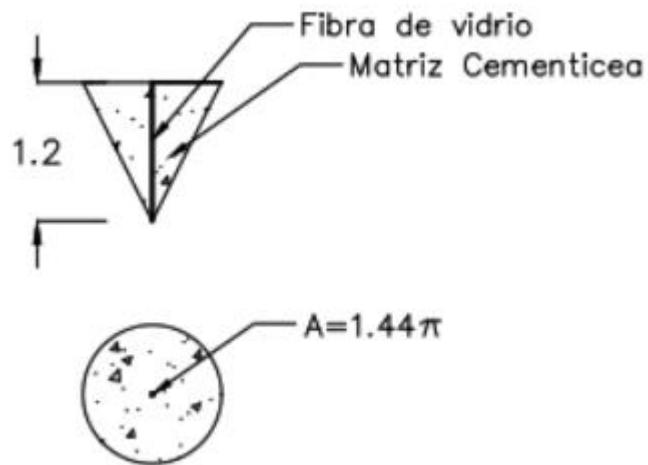


Ilustración 47. Área de influencia (Fibra  $L=1.2\text{cm}$ ).

El incremento de resistencia a tracción al emplear una longitud de fibra mayor, se debe principalmente al incremento de la longitud de anclaje entre la fibra de vidrio y la matriz cementicea. Provocando una mayor área de resistencia frente a las cargas de tracción.



La importancia de la longitud se puede observar en las ilustraciones 41 y 42, en las cuales, al pasar el área de influencia, de una longitud de 1.2cm (longitud empleada en la literatura), a una longitud de 5cm incrementa  $23.56\pi$ . Producíendose de esta manera un incremento en la resistencia a tracción.

### 3.6. DENSIDAD Y ABSORCIÓN.

Se utilizo los cilindros del laboratorio de suelos de la facultad de ingeniería con las siguientes dimensiones.

Dimensiones cilindros		
Diam	10	cm
L	20	cm
A	78.540	cm <sup>2</sup>
V	1570.796	cm <sup>3</sup>

Tabla 39. Dimensiones de los cilindros de hormigón.

Obteniendo los siguientes resultados:

Resultados Densidad 7 días							
Código	Peso SSS (kg)	Peso seco (kg)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad SSS (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	Absorción (%)	Aligeramiento (%)
P	3.885	3.871	0.002	2473.35	2464.61	0.355	0
F0.25	3.810	3.795	0.002	2425.41	2416.04	0.388	1.97
F0.35	3.796	3.780	0.002	2417.21	2406.38	0.450	2.36
F0.5	3.763	3.744	0.002	2395.83	2383.50	0.520	3.29

Tabla 40. Resultados Densidad y absorción 7 días

Resultados Densidad 28 días							
Código	Peso SSS (kg)	Peso seco (kg)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad SSS (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	Absorción (%)	Aligeramiento (%)
P	3.868	3.856	0.002	2462.73	2455.09	0.311	0
F0.25	3.808	3.791	0.002	2424.25	2413.53	0.444	1.69
F0.35	3.795	3.773	0.002	2415.93	2402.02	0.579	2.54
F0.5	3.773	3.751	0.002	2402.23	2387.90	0.600	3.11

Tabla 41. Resultados Densidad y absorción 28 días

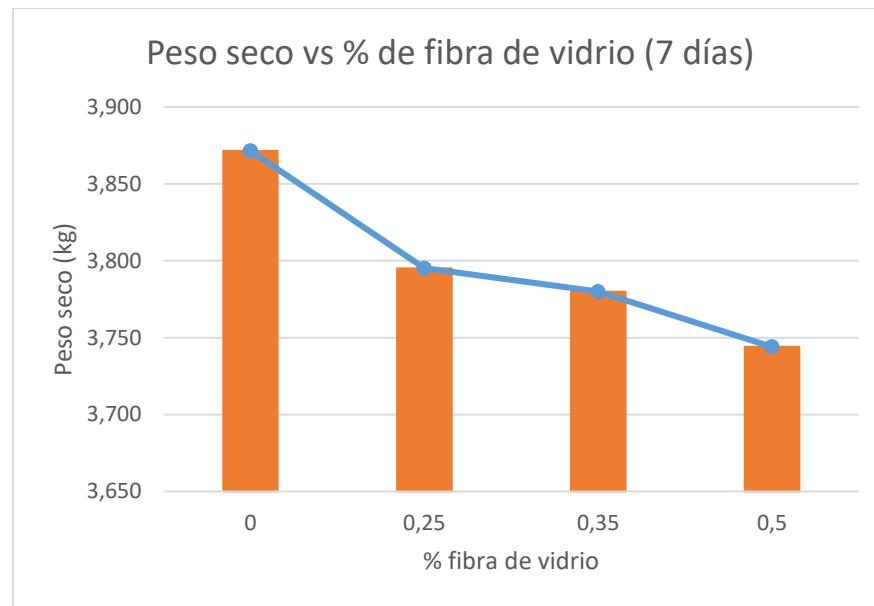


Ilustración 48. Peso seco vs Porcentaje de fibra de vidrio 7 días.

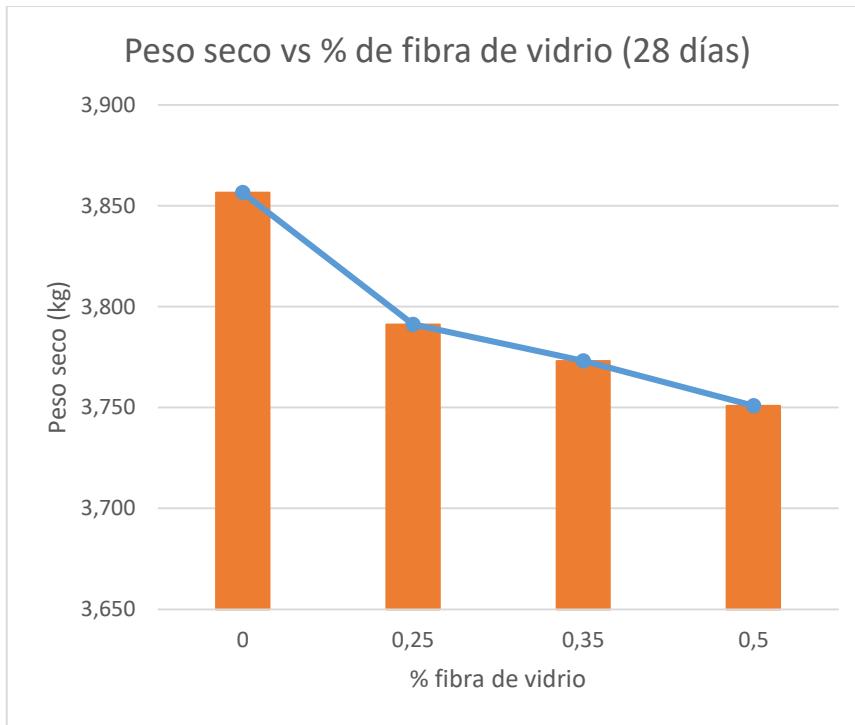


Ilustración 49. Peso seco vs Porcentaje de fibra de vidrio 28 días.

Los resultados de la densidad nos muestran que a medida que se aumenta fibra de vidrio disminuye el peso y densidad de los cilindros de hormigón, de este modo aligerando los mismos, como se ilustra en la siguiente figura.

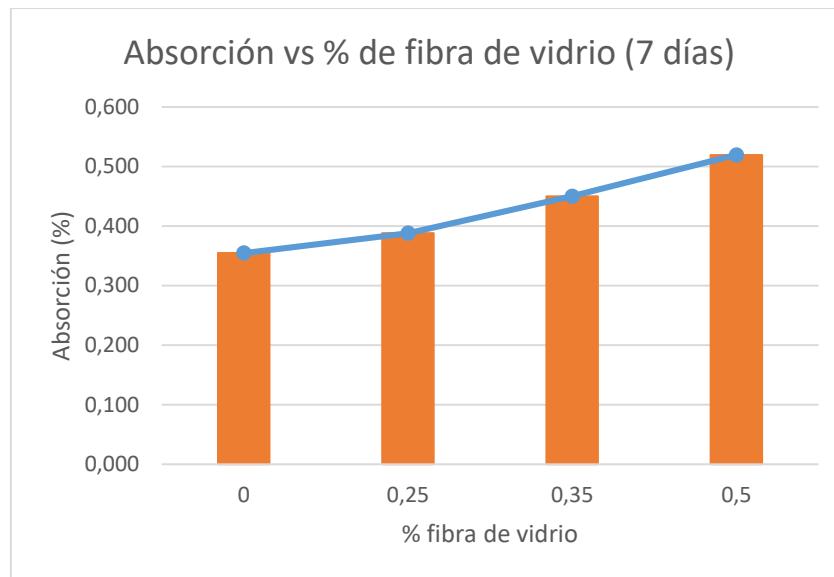


Ilustración 50 Absorción vs Porcentaje de fibra de vidrio 7 días.

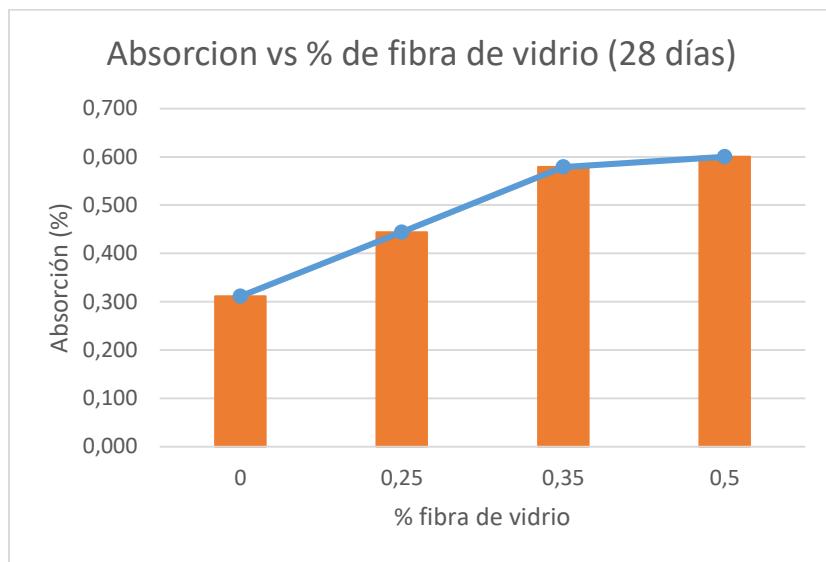


Tabla 42. Absorción vs Porcentaje de fibra de vidrio 28 días.

La absorción tanto a los 7 como 28 días, aumenta conforme se incrementa el porcentaje de adición de fibra de vidrio, esto se debe principalmente al porcentaje de vacíos provocados por la fibra de vidrio en el hormigón.

### 3.7. ESCLERÓMETRIA

El equipo utilizado fue “SilverSchmidt y Hammerlink”, el mismo que fue proporcionado por el laboratorio de suelos y geotecnia de la facultad de ingeniería de la Universidad de Cuenca. El esclerómetro proporciona un índice de rebote [Q], el cual es obtenido después del promedio de 10 impactos al concreto, una vez que se obtiene el índice de rebote [Q], con la ayuda de una gráfica de conversión, la misma que varía dependiendo el tipo de hormigón, se obtiene el  $f'c$ (calculado). Como se observa en la ilustración # 47 y 49 correspondiente a los 7 y 28 días respectivamente, los datos están desplazados hacia abajo, por lo cual es necesaria una corrección, para esto es



necesario saber el valor real de la resistencia a compresión  $f'c(real)$ , el factor de corrección se determina por medio de la siguiente expresión

$$f_{corrección} = \frac{f'c(real)}{f'c(Calculada)}.$$

La norma ASTM C805 requiere de 10 impactos, a partir de los cuales se calcula una media, se debe eliminar las lecturas que difieran de más de 5 unidades con respecto de la media. Si más de 3 lecturas difieren del promedio por más de 6 unidades, se debe repetir el ensayo. (ASTM C805, 2018)

Código	días	[Q]										Media
P1	7	60	59	58.5	58.5	59	58.5	58.5	60	59	59.5	59.05
P4	7	59	59	58.5	59.5	59.5	59.5	58	59	58.5	58.5	58.90
P5	7	59.5	59	58.5	58.5	59	59.5	59.5	58.5	59	59	59.00
F025-2	7	54	55	55.5	54	54	52.5	54.5	56	56.5	54	54.60
F025-4	7	55.5	55	56	54	55	54.5	55	54	54	54.5	54.75
F025-5	7	54.5	55	55.5	54	54.5	53.5	54.5	55	55.5	54.5	54.65
F035-4	7	51.5	50	52.5	50.5	52	50.5	51	52.5	50.5	54.5	51.55
F035-5	7	50.5	49.5	51	50.5	51.5	50.5	51.5	52	50	51	50.80
F035-9	7	50	49.5	49.5	50	51	50.5	50	50.5	51	50.5	50.25
F05-1	7	49.5	47.5	49.5	50.5	49.5	51	47.5	49	48	49	49.1
F05-3	7	49	46	47.5	47.5	47	49.5	50	50.5	49	48.5	48.45
F05-6	7	49	47.5	48.5	48.5	48	50	50.5	50.5	48	47	48.75

Tabla 43. Índice de rebote obtenidos a los 7 días.

Código	días	$f'c \text{ Kg/cm}^2$	$f'c \text{ N/mm}^2$
P1	7	696.79	68.33
P4	7	641.90	62.95
P5	7	672.034	65.90
F025-2	7	621.38	60.94
F025-4	7	611.64	59.98
F025-5	7	617.04	60.51
F035-4	7	597.67	58.61
F035-5	7	603.09	59.14
F035-9	7	611.76	59.99
F05-1	7	565.64	55.47
F05-3	7	576.24	56.51
F05-6	7	570.96	55.99

Tabla 44 Valores reales de  $f'c$  (7 días)

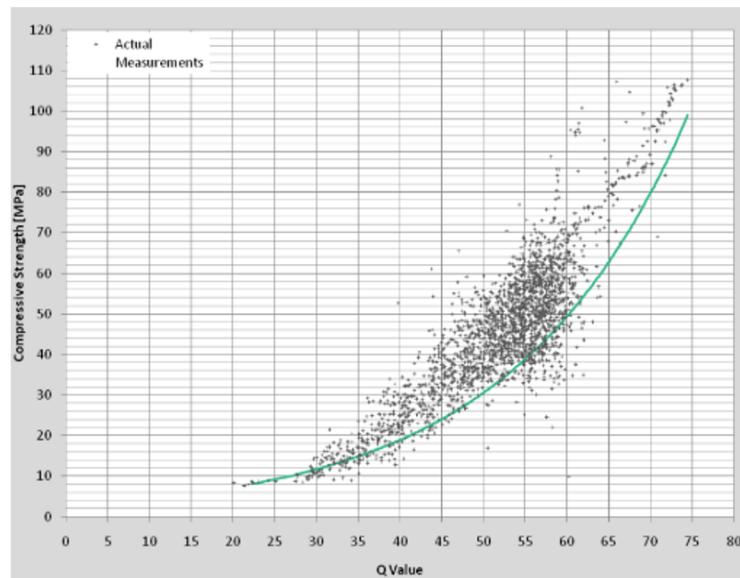


Ilustración 51. Correlación del número de rebotes y  $f'_c$  (Proceq, S.F.)

Se escogió la curva que se muestra en la ilustración # 46, debido a que esta ha sido desarrollada a partir de un universo los suficientemente grande de puntos como para ser fiable nuestros propósitos.

La ecuación que domina esta curva es  $f'_c k = 2.77e^{0.048Q}$

De donde:

$f'_c$  : Función que domina la curva de conversión.

$Q$ : Promedio del número de rebote.

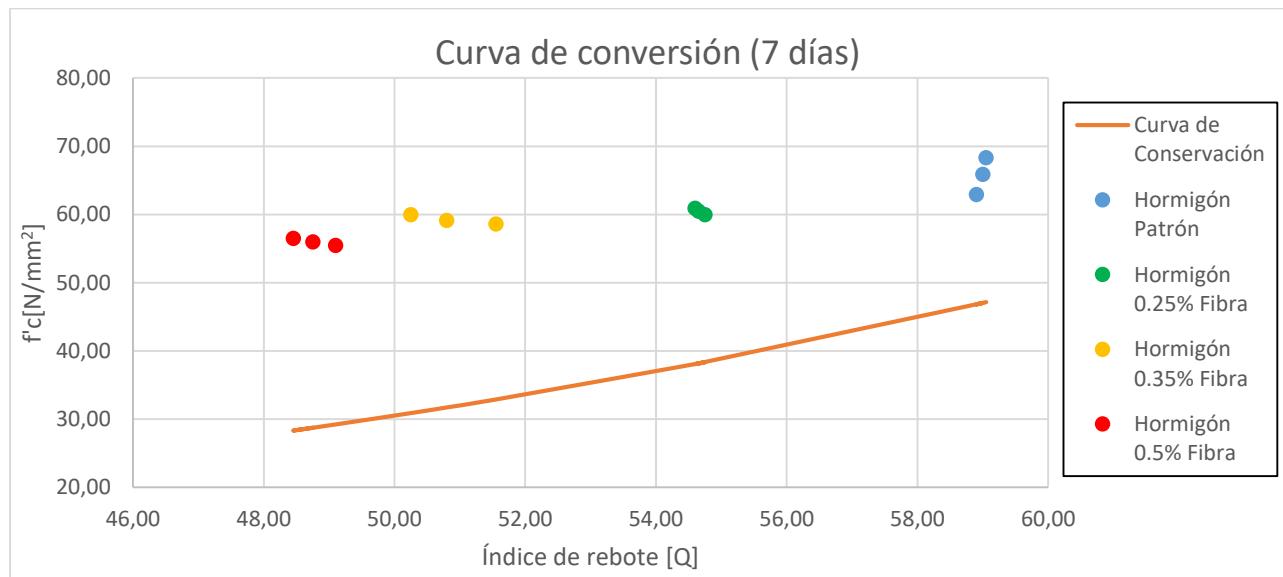


Ilustración 52 Puntos desplazados de la curva de conversión (7 días).



Valores de $f'_c$ a los 7 días	
Código	$f_{corregida}$
P1	1.45
P4	1.34
P5	1.40
F025-2	1.60
F025-4	1.56
F025-5	1.59
F035-4	1.78
F035-5	1.86
F035-9	1.94
F05-1	1.90
F05-3	1.99
F05-6	1.95
Promedio	1.70

Tabla 45 valores corregidos de  $f'_c$  obtenidos por medio del ensayo esclerómetro (7 días).

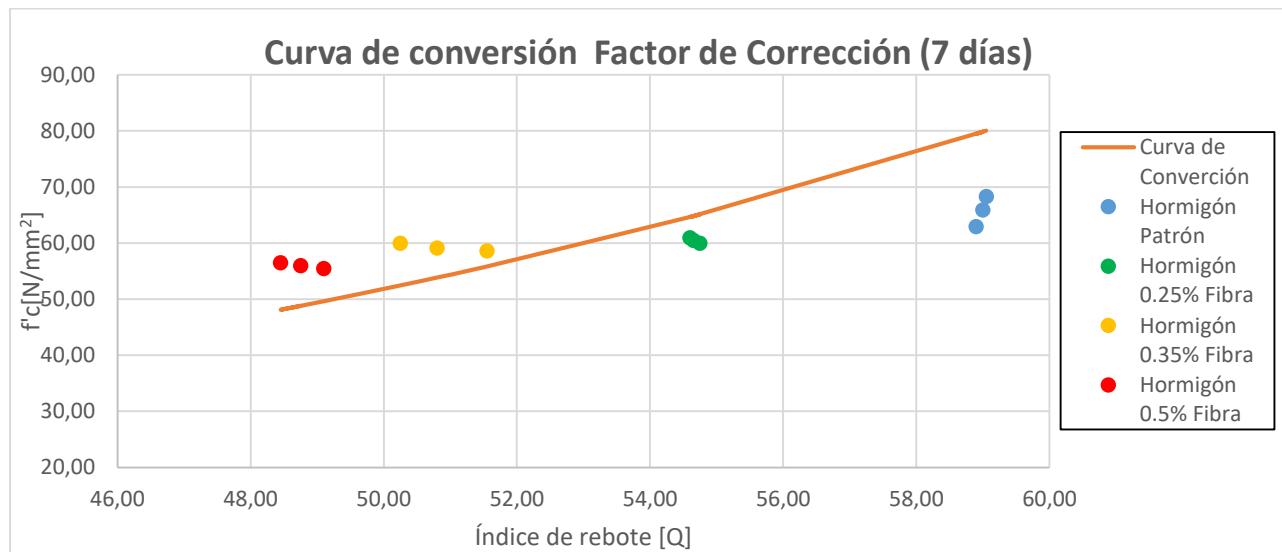


Ilustración 53 Curva de conversión desplazada hacia los puntos (7 días).

La nueva curva encontrada cuya ecuación es  $f_{ck} = 1.70 * 2.77e^{0.048Q}$ , se adapta de mejor manera a los datos obtenidos, por lo cual esta sería la gráfica que se deberá utilizar para encontrar  $f'_c$  de hormigones con fibra de vidrio de alta resistencia de los cuales se desconozca su  $f'_c$  real.



### Esclerómetro 28 días

Código	días	NR										Media
		65.5	63	61.5	65.5	64.5	64	66	61.5	63	64.5	
P3	28	65.5	63	61.5	65.5	64.5	64	66	61.5	63	64.5	63.9
P9	28	64	64.5	64.5	61	62	64	62.5	62.5	64	66.5	63.55
P2	28	63.5	63.5	62.5	63	62.5	63.5	62	64.5	62.5	63	63.05
F025-11	28	62.5	62	61.5	61.5	62.5	60	61	60	62	61	61.4
F025-6-8	28	62	61	62.5	61	58	61.5	62	62.5	62.5	59.5	61.25
F025-9	28	58.5	62	59	61.5	62	61.5	62	61	60.5	62	61
F035-10-7	28	62	59.5	58.5	60	61	61	60	61.5	62	58.5	60.4
F035-5-3	28	59.5	58	59	60	61	60.5	61.5	59	62	61.5	60.2
F035-2	28	62.5	56.5	55	64	60.5	62	65.5	56	59	55.5	59.65
F05-10	28	57	56	55	57	56	57.5	57	57.5	57.5	56.5	56.7
f05-8	28	57	56.6	59	58.5	51.5	57	57	57.5	57.5	57	56.86
f05-6	28	54	56.5	57.5	55	55.5	55	55.5	57	57	56	55.9

Tabla 46 Índice de rebote obtenido a los 28 días.

#	Días	$f'c(N/mm^2)$	$f'c(N/mm^2)$ Real
P3	28	58.5	72.02
P9	28	59.5	73.34
P2	28	55	72.57
F025-11	28	45	67.64
F025-6-8	28	50.5	68.27
F025-9	28	50	68.59
F035-10-7	28	50.5	67.33
F035-5-3	28	49.5	66.76
F035-2	28	48.5	65.74
F05-10	28	50	62.92
f05-8	28	45	65.76
f05-6	28	40	66.49

Tabla 47. Valores reales de  $f'c$  a los 28 días obtenidos del ensayo a compresión.

Los resultados obtenidos a los 28 días aumentaron el número de rebote, como se muestra en las ilustraciones 49 y 50.

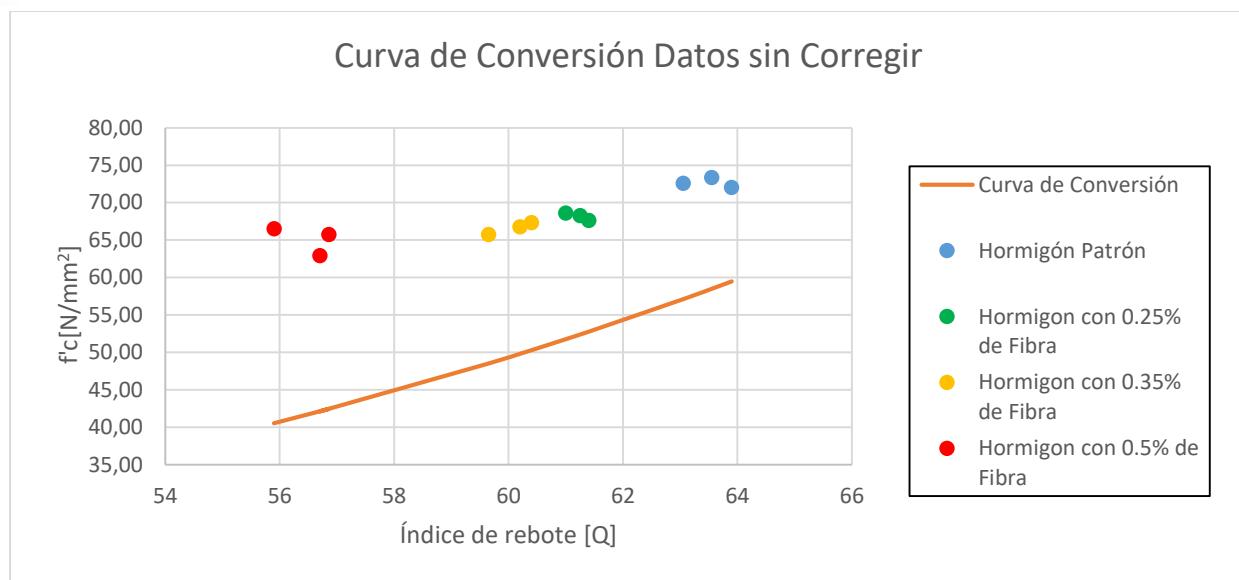


Ilustración 54. Curva de conversión a los 28 días sin corregir

Código	f.c.
P3	1.21
P9	1.25
P2	1.27
F025-11	1.28
F025-6-8	1.30
F025-9	1.32
F035-10-7	1.34
F035-5-3	1.34
F035-2	1.35
F05-10	1.49
f05-8	1.55
f05-6	1.64
<b>Promedio</b>	<b>1.36</b>

Tabla 48. Factor de Corrección a los 28 días

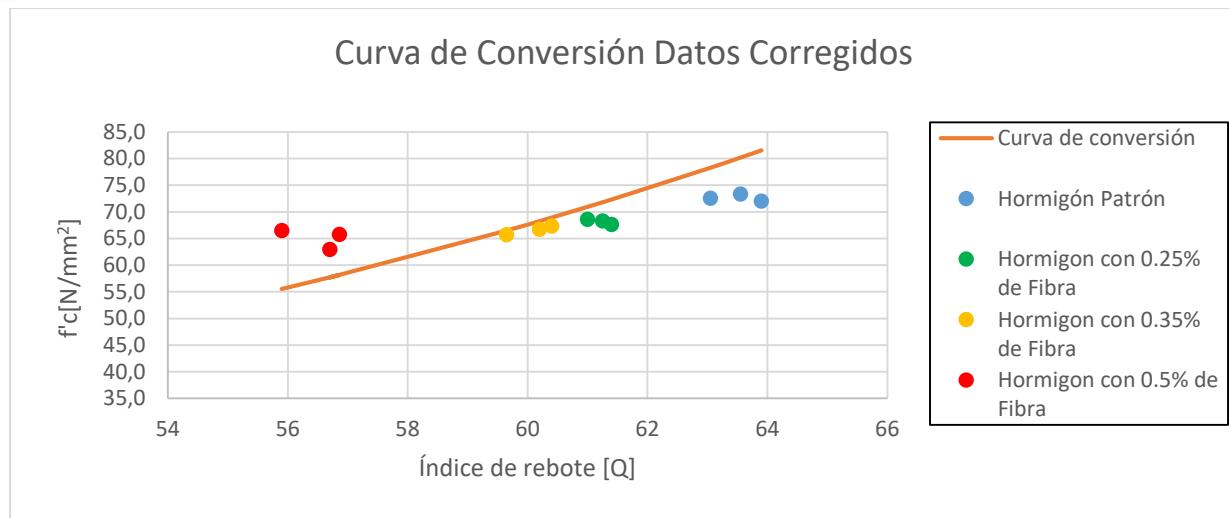


Ilustración 55. Curva de conversión a los 28 días multiplicando por el factor de corrección

La nueva curva encontrada cuya ecuación es  $f_{ck} = 1.37 * 2.77e^{0.048Q}$ , es más precisa que la ecuación original obtenida de (Proceq, S.F)

### 3.8. ENSAYO DE TRANSMISION DE PULSO ULTRASONICO.

Los resultados del ensayo del ultrasonido se presentan en la tabla 54 y 56, correspondientes a los 7 y 28 días respectivamente. Con la ayuda de la tabla 55 se califica de forma individual a cada hormigón en función de la velocidad obtenida con este ensayo.

Ultrasonido a los 7 días					
Código	Días	Tiempo (Us)	Velocidad (m/s)	Distancia(mm)	Condición del Hormigón
P1	7	42.2	4650	20	Excelente
		41.8	4690	20	Excelente
		41.9	4680	20	Excelente
P4	7	41.7	4800	20	Excelente
		41.9	4770	20	Excelente
		42.1	4750	20	Excelente
F025-1	7	43.8	4570	20	Bueno
		43.6	4600	20	Excelente
		43.7	4580	20	Excelente
F025-3	7	43.4	4610	20	Excelente
		43.3	4620	20	Excelente
		43.3	4620	20	Excelente
F025-4	7	43.7	4580	20	Excelente



		43.7	4580	20	Excelente
		43.6	4600	20	Excelente
F035-1	7	43.2	4630	20	Excelente
		43	4650	20	Excelente
		43	4650	20	Excelente
		43.1	4640	20	Excelente
F035-3	7	42.8	4670	20	Excelente
		42.9	4660	20	Excelente
		43.8	4570	20	Bueno
F035-4	7	43.8	4570	20	Bueno
		43.8	4570	20	Bueno
		44.3	4520	20	Bueno
F05-1	7	44.6	4480	20	Bueno
		44.4	4510	20	Bueno
		44.7	4470	20	Bueno
F05-2	7	44.6	4480	20	Bueno
		44.6	4480	20	Bueno
		43.8	4570	20	Bueno
F05-3	7	44.1	4540	20	Bueno
		43.95	4555	20	Bueno

Tabla 49. Resultados del ensayo de ultrasonido 7 días.

Clasificación del hormigón según la velocidad ultrasónica.	
Velocidad ultrasónica v(m/s)	Clasificación del concreto
V>4575	Excelente
4575>V>3660	Bueno
3660>V>3050	Cuestionable
3050>V>2135	Pobre
V>2135	Muy Pobre
Clasificación del hormigón según la velocidad ultrasónica.	
Velocidad de onda longitudinal v (m/s)	Condición del hormigón
Mas de 4570	Excelente
De 3650 a 4570	Buena
De 305 a 3650	Regular o dudosa
DE 2130 a 3050	Pobre
Menos de 2130	Muy Pobre



<b>Evaluación de la calidad mediante la velocidad de pulso.</b>	
<b>Velocidad de pulso v (m/s)</b>	<b>Condición del hormigón</b>
Mas de 3000	Buena
De 2500 a 3000	Regular
Menos de 2130	Pobre

Tabla 50. Clasificación del concreto según la velocidad de transito ultrasónica (Pillecer, 2014).

Debido a la variabilidad de resultados obtenidos se realizó un análisis estadístico, en el cual se comprueba que el hormigón patrón presenta mayores velocidades que los hormigones con fibra, como se muestra en las ilustraciones 51 y 52.

El aumento de fibra de vidrio provoco una disminución en la calidad del hormigón. Por otro lado, el aumento de 0.25% a 0.35% no tuvo un impacto significativo en la calidad de la muestra ensayada.

El incremento de fibra de vidrio a una relación de 0.5% de peso de la muestra, tuvo un impacto en la calidad del hormigón, disminuyendo la velocidad ultrasónica. Esto se puede deber a la falta de trabajabilidad que presento esta mezcla, lo que provocó la existencia de espacios de aire en el interior de la mezcla por donde el pulso se ralentizo, ocasionando una velocidad menor en la lectura.

Según la ACI 228.1R-95 La presencia de grietas o vacíos, ocasiona que el pulso se difracte alrededor de las discontinuidades, lo que provoca una mayor trayectoria y en consecuencia una menor velocidad.

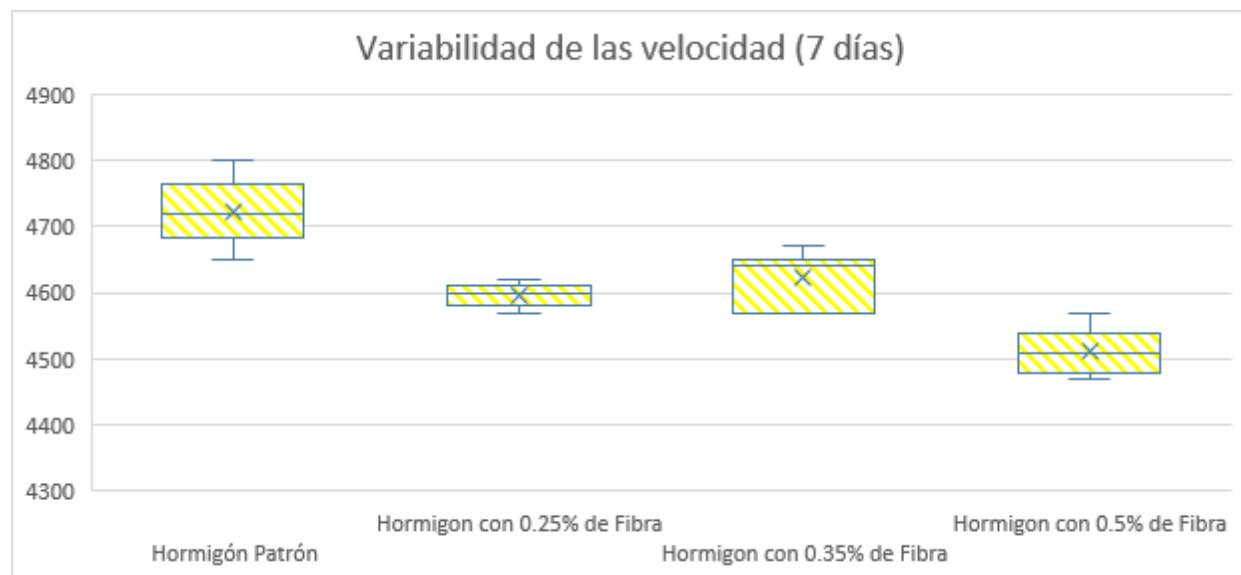


Ilustración 56. Variabilidad de las velocidades en el ensayo del ultrasonido.

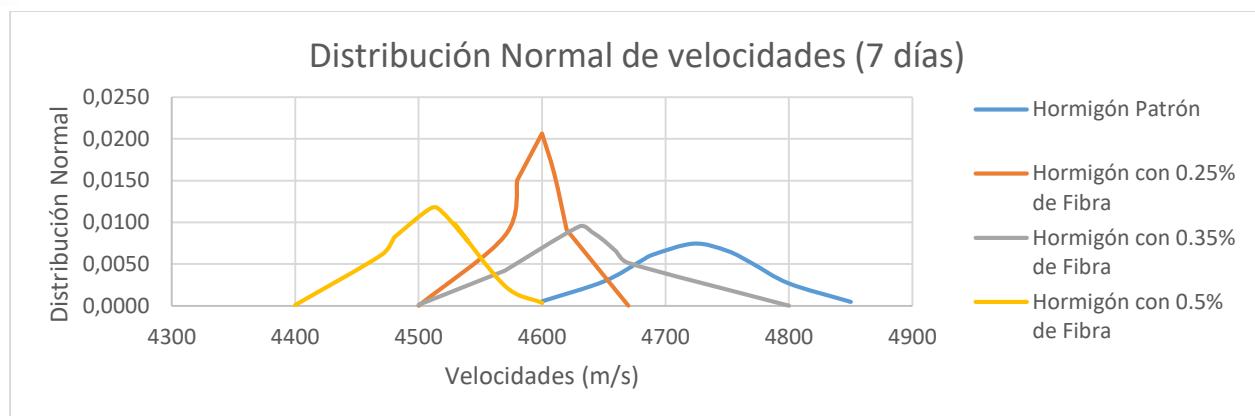


Ilustración 57. Distribución Normal de las velocidades del ensayo de ultrasonido

### Ultrasonido 28 días

Código	Días	Tiempo (Us)	Velocidad (m/s)	Distancia(mm)	Condición del Hormigón
P9	28	41.3	4840	20	Excelente
P9	28	41.6	4810	20	Excelente
P9	28	41.8	4790	20	Excelente
P9	28	41.8	4790	20	Excelente
P9	28	40.8	4900	20	Excelente
P9	28	40.9	4890	20	Excelente
P9	28	40.5	4940	20	Excelente
P9	28	40.3	4960	20	Excelente
P9	28	40	5000	20	Excelente
P9	28	40.1	4990	20	Excelente
P3	28	40.6	4930	20	Excelente
P3	28	40.6	4930	20	Excelente
P3	28	40.9	4890	20	Excelente
P3	28	41	4880	20	Excelente
P3	28	40.2	4980	20	Excelente
P3	28	40.2	4980	20	Excelente
P3	28	40.2	4980	20	Excelente
P3	28	40.2	4980	20	Excelente
P3	28	40.3	4690	20	Excelente
P3	28	40.3	4960	20	Excelente
p2	28	40.4	4950	20	Excelente
p2	28	40.5	4940	20	Excelente
p2	28	40.6	4930	20	Excelente
p2	28	40.7	4910	20	Excelente
p2	28	40	5000	20	Excelente
p2	28	40.4	4950	20	Excelente
p2	28	40.4	4950	20	Excelente
p2	28	40.3	4960	20	Excelente



p2	28	40.3	4960	20	Excelente
p2	28	40.4	4950	20	Excelente
p8	28	41.1	4870	20	Excelente
p8	28	40.8	4900	20	Excelente
p8	28	40.8	4900	20	Excelente
p8	28	40.8	4900	20	Excelente
p8	28	40.8	4900	20	Excelente
p8	28	40.9	4890	20	Excelente
p8	28	40.9	4890	20	Excelente
p8	28	40.9	4890	20	Excelente
p8	28	41	4880	20	Excelente
p8	28	41	4880	20	Excelente
P5	28	40.6	4930	20	Excelente
p5	28	40.6	4930	20	Excelente
P5	28	40.7	4910	20	Excelente
P5	28	40.7	4910	20	Excelente
P5	28	40.8	4900	20	Excelente
P5	28	40.7	4910	20	Excelente
P5	28	40.8	4900	20	Excelente
P5	28	40.8	4900	20	Excelente
P5	28	40.9	4890	20	Excelente
P5	28	40.8	4900	20	Excelente
p7	28	40.4	4950	20	Excelente
p7	28	40.3	4960	20	Excelente
p7	28	40.4	4950	20	Excelente
p7	28	40.4	4950	20	Excelente
p7	28	40.4	4950	20	Excelente
p7	28	40.8	4900	20	Excelente
p7	28	40.7	4910	20	Excelente
p7	28	40.7	4910	20	Excelente
p7	28	40.6	4930	20	Excelente
p7	28	40.6	4960	20	Excelente
F025-5	28	41.2	4850	20	Excelente
F025-5	28	41.1	4870	20	Excelente
F025-5	28	41.2	4850	20	Excelente
F025-5	28	41.2	4850	20	Excelente
F025-5	28	41.3	4840	20	Excelente
F025-5	28	41.1	4870	20	Excelente
F025-5	28	41.1	4870	20	Excelente
F025-5	28	41.4	4830	20	Excelente
F025-5	28	41.4	4830	20	Excelente
F025-5	28	41.3	4840	20	Excelente
F025-6	28	42.5	4710	20	Excelente



F025-6	28	42.4	4720	20	Excelente
F025-6	28	42.4	4720	20	Excelente
F025-6	28	42.5	4710	20	Excelente
F025-6	28	42.5	4710	20	Excelente
F025-6	28	42.6	4700	20	Excelente
F025-6	28	42.5	4710	20	Excelente
F025-6	28	42.4	4720	20	Excelente
F025-6	28	42.4	4720	20	Excelente
F025-6	28	42.3	4730	20	Excelente
F025-7	28	41	4880	20	Excelente
F025-7	28	41	4880	20	Excelente
F025-7	28	40.7	4910	20	Excelente
F025-7	28	40.7	4910	20	Excelente
F025-7	28	40.7	4910	20	Excelente
F025-7	28	40.7	4910	20	Excelente
F025-7	28	40.9	4890	20	Excelente
F025-7	28	40.9	4890	20	Excelente
F025-7	28	40.9	4890	20	Excelente
F025-8	28	42.2	4740	20	Excelente
F025-8	28	42.3	4730	20	Excelente
F025-8	28	42.3	4730	20	Excelente
F025-8	28	42.4	4720	20	Excelente
F025-8	28	42.4	4720	20	Excelente
F025-8	28	41.8	4790	20	Excelente
F025-8	28	42.1	4750	20	Excelente
F025-8	28	42.1	4750	20	Excelente
F025-8	28	41.6	4810	20	Excelente
F025-8	28	41.7	4800	20	Excelente
F025-9	28	41.2	4850	20	Excelente
F025-9	28	41.3	4840	20	Excelente
F025-9	28	41.3	4840	20	Excelente
F025-9	28	41.1	4870	20	Excelente
F025-9	28	41.2	4850	20	Excelente
F025-9	28	42.2	4850	20	Excelente
F025-9	28	41.4	4830	20	Excelente
F025-9	28	41.4	4830	20	Excelente
F025-9	28	41.3	4840	20	Excelente
F025-9	28	41.3	4840	20	Excelente
F025-	28	41.1	4870	20	Excelente
F025-	28	41	4880	20	Excelente
F025-	28	41	4880	20	Excelente
F025-	28	41	4880	20	Excelente



F025-	28	40.9	4890	20	Excelente
F025-	28	40.8	4890	20	Excelente
F025-	28	41.2	4850	20	Excelente
F025-	28	41.2	4850	20	Excelente
F025-	28	41.2	4850	20	Excelente
F025-	28	41.3	4840	20	Excelente
F035-8	28	42	4760	20	Excelente
F035-8	28	42	4760	20	Excelente
F035-8	28	42	4760	20	Excelente
F035-8	28	42.1	4250	20	Bueno
F035-8	28	42.2	4740	20	Excelente
F035-8	28	42.2	4740	20	Excelente
F035-8	28	42.2	4740	20	Excelente
F035-8	28	42.2	4740	20	Excelente
F035-8	28	42.2	4740	20	Excelente
F035-7	28	42.7	4680	20	Excelente
F035-7	28	42.6	4700	20	Excelente
F035-7	28	42.6	4700	20	Excelente
F035-7	28	42.4	4720	20	Excelente
F035-7	28	42.4	4720	20	Excelente
F035-7	28	42.4	4720	20	Excelente
F035-7	28	42.4	4720	20	Excelente
F035-7	28	42.2	4740	20	Excelente
F035-7	28	42.2	4740	20	Excelente
F035-7	28	42.3	4730	20	Excelente
F035-6	28	42.6	4700	20	Excelente
F035-6	28	42.6	4700	20	Excelente
F035-6	28	42.5	4710	20	Excelente
F035-6	28	41.8	4790	20	Excelente
F035-6	28	41.8	4790	20	Excelente
F035-6	28	41.8	4790	20	Excelente
F035-6	28	41.6	4810	20	Excelente
F035-6	28	41.5	4820	20	Excelente
F035-6	28	42.1	4750	20	Excelente
F035-6	28	42.1	4750	20	Excelente
F035-	28	42.1	4750	20	Excelente
F035-	28	42.2	4740	20	Excelente
F035-	28	42.2	4740	20	Excelente
F035-	28	42.3	4730	20	Excelente
F035-	28	42.3	4730	20	Excelente
F035-	28	42.3	4730	20	Excelente
F035-	28	42.4	4720	20	Excelente



F035-	28	42.4	4720	20	Excelente
F035-	28	42.2	4740	20	Excelente
F035-	28	42.2	4740	20	Excelente
F035-	28	42.7	4680	20	Excelente
F035-	28	42.4	4720	20	Excelente
F035-	28	42.4	4720	20	Excelente
F035-	28	42.3	4730	20	Excelente
F035-	28	42.3	4730	20	Excelente
F035-	28	42.3	4730	20	Excelente
F035-	28	42.1	4750	20	Excelente
F035-	28	42.1	4750	20	Excelente
F035-	28	42.3	4730	20	Excelente
F035-	28	42.3	4730	20	Excelente
F035-	28	41.8	4790	20	Excelente
F035-	28	41.8	4790	20	Excelente
F035-	28	42	4760	20	Excelente
F035-	28	42.1	4750	20	Excelente
F035-	28	42.1	4750	20	Excelente
F035-	28	42.1	4750	20	Excelente
F035-	28	42.2	4740	20	Excelente
F035-	28	42.2	4740	20	Excelente
F035-	28	42.3	4730	20	Excelente
F035-	28	42.2	4740	20	Excelente
F05-8	28	42.4	4720	20	Excelente
F05-8	28	42.4	4720	20	Excelente
F05-8	28	42.6	4700	20	Excelente
F05-8	28	42.6	4700	20	Excelente
F05-8	28	42.6	4700	20	Excelente
F05-8	28	42.7	4680	20	Excelente
F05-8	28	42.7	4680	20	Excelente
F05-8	28	42.4	4720	20	Excelente
F05-8	28	42.8	4670	20	Excelente
F05-8	28	42.8	4670	20	Excelente
F05-7	28	42.5	4710	20	Excelente
F05-7	28	42.3	4730	20	Excelente
F05-7	28	42.3	4730	20	Excelente
F05-7	28	42.5	4710	20	Excelente
F05-7	28	42.5	4710	20	Excelente
F05-7	28	42.6	4700	20	Excelente
F05-7	28	42.8	4670	20	Excelente
F05-7	28	42.8	4670	20	Excelente
F05-7	28	42.6	4700	20	Excelente
F05-7	28	42.6	4700	20	Excelente



F05-4	28	42.6	4700	20	Excelente
F05-4	28	42.7	4680	20	Excelente
F05-4	28	42.7	4680	20	Excelente
F05-4	28	42.7	4680	20	Excelente
F05-4	28	42.7	4680	20	Excelente
F05-4	28	42.7	4680	20	Excelente
F05-4	28	42.6	4700	20	Excelente
F05-4	28	42.5	4710	20	Excelente
F05-4	28	42.6	4700	20	Excelente
F05-4	28	42.6	4700	20	Excelente
F05-6	28	43.8	4570	20	Bueno
F05-6	28	42.3	4730	20	Excelente
F05-6	28	42.3	4730	20	Excelente
F05-6	28	42.3	4730	20	Excelente
F05-6	28	42.4	4720	20	Excelente
F05-6	28	42.3	4730	20	Excelente
F05-6	28	42.3	4730	20	Excelente
F05-6	28	42.3	4730	20	Excelente
F05-6	28	42.4	4720	20	Excelente
F05-6	28	42.3	4730	20	Excelente
F05-10	28	42.4	4720	20	Excelente
F05-10	28	42.4	4720	20	Excelente
F05-10	28	42.7	4680	20	Excelente
F05-10	28	42.6	4700	20	Excelente
F05-10	28	42.6	4700	20	Excelente
F05-10	28	42.8	4670	20	Excelente
F05-10	28	42.7	4680	20	Excelente
F05-10	28	42.7	4680	20	Excelente
F05-10	28	42.7	4680	20	Excelente
F05-10	28	42.7	4680	20	Excelente
F05-	28	42.6	4700	20	Excelente
F05-	28	42.6	4700	20	Excelente
F05-	28	42.5	4710	20	Excelente
F05-	28	42.4	4720	20	Excelente
F05-	28	42.4	4720	20	Excelente
F05-	28	42.7	4680	20	Excelente
F05-	28	42.7	4680	20	Excelente
F05-	28	42.6	4700	20	Excelente
F05-	28	42.6	4700	20	Excelente
F05-	28	42.6	4700	20	Excelente

Tabla 51. Datos crudos y caracterización de la condición del hormigón 28 días (Ensayo de Ultrasonido)

Al igual que a los 7 días se realizó un estudio estadístico de los datos, en el cual se puede observar que la velocidad disminuye a medida que se incrementa la fibra de vidrio como lo indica la Ilustración 53 e Ilustración 54.

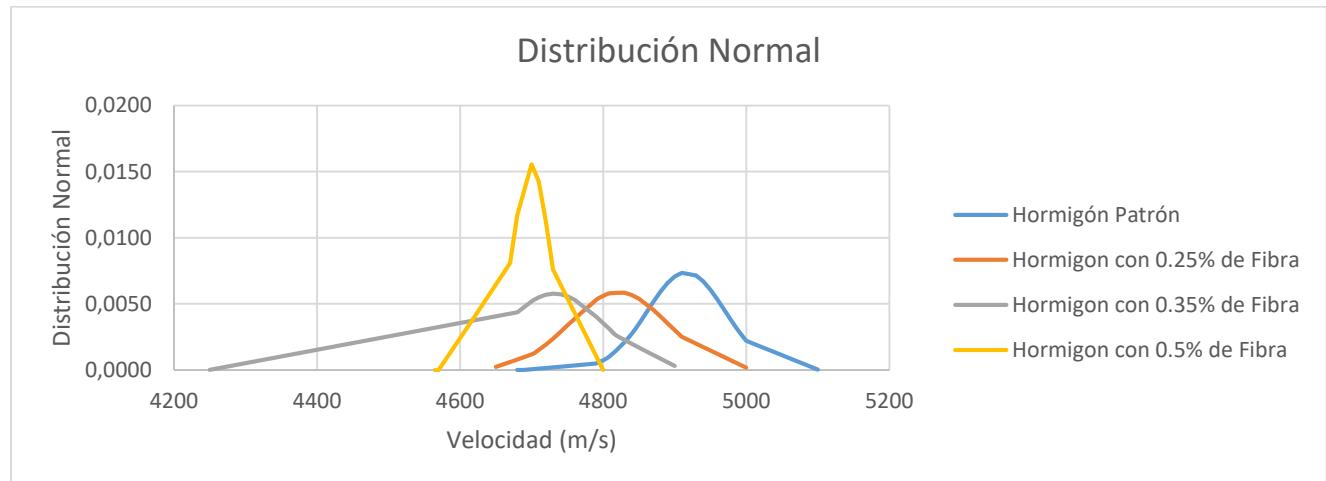


Ilustración 58. Distribución Normal de las velocidades obtenidas con el ensayo del ultrasonido a los 28 días

A pesar de que existe una disminución de su velocidad según la tabla 55. No disminuyeron en su calidad debido al rango amplio en el cual son calificadas.

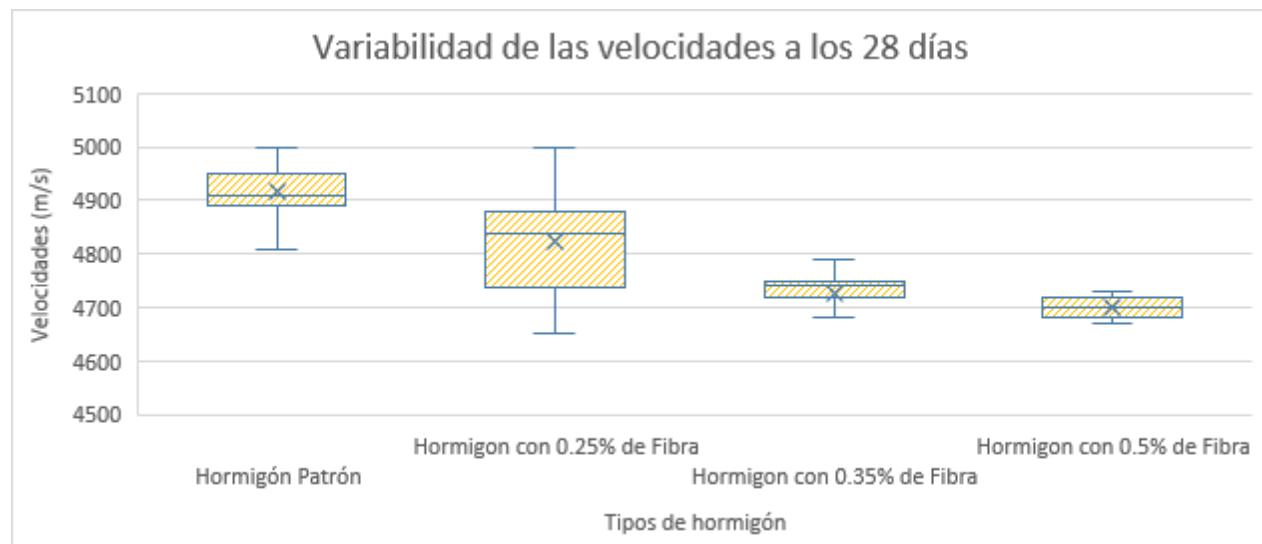


Ilustración 59 Variabilidad de las velocidades obtenidas con el ensayo del ultrasonido a los 28 días.

### 3.9. ANÁLISIS ECONÓMICO DE HORMIGONES ESTRUCTURALES CON FIBRA DE VIDRIO.

Para obtener el precio de producción del hormigón estructural con fibra de vidrio, se obtuvo el precio unitario de los materiales que sirven como materia prima del hormigón tanto patrón como alternativo. Seguidamente se calcula el precio unitario del hormigón para un metro cúbico con los diferentes porcentajes de adición de fibra de vidrio.

Material	Costo Unitario	Unidad
----------	----------------	--------



Arena	\$ 23.00	\$/m <sup>3</sup>
Grava	\$ 25.00	\$/m <sup>3</sup>
Cemento	\$ 7.50	\$/50Kg
Agua	\$ 0.83	\$/m <sup>3</sup>
Viscocrete 4100	\$ 264.00	\$/m <sup>3</sup>
Fibra de vidrio E	\$ 5.00	\$/Kg

Tabla 52. Precios Unitarios de la Materia Prima. fuente: Índice de precios de materiales de construcción de la ACI.

Se realiza el análisis económico de las dosificaciones empleadas, considerando a la fibra de vidrio como una adición extra al m<sup>3</sup> de hormigón patrón, Obteniendo:

Precios de dosificaciones empleadas (m <sup>3</sup> más adición de fibra de vidrio)				
	Material	Costo Unitario [\$/Kg]	Cantidad [Kg]	Precio [\$]
Hormigón Patrón [P]	Arena	\$ 0.0107	689.3	\$ 7.36
	Grava	\$ 0.0096	783.6	\$ 7.53
	Cemento	\$ 0.1500	721.7	\$ 108.26
	Agua	\$ 0.0008	215.94	\$ 0.18
	Viscocrete 4100	\$ 0.2400	6.5	\$ 1.56
	Fibra de vidrio E	\$ 5.0000	0	\$ -
	Total			\$ 124.88
Hormigón con 0.25% de Fibra[F025]	Material	Costo Unitario	Cantidad	Precio
	Arena	\$ 0.0107	686.6	\$ 7.33
	Grava	\$ 0.0096	780.5	\$ 7.50
	Cemento	\$ 0.1500	718.9	\$ 107.83
	Agua	\$ 0.0008	215.1	\$ 0.18
	Viscocrete 4100	\$ 0.2400	6.5	\$ 1.55
	Fibra de vidrio E	\$ 5.0000	6.0	\$ 30.08
Hormigón con 0.35% de Fibra [f035]	Total			\$ 154.47
	Material	Costo Unitario	Cantidad	Precio
	Arena	\$ 0.0107	682.6	\$ 7.29
	Grava	\$ 0.0096	776.0	\$ 7.45
	Cemento	\$ 0.1500	714.7	\$ 107.21
	Agua	\$ 0.0008	215.1	\$ 0.18
	Viscocrete 4100	\$ 0.2400	6.4	\$ 1.54
	Fibra de vidrio E	\$ 5.0000	8.4	\$ 41.89



<b>Hormigón con 0.5% de Fibra[F05]</b>	<b>Total</b>			<b>\$ 165.56</b>
	<b>Material</b>	<b>Costo Unitario</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio</b>
	Arena	\$ 0.0107	677.6	\$ 7.23
	Grava	\$ 0.0096	770.3	\$ 7.40
	Cemento	\$ 0.1500	709.4	\$ 106.42
	Agua	\$ 0.0008	212.3	\$ 0.18
	Viscocrete 4100	\$ 0.2400	6.4	\$ 1.53
	Fibra de vidrio E	\$ 5.0000	11.9	\$ 59.42
<b>Total</b>				<b>\$ 182.18</b>

Tabla 53 Precio del Hormigón por metro cubico.

Como se muestra en la tabla 59 y la ilustración 55 el precio aumenta a medida que se incrementa el porcentaje de adición de fibra de vidrio en el hormigón.

Precios de dosificaciones empleadas (m <sup>3</sup> más adición de fibra de vidrio)			
Código	% Fibra de vidrio	Precio	% Variación
P	0.00%	\$ 124.88	100%
F025	0.25%	\$ 154.47	124%
<b>F035</b>	<b>0.35%</b>	<b>\$ 165.56</b>	<b>133%</b>
F05	0.50%	\$ 182.18	146%

Tabla 54. Tabla resumen de precios por metro cubico

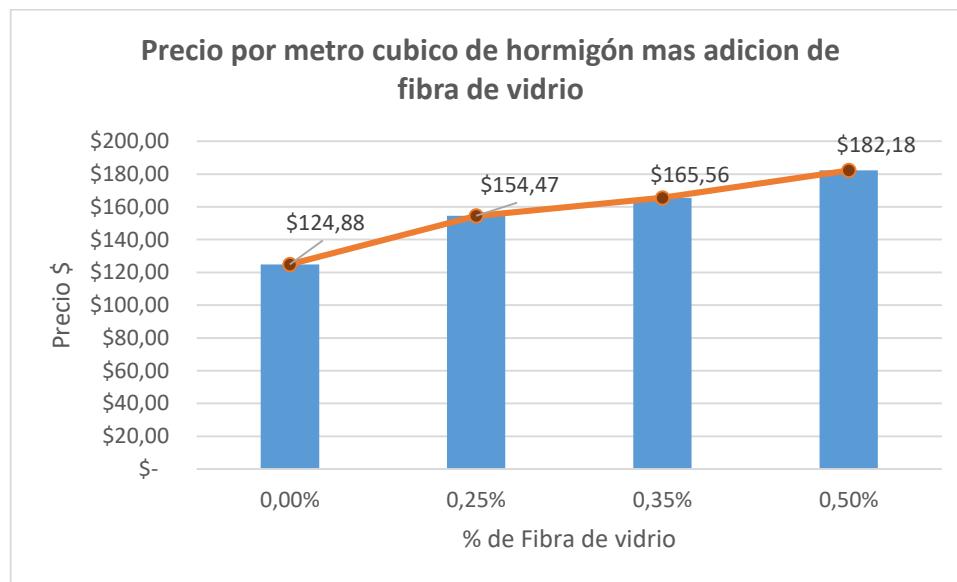


Ilustración 60. Precio por metro cubico.

Debido a que se emplean pequeños porcentajes de fibra de vidrio, a pesar de que se trata de un material relativamente caro en comparación con los demás materiales que constituye el hormigón, el precio no aumenta en gran medida, llegando a un aumento de precio extra en la dotación optima del 33% (40.7\$) con respecto al hormigón patrón.

Como ejemplo práctico se analizó el costo de construcción de la capa de rodadura de un tramo de vía de hormigón, con las siguientes características:

Datos tramo de carrera



Distancia	1000	m
Ancho carriles	3.5	m
# carriles	2	m
Sobre ancho	0.5	m
Ancho total	8	m
Espesor	0.3	m
Volumen	<b>2400</b>	<i>m<sup>3</sup></i>

Tabla 55. Datos tramo de carretera.

Al emplear el hormigón patrón se obtiene el siguiente análisis de costos:

Costo de hormigón Patrón para tramo de carretera							
Cantidad a usar				Costo Unitario	Unidad	Distancia (transporte de materiales) (millas)	Precio unitario transporte (\$/m <sup>3</sup> )
CANTIDAD	5892	tons	2400	m <sup>3</sup>			Costo total
Agua	526.40	tons	526.40	m <sup>3</sup>	0.83	\$/m3	\$ 436.91
cemento	1759.28	tons	1385.26	m <sup>3</sup>	7.50	\$/50Kg	30.00 14.92 \$ 284,560.50
arena	1680.30	tons	1169.31	m <sup>3</sup>	23.00	\$/m3	30.00 14.92 \$ 44,340.31
grava	1910.18	tons	1490.00	m <sup>3</sup>	25.00	\$/m3	30.00 14.92 \$ 59,480.67
aditivo	15.85	tons	14.40	m <sup>3</sup>	264.00	\$/m3	30.00 14.92 \$ 4,017.72
							Total \$ 392,836.10

Tabla 56. Costo de hormigón Patrón para tramo de carretera.

Debido a que la densidad del hormigón alternativo F0.35 disminuye, se emplea una menor cantidad de materiales que el hormigón patrón para cubrir un mismo volumen, en base a esto se obtiene el siguiente análisis de costos del tramo de vía:

Costo de hormigón F0.35 para tramo de carretera							
Cantidad a usar				Costo Unitario	Unidad	Distancia (millas)	Precio unitario transporte (\$/m <sup>3</sup> )
CANTIDAD	5764.80	tons	2400	m <sup>3</sup>			Costo total
Agua	513.23	tons	513.23	m <sup>3</sup>	0.83	\$/m3	\$ 425.98



cemento	1715.30	tons	1350.62	m <sup>3</sup>	7.50	\$/50Kg	30.00	14.92	\$ 277,446.13
arena	1638.29	tons	1140.07	m <sup>3</sup>	23.00	\$/m3	30.00	14.92	\$ 43,231.75
grava	1862.42	tons	1452.74	m <sup>3</sup>	25.00	\$/m3	30.00	14.92	\$ 57,993.58
aditivo	15.45	tons	14.04	m <sup>3</sup>	264.00	\$/m3	30.00	14.92	\$ 3,917.27
Fibra de vidrio	20.11	tons	7.79	m <sup>3</sup>	5.00	\$/Kg	30.00	14.92	\$ 100,652.68
								Total	\$ 483,667.39

Tabla 57. Costo de hormigón F0.35 para tramo de carretera.

Al emplear el hormigón Alternativo (F0.35), el precio del transporte disminuye, al igual que la cantidad de la mayoría de los materiales, pero la fibra de vidrio tiene un mayor impacto económico haciendo más caro su uso, (23% más caro) en relación al hormigón patrón.

Análisis de costo de materiales y transporte		
Tipo de Hormigón	Precio tramo de vía	Variación (%)
Patrón	\$ 392,836.10	100.00%
F0.35	\$ 483,667.39	123.12%

Tabla 58. Análisis de costos del tramo de vía.

### 3.10. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE HORMIGONES ESTRUCTURALES CON FIBRA DE VIDRIO.

Para el análisis del ciclo de vida del hormigón se utilizó el software PaLATE v2.2, el cual determina la cantidad de energía emitida y CO<sub>2</sub> liberado en las actividades de construcción y transporte necesarios para la obra. Estimando así el posible impacto ambiental que representa construir esta obra con el hormigón Patrón y el hormigón alternativo.

Con fines meramente explicativos se analizó un tramo de carretera con las siguientes características.

Datos tramo de carrera		
Distancia	1000	m
Ancho carriles	3.5	m
# carriles	2	m
Sobre ancho	0.5	m
Ancho total	8	m
capa de rodadura	0.3	m
Subbase	0.25	m



Volumen	2400	$m^3$
---------	------	-------

Tabla 59 Características de la carretera.

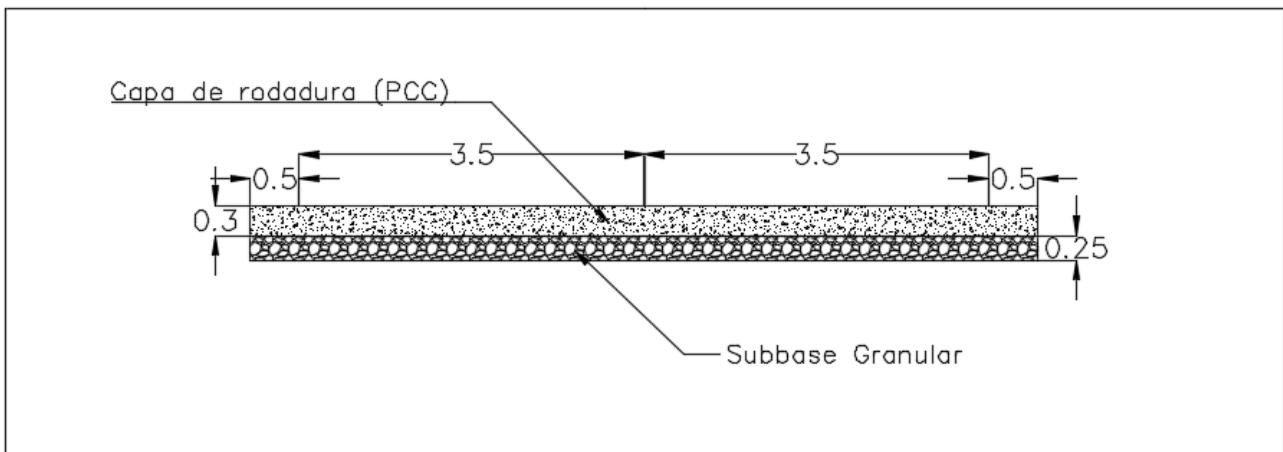


Ilustración 61. Perfil de carretera.

La subbase se consideró como una mezcla entre la grava y arena con la siguiente proporción: 44% y 56% respectivamente

Datos subbase		
Long	1000	m
Espesor	0.25	m
Ancho	8	m
Volumen	2000	$m^3$

Tabla 60. Dimensiones de la subbase.

Subbase cantidad de materiales				
Cantidad	2700.4	ton	2000	$m^3$
Grava	1512.224	ton	1179.58	$m^3$
Arena	1188.176	ton	826.84	$m^3$

Tabla 61. Dosificación de materiales para la subbase.

Los materiales utilizados para la obra son los empleados en esta tesis, los cuales poseen las siguientes densidades.

Densidades	
Unidades	ton/ $m^3$
Densidad grava	1.282
Densidad Arena	1.437
Densidad fibra de vidrio	2.58
Densidad Viscocrete	1.1
Cemento	1.27
Hormigón Patrón	2.455
Hormigón F0.35	2.402

Tabla 62. Densidades.



Para el análisis de ciclo de vida de este tramo de carretera, se analizó el uso de los hormigones: Patrón y Alternativo F0.35 (Dotación Optima).

Se consideró que la distancia entre la cantera y la obra, la cementera y la obra, la distribuidora de fibra de vidrio y la obra fue de 30 millas. Y que se emplea la siguiente maquinaria.

Equipment of construction					
Activity	Equipment	Brand/Model	Productivity	Fuel Consumption (	Fuel Type
Concrete Paving	Slipform paver	100 hp concrete slipform paver	564 tons/h	19.7 liters/h	diesel
Excavation, placing and compactation	Excavator	130 hp excavator	315 tons/h	34.17 liters/h	diesel
	Vibratory soil compactor	150 ho vibratory soil compactor	395 tons/h	27.52 liters/h	diesel
Concrete Mixing	mixing truck (enter mixing time)	350 hp Mixer Truck	Truck Mixing Time 5min/CY	2.02 liters/h	diesel
	plant mixer	200 hp electric plant	300 CY/hour	0.5 kWh/CY	electric

Tabla 63. Equipo de construcción.

Una vez que el pavimento ha cumplido su periodo de diseño estructural y se supone que el índice de serviciabilidad ha terminado, es necesario rehabilitar la estructura para que preste un servicio satisfactorio durante un nuevo tiempo. Para esto se consideró un ciclo de vida de 30 años en el cual se dará mantenimiento en diferentes periodos de tiempo dependiendo el tipo de hormigón que se use.

Mantenimiento			
Hormigón	Numero de mantenimientos	Vida útil (años)	periodo de tiempo de cada mantenimiento (años)
Patrón	4	30	6
F0.35	3	30	7.5

Tabla 64. Número de mantenimientos.

Debido a que al incorporar fibra de vidrio al hormigón se mejoró las características a tracción (34%), fisuración, se asume el periodo del tiempo para realizar un mantenimiento aumenta, disminuyendo así el número de mantenimientos necesarios a lo largo del ciclo de vida.

La resistencia a tracción del hormigón patrón, corresponde a un 75% de la resistencia del hormigón F0.35, por lo cual asumimos que el tiempo del mantenimiento al usar el hormigón F0.35 aumenta en un 25%, reduciendo así el número total de mantenimientos de 4 a 3.

El mantenimiento analizado consiste en la reparación de la capa de rodadura, del 15% (Porcentaje recomendado por la MTOP) del volumen total de hormigón ( $360 \text{ m}^2$ ).

Se obtuvieron los siguientes resultados

**Hormigón patrón ACV.**



Empleando el hormigón patrón, se necesitó las siguientes cantidades de material para construir el tramo analizado.

<b>Hormigón patrón (Capa de rodadura)</b>				
Cantidad necesaria	5892	tons	2400	<i>m</i> <sup>3</sup>
Agua	526.40	tons	526.40	<i>m</i> <sup>3</sup>
cemento	1759.28	tons	1385.26	<i>m</i> <sup>3</sup>
arena	1680.30	tons	1169.31	<i>m</i> <sup>3</sup>
grava	1910.18	tons	1490.00	<i>m</i> <sup>3</sup>
aditivo	15.85	tons	14.40	<i>m</i> <sup>3</sup>

Tabla 65. Cantidad de materiales necesarios para 1km de carretera. (Hormigón Patrón).

Palate nos muestra que la cantidad de energía y CO<sub>2</sub> utilizado es la siguiente:

		<b>Energy [GJ]</b>	<b>CO<sub>2</sub>e [kg] = GWP</b>
<b>Initial Construction</b>	<b>Materials Production</b>	11,327.2	1,614,887
	<b>Materials Transportation</b>	891.3	61,490
	<b>Equipment</b>	254.1	17,528
<b>Maintenance</b>	<b>Materials Production</b>	6,404.7	941,744
	<b>Materials Transportation</b>	876.4	60,462
	<b>Equipment</b>	0.0	0
<b>Total</b>	<b>Materials Production</b>	17,731.9	2,556,631
	<b>Materials Transportation</b>	1,767.7	121,952
	<b>Equipment</b>	254.1	17,528
<b>Total</b>		<b>19,753.7</b>	<b>2,696,111</b>

Tabla 66. Producción de energía y CO<sub>2</sub> (Hormigón Patrón)

<b>Phase</b>	<b>Layer</b>	<b>Energy [MJ]</b>	<b>CO<sub>2</sub>-e [kg]</b>
<b>Initial Construction Material Production</b>	Subbase and Embankment	420,548	29,010
	Wearing Course	10,906,660	1,585,877
	Structures	0	0
	<b>Total</b>	<b>11,327,208</b>	<b>1,614,887</b>
<b>Initial Construction Material Transportation</b>	Demolition Waste	0	0
	Subbase and Embankment	122,883	8,478



	Wearing Course	768,427	53,013
	Structures	0	0
	<b>Total</b>	<b>891,311</b>	<b>61,490</b>
<b>Initial Construction Equipment</b>	Demolition	0	0
	Subbase and Embankment	18,579	1,282
	Wearing Course	235,485	16,246
	Structures	0	0
	<b>Total</b>	<b>254,064</b>	<b>17,528</b>
<b>Maintenance Material Production</b>	Subbase and Embankment	0	0
	Wearing Course	6,404,664	941,744
	<b>Total</b>	<b>6,404,664</b>	<b>941,744</b>
<b>Maintenance Material Transportation</b>	Demolition Waste	0	0
	Subbase and Embankment	0	0
	Wearing Course	876,407	60,462
	<b>Total</b>	<b>876,407</b>	<b>60,462</b>

Tabla 67. Cantidad de energía y CO<sub>2</sub> emitido en la construcción, transporte y equipos. (Hormigón Patrón).

Desglosando los resultados en: materiales, transporte, equipo y Mantenimiento. Obtenemos lo siguiente:

### Initial construction materials.

		Energy [MJ]	CO <sub>2</sub> -e [kg]
<b>Initial Construction Materials- Subbase and Embankment</b>	Rock	0	0
	Gravel	235,507	16,246
	Sand	185,041	12,764
	Soil	0	0
	<b>Total</b>	<b>420,548</b>	<b>29,010</b>

		Energy [MJ]	CO <sub>2</sub> -e [kg]
<b>Initial Construction Materials - Wearing Course - PCC</b>	Rock	0	0
	Gravel	297,484	20,521
	Sand	261,683	18,051
	Cement	9,606,050	1,497,717
	Concrete Additives	504,320	32,811
	Glass Cullet	0	0
	Water	4856	465
	Steel Reinforcing Bars	0	0
	<b>Total</b>	<b>10,906,660</b>	<b>1,585,877</b>

### Initial construction transport.



		Energy [MJ]	CO <sub>2</sub> -e [kg]
<b>Initial Construction Materials Transport - Subbase and Embankment</b>	RAP from recycling plant/stockpile to site	0	0
	RCM from recycling plant/stockpile to site	0	0
	Rock	0	0
	Gravel	68,815	4,747
	Sand	54,068	3,730
	Soil	0	0
	<b>Total</b>	<b>122,883</b>	<b>8,478</b>

	Energy [MJ]	CO <sub>2</sub> -e [kg]
<b>Initial Construction Materials Transport - Wearing Course – PCC</b>	Rock	0
	Gravel	130,386
	Sand	114,695
	Cement	120,086
	Concrete Additives	1,081
	Coal Fly Ash	0
	Coal Bottom Ash	0
	Blast Furnace Slag	0
	Foundry Sand	0
	Glass Cullet	0
	Water	0
	Steel Reinforcing Bars	0
	PCC Mix to site	402,179
	<b>Total</b>	<b>768,427</b>
		<b>53,013</b>

### Initial construction equipment

	Energy [MJ]	CO <sub>2</sub> -e [kg]
<b>Initial Construction Equipment - Subbase and Embankment</b>	Rock, Gravel, Sand & Soil Placing and Compaction	18,579
	<b>Total</b>	<b>18,579</b>
		<b>1,282</b>

	Energy [MJ]	CO <sub>2</sub> -e [kg]
<b>Initial Construction Equipment - Wearing Course</b>	Paving HMA	0
	Paving PCC	235,485
	<b>Total</b>	<b>235,485</b>
		<b>16,246</b>

### Maintenance Materials

	Energy [MJ]	CO <sub>2</sub> -e [kg]
<b>Maintenance Materials - Wearing Course - PCC</b>	Rock	0
	Gravel	178,490
		<b>12,313</b>



Sand	157,013	10,831
Cement	5,763,658	898,635
Concrete Additives	302,592	19,687
Glass Cullet	0	0
Water	2912	279
Steel Reinforcing Bars	0	0
PCC Mixing	0	0
<b>Total</b>	<b>6,404,664</b>	<b>941,744</b>

### Maintenance Transport

	Energy [MJ]	CO <sub>2</sub> -e [kg]
Rock	0	0
Gravel	312,927	21,588
Sand	275,273	18,991
Cement	288,208	19,883
Concrete Additives	0	0
Coal Fly Ash	0	0
Coal Bottom Ash	0	0
Blast Furnace Slag	0	0
Foundry Sand	0	0
Glass Cullet	0	0
Water	0	0
Steel Reinforcing Bars	0	0
PCC Mix to site	0	0
<b>Total</b>	<b>876,407</b>	<b>60,462</b>

### Hormigón Alternativo F0.35.

Debido a que el hormigón con fibra de vidrio (F0.35) tiene una menor densidad, la cantidad de material para ocupar el mismo volumen es menor. Debido a esto, los materiales ocupados para la construcción del tramo de carretera son menores en comparación al hormigón patrón.

Hormigon F0.35				
CANTIDAD	5764.8	tons	2400	<i>m</i> <sup>3</sup>
Agua	513.23	tons	513.23	<i>m</i> <sup>3</sup>
cemento	1715.30	tons	1350.63	<i>m</i> <sup>3</sup>
arena	1638.29	tons	1140.08	<i>m</i> <sup>3</sup>
grava	1862.42	tons	1452.74	<i>m</i> <sup>3</sup>
aditivo	15.45	tons	14.04	<i>m</i> <sup>3</sup>
Fibra de vidrio	20.11	tons	7.79	<i>m</i> <sup>3</sup>

Tabla 68. Cantidad de materiales necesarios para 1km de carretera. (Hormigón con 0.35% de fibra).

PaLATE nos muestra que la cantidad de energía y CO<sub>2</sub> utilizado es la siguiente:

$$\boxed{\text{Energy [GJ]} \quad \text{CO}_2\text{e [kg]} = \text{GWP}}$$



<b>Initial Construction</b>	<b>Materials Production</b>	11,055.3	1,575,298
	<b>Materials Transportation</b>	874.8	60,354
	<b>Equipment</b>	249.0	17,177
<b>Maintenance</b>	<b>Materials Production</b>	4,692.2	689,989
	<b>Materials Transportation</b>	480.9	33,180
	<b>Equipment</b>	0.0	0
<b>Total</b>	<b>Materials Production</b>	15,747.6	2,265,287
	<b>Materials Transportation</b>	1,355.8	93,534
	<b>Equipment</b>	249.0	17,177
	<b>Total</b>	<b>17,352.4</b>	<b>2,375,998</b>

Tabla 69. Producción de energía y CO<sub>2</sub> (Hormigón con 0.35% de fibra))

Podemos observar que tanto la cantidad de energía y producción de CO<sub>2</sub> son menores a los obtenidos al emplear el hormigón patrón.

Phase	Layer	Energy [MJ]	CO <sub>2</sub> -e [kg]
<b>Initial Construction Material Production</b>	Subbase and Embankment	420,548	29,010
	Wearing Course	10,634,795	1,546,288
	Structures	0	0
	<b>Total</b>	<b>11,055,343</b>	<b>1,575,298</b>
<b>Initial Construction Material Transportation</b>	Demolition Waste	0	0
	Subbase and Embankment	122,883	8,478
	Wearing Course	751,962	51,877
	Structures	0	0
	<b>Total</b>	<b>874,846</b>	<b>60,354</b>
<b>Initial Construction Equipment</b>	Demolition	0	0
	Subbase and Embankment	18,579	1,282
	Wearing Course	230,402	15,895
	Structures	0	0
	<b>Total</b>	<b>248,981</b>	<b>17,177</b>
<b>Maintenance Material Production</b>	Subbase and Embankment	0	0
	Wearing Course	4,692,236	689,989
	<b>Total</b>	<b>4,692,236</b>	<b>689,989</b>
<b>Maintenance Material Transportation</b>	Demolition Waste	0	0
	Subbase and Embankment	0	0



	Wearing Course	480,947	33,180
	<b>Total</b>	<b>480,947</b>	<b>33,180</b>

Tabla 70. Cantidad de energía y CO<sub>2</sub> emitido en la construcción, transporte y equipos. (Hormigón Patrón).

Desglosando los resultados en: materiales, transporte y equipo. Obtenemos lo siguiente:

### Initial construction materials.

Initial Construction Materials- Subbase and Embankment		Energy [MJ]	CO <sub>2</sub> -e [kg]
	Rock	0	0
	Gravel	235'507	16'246
	Sand	185'041	12'764
	Soil	0	0
<b>Total</b>		<b>420'548</b>	<b>29'010</b>

Initial Construction Materials - Wearing Course - PCC		Energy [MJ]	CO <sub>2</sub> -e [kg]
	Rock	0	0
	Gravel	290'045	20'008
	Sand	255'142	17'600
	Cement	9'365'909	1'460'276
	Concrete Additives	491'712	31'991
	Glass Cullet	1	0
	Water	4735	453
	Steel Reinforcing Bars	0	0
	PCC Mixing	227252	15960
<b>Total</b>		<b>10'634'794</b>	<b>1'546'288</b>

### Initial Construction Transport

Initial Construction Materials Transport - Subbase and Embankment		Energy [MJ]	CO <sub>2</sub> -e [kg]
	RAP from recycling plant/stockpile to site	0	0
	RCM from recycling plant/stockpile to site	0	0
	Rock	0	0



	Gravel	68'815	4'747
	Sand	54'068	3'730
	Soil	0	0
	<b>Total</b>	<b>122'883</b>	<b>8'478</b>

<b>Initial Construction Materials Transport - Wearing Course - PCC</b>	Rock	0	0
	Gravel	127'126	8'770
	Sand	111'828	7'715
	Cement	117'084	8'077
	Concrete Additives	1'054	73
	Coal Fly Ash	0	0
	Coal Bottom Ash	0	0
	Blast Furnace Slag	0	0
	Foundry Sand	0	0
	Glass Cullet	1'372	95
	Water	0	0
	Steel Reinforcing Bars	0	0
	PCC Mix to site	393'496	27'147
	<b>Total</b>	<b>751'959</b>	<b>51'877</b>

**Initial construction equipment**

		Energy [MJ]	CO <sub>2</sub> -e [kg]
<b>Initial Construction Equipment - Subbase and Embankment</b>	Rock, Gravel, Sand & Soil Placing and Compaction	18'579	1'282
	<b>Total</b>	<b>18'579</b>	<b>1'282</b>

		Energy [MJ]	CO <sub>2</sub> -e [kg]
<b>Initial Construction Equipment - Wearing Course</b>	Paving HMA	0	0
	Paving PCC	230'401	15'895
	<b>Total</b>	<b>230'401</b>	<b>15'895</b>

**Maintenance Materials**

		Energy [MJ]	CO <sub>2</sub> -e [kg]
<b>Maintenance Materials - Wearing Course - PCC</b>	Rock	0	0
	Gravel	130,514	9,003
	Sand	114,806	7,919
	Cement	4,223,095	658,440
	Concrete Additives	221,690	14,423
	Glass Cullet	0	0
	Water	2131	204
	Steel Reinforcing Bars	0	0



	PCC Mixing	0	0
Total	4,692,236	689,989	

### Maintenance Transport

	Energy [MJ]	CO <sub>2</sub> -e [kg]
Maintenance Materials Transport - Wearing Course - PCC	Rock	0
	Gravel	171,611
	Sand	150,957
	Cement	158,380
	Concrete Additives	0
	Coal Fly Ash	0
	Coal Bottom Ash	0
	Blast Furnace Slag	0
	Foundry Sand	0
	Glass Cullet	0
	Water	0
	Steel Reinforcing Bars	0
	PCC Mix to site	0
Total	480,947	33,180

Como podemos ver en la ilustración 57 y 59, tanto la energía como la cantidad de CO<sub>2</sub> emitida al ambiente se disminuyen considerablemente al usar el hormigón alternativo (F0.35). Por lo cual el hormigón con fibra de vidrio es más sostenible teniendo así un menor impacto ambiental.

Energy [GJ]				
Tipo de hormigón	Materials Production	Materials Transportation	Equipment	Total
Hormigón con 0.35% de fibra	15'747.6	1'355.8	249.0	17'352.4
Hormigón Patrón	17'731.87	1'767.7	254.1	19'753.7

Tabla 71. Tabla comparativa de energía emitida entre el hormigón Patrón y el hormigón con 0.35% de fibra (F0.35).

Energy [GJ]		
Hormigón Patrón	Construcción	12'179.2
	Mantenimiento	5'173.2
Hormigón con 0.35% de fibra	Construcción	12'472.6
	Mantenimiento	7'281.1

Tabla 72. Distribución de la energía en la construcción y el mantenimiento.

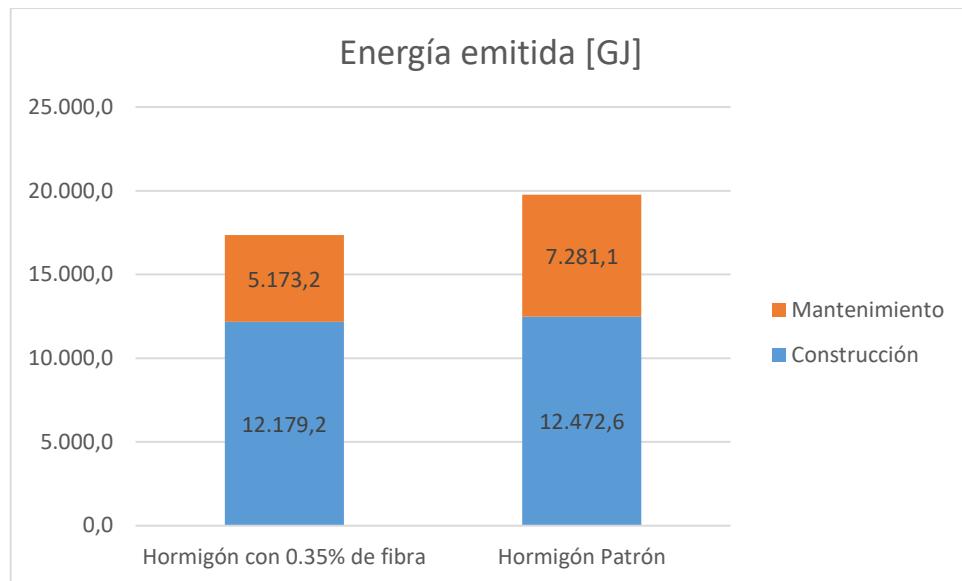


Ilustración 62 Ilustración comparativa de energía emitida entre el hormigón Patrón y el hormigón con 0.35% de fibra.

El ahorro de energía con el hormigón alternativo es de 2401.3GJ, el cual es equivalente a 667025Kwh. El precio de 1kWh en Ecuador, según la Corporación Nacional de Electricidad CNEL EP es de 0.0926USD. Por consiguiente, existe un ahorro de **61766.5USD**.

Una bombilla de 100W encendida por 10 horas, consume 1Kwh, por lo tanto, si usáramos el hormigón alternativo, podría ahorrarse la energía necesaria para encender 667025 bombillas de 100 W por diez horas seguidas. Si asumimos que una casa promedio consta de 20 bombillas, el ahorro de energía equivale aproximadamente al necesario para brindar luz por diez horas a 33351 casas.

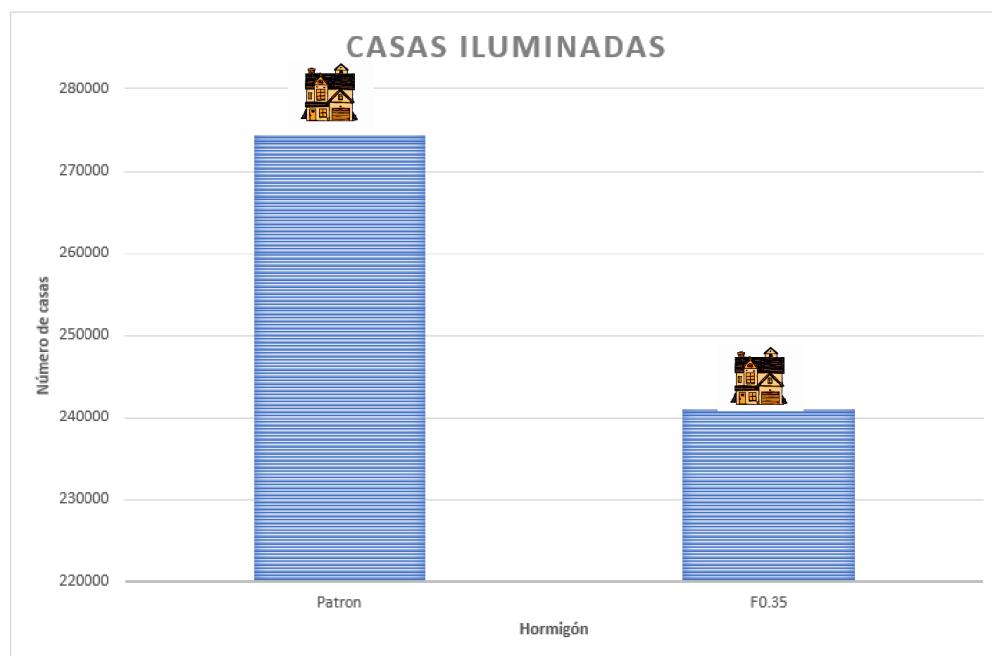


Ilustración 63. Casas iluminadas con la energía emitida.



CO <sub>2</sub> e [kg] = GWP				
Tipo de hormigón	Materials Production	Materials Transportation	Equipment	Total
Hormigón Patrón	2'556'631.12	121'952.25	17'527.50	2'696'110.87
Hormigón con 0.35% de fibra	2'265'287.04	93'534	17'176.80	2'375'997.99

Tabla 73. Tabla comparativa de CO<sub>2</sub> emitida entre el hormigón Patrón y el hormigón con 0.35% de fibra (F0.35).

CO <sub>2</sub> e [kg] = GWP		
Hormigón Patrón	Construcción	1'693'905.2
	Mantenimiento	1'002'205.7
Hormigón con 0.35% de fibra	Construcción	1'652'828.9
	Mantenimiento	723'169.1

Tabla 74. Distribución del CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera en el construcción y mantenimiento.

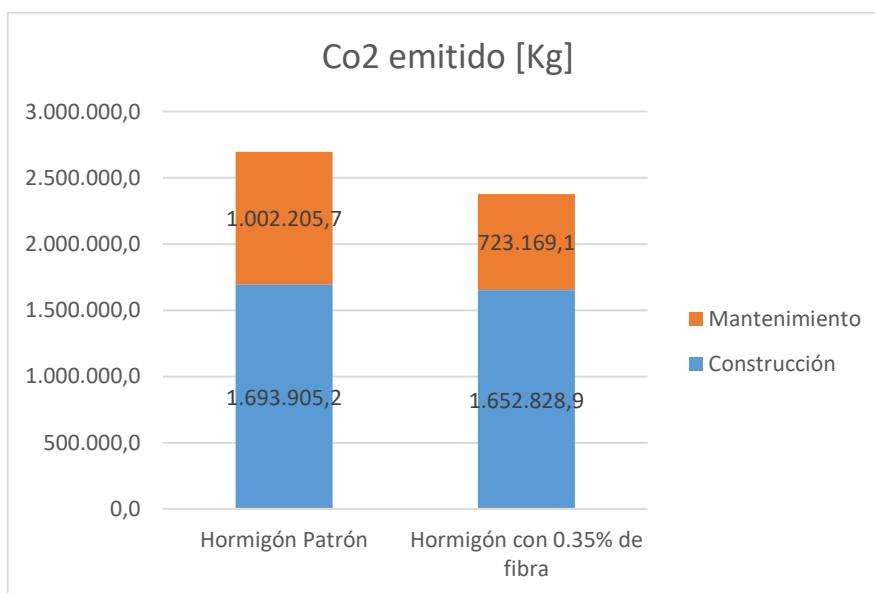


Ilustración 64. Ilustración comparativa de CO<sub>2</sub> emitido por el hormigón Patrón y el hormigón con 0.35% de fibra

Según la Agencia de medio ambiente europeo (AEMA), el precio de emitir una tonelada de CO<sub>2</sub> en el año 2019 tuvo una media de 24.85\$/tCO<sub>2</sub> y Según la (Comisión Interdepartamental del cambio Climático , 2011), el CO<sub>2</sub> emitido por un auto que consuma gasolina es de 2.38Kg por cada litro de gasolina.

Se asume que el auto promedio consume 0.083litro por cada kilómetro, emitiendo 0.198kg de CO<sub>2</sub> por kilómetro. Utilizado el hormigón alternativo se logra un ahorro de 320113Kg de CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera, el cual representa al CO<sub>2</sub> emitido por 1616732 automóviles al recorrer 1 km ahorrándose 7954\$.

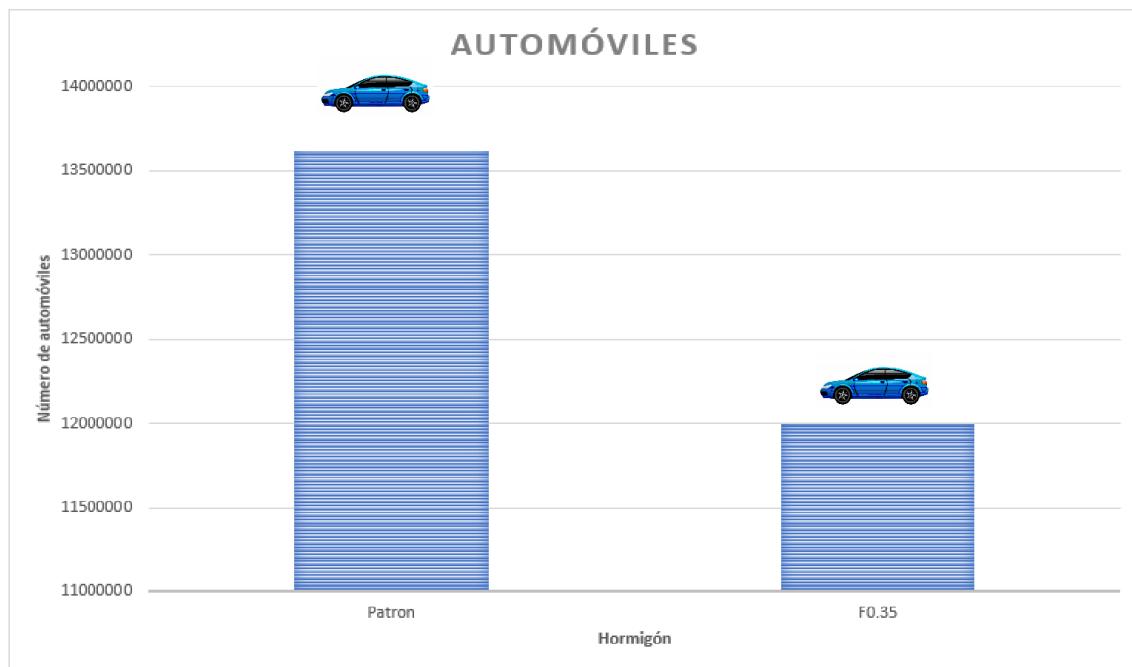


Ilustración 65. vehículos que emiten el CO<sub>2</sub> producido en la construcción.

### 3.10.1. Análisis de costos de energía producida y el CO<sub>2</sub> emitido durante de construcción y Mantenimiento del tramo de vía propuesto.

Según los resultados obtenidos con el software PaLATE existe un ahorro significativo de energía consumida y CO<sub>2</sub> emitido, al usar el hormigón alternativo. A pesar que el hormigón alternativo con fibra de vidrio resulta más caro en términos de materiales, este presenta una mayor sostenibilidad que el hormigón patrón, consumiendo menos energía y emitiendo menor cantidad de CO<sub>2</sub> en un mismo proceso constructivo.

Analizando el costo de energía generada y el CO<sub>2</sub> emitido al construir el tramo de vía propuesto (15% de mantenimiento), obtenemos los siguientes resultados.

Análisis de costo de energía y CO <sub>2</sub>						
Tipo de Hormigón	Precios materiales (tramo de vía +mant.) (\$)	Costo unitario energía (\$/kWh)	Cantidad de energía de construcción kWh	Costo de energía de construcción (\$)	Cantidad de CO <sub>2</sub> emitido durante la construcción (kg)	Costo del CO <sub>2</sub> emitido durante la construcción (\$)
Patrón	451761.51	0.09	3464611.11	320822.99	1693905	42093.54
F0.35	556217.50	0.09	3383111.11	313276.09	1652829	41072.80
Tipo de Hormigón	Cantidad de energía de mantenimiento kWh	Costo de energía de mantenimiento (\$)	Cantidad de CO <sub>2</sub> emitido durante el mantenimiento (kg)	Costo del CO <sub>2</sub> emitido durante el mantenimiento (\$)	Costo total (\$)	Variación (%)
Patrón	2022519.88	187285.34	1002205.68	24904.81	1026868.20	100.00%
F0.35	1436995.35	133065.77	723169.0667	17970.75	1061602.91	<b>103.38%</b>

Tabla 75. Análisis de costos.

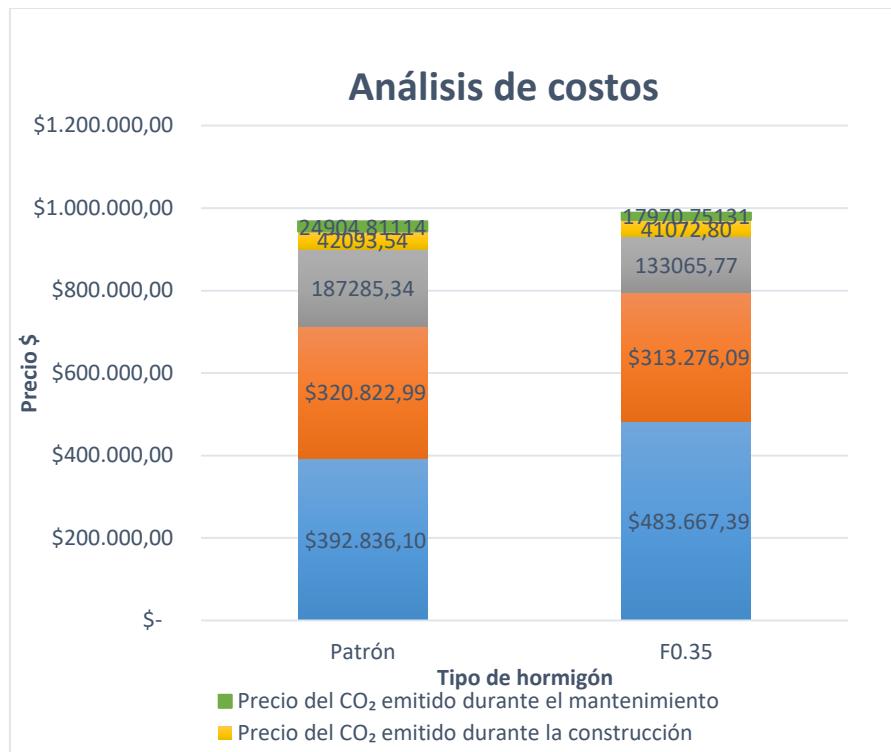


Ilustración 66. Análisis de costo energía producida y CO<sub>2</sub> emitido.

A pesar que el hormigón alternativo sigue siendo la opción más costosa, este presenta una menor producción de energía Y CO<sub>2</sub>, lo que provoca una disminución de su precio total en el proceso constructivo.

para un proyecto de vía de mayor longitud al analizado en esta investigación, existirá una mayor diferencia en la cantidad de energía Y CO<sub>2</sub> emitido, provocando que el precio del hormigón alternativo con respecto al hormigón patrón sea menor.

Si consideramos un mayor porcentaje de mantenimiento (>15%) podemos observar que el costo total de emplear el hormigón alternativo disminuye.

% mantenimiento	Tipo de hormigón	Precio Materiales y transporte (\$)	Energía Consumida en la construcción y mantenimiento		CO <sub>2</sub> emitido en la construcción y mantenimiento	
			Energía Consumida (KWh)	Precio energía Total (\$)	CO <sub>2</sub> emitido (kg)	Precio CO <sub>2</sub> (\$)
0	patrón	392836.10	3464606.23	320822.54	1693905	42093.54
	F0.35	483667.39	3383102.68	313275.31	1652829	41072.80
10	patrón	432119.71	4812977.91	445681.75	2362057	58697.11
	F0.35	532034.13	4339271.76	401816.56	2133996	53029.80
15	patrón	451761.51	5487138.89	508109.06	2696111	66998.36
	F0.35	556217.50	4820111.11	446342.29	2375998	59043.55
20	patrón	471403.32	6161277.78	570534.32	3030164	75299.58
	F0.35	580400.87	5295805.56	490391.59	2615266	64989.36
25	patrón	491045.12	6835498.40	632967.15	3364263	83601.94
	F0.35	604584.24	5773893.83	534662.57	2855852	70967.92
30	patrón	510686.93	7509640.36	695392.70	3698315	91903.13



	F0.35	628767.61	6251961.33	578931.62	3096432	76946.34
35	patrón	530328.73	8183789.17	757818.88	4032370	100204.39
	F0.35	652950.98	6730341.80	623229.65	3337085	82926.56
40	patrón	549970.54	8857931.14	820244.42	4366422	108505.60
	F0.35	677134.35	7208426.11	667500.26	3577668	88905.06
45	patrón	569612.34	9532160.85	882678.09	4700521	116807.95
	F0.35	701317.72	7686510.49	711770.87	3818252	94883.56
50	patrón	589254.15	10206309.66	945104.27	5034576	125109.20
	F0.35	725501.09	8144165.65	754149.74	4054051	100743.16
100	patrón	785672.20	16948006.26	1569385.38	8375244	208124.82
	F0.35	967334.78	12946147.72	1198813.28	6464875	160652.15

Tabla 76. Costo de energía producida y CO<sub>2</sub> emitido con diferentes porcentajes de mantenimiento

A medida que se va aumentando el porcentaje de mantenimiento, la diferencia entre la energía producida y CO<sub>2</sub> emitido por los hormigones patrón y F0.35 va creciendo.

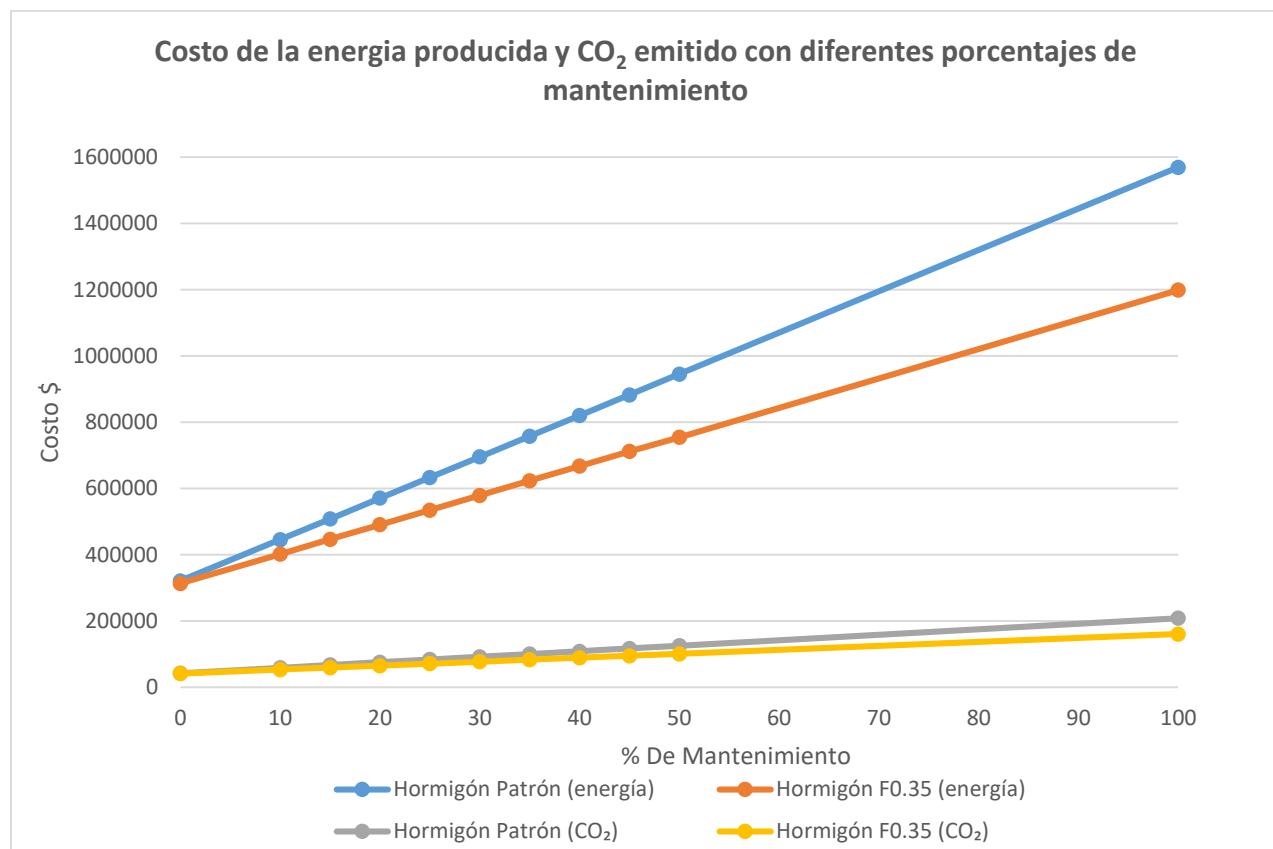


Ilustración 67. Costo de energía producida y CO<sub>2</sub> emitido con diferentes porcentajes de mantenimiento.

Al analizar el costo total del tramo de vía (materiales + energía + CO<sub>2</sub>) con diferentes porcentajes de mantenimiento obtenemos la siguiente variación entre los costos totales de del hormigón patrón y el hormigón alternativo:



Variación de costo total del tramo de vía en función del porcentaje de mantenimiento					
% Mantenimiento	Hormigón patrón (\$)	Hormigón F0.35 (\$)	Variación		Observaciones
			% Hormigón patrón	% Hormigón F035	
0	755752.18	838015.50	100	110.88	Sin mantenimiento
10	936498.57	986880.50	100	105.38	Bacheo Menor
15	1026868.93	1061603.34	100	103.38	Mantenimiento típico según la MTOP
20	1117237.22	1135781.82	100	101.66	Mantenimiento de 1/5 del total de la vía
25	1207614.21	1210214.73	100	100.22	Mantenimiento de 1/4 del total de la vía
30	1297982.75	1284645.56	100	98.97	Bacheo mayor
35	1388352.01	1359107.19	100	97.89	Bacheo mayor
40	1478720.56	1433539.66	100	96.94	Bacheo mayor
45	1569098.39	1507972.15	100	96.10	Bacheo mayor
50	1659467.63	1580393.98	100	95.23	Mantenimiento de la mitad de la vía
100	2563182.40	2326800.21	100	90.78	Recapeo total

Tabla 77. Variación de costo total del tramo de vía en función del porcentaje de mantenimiento.

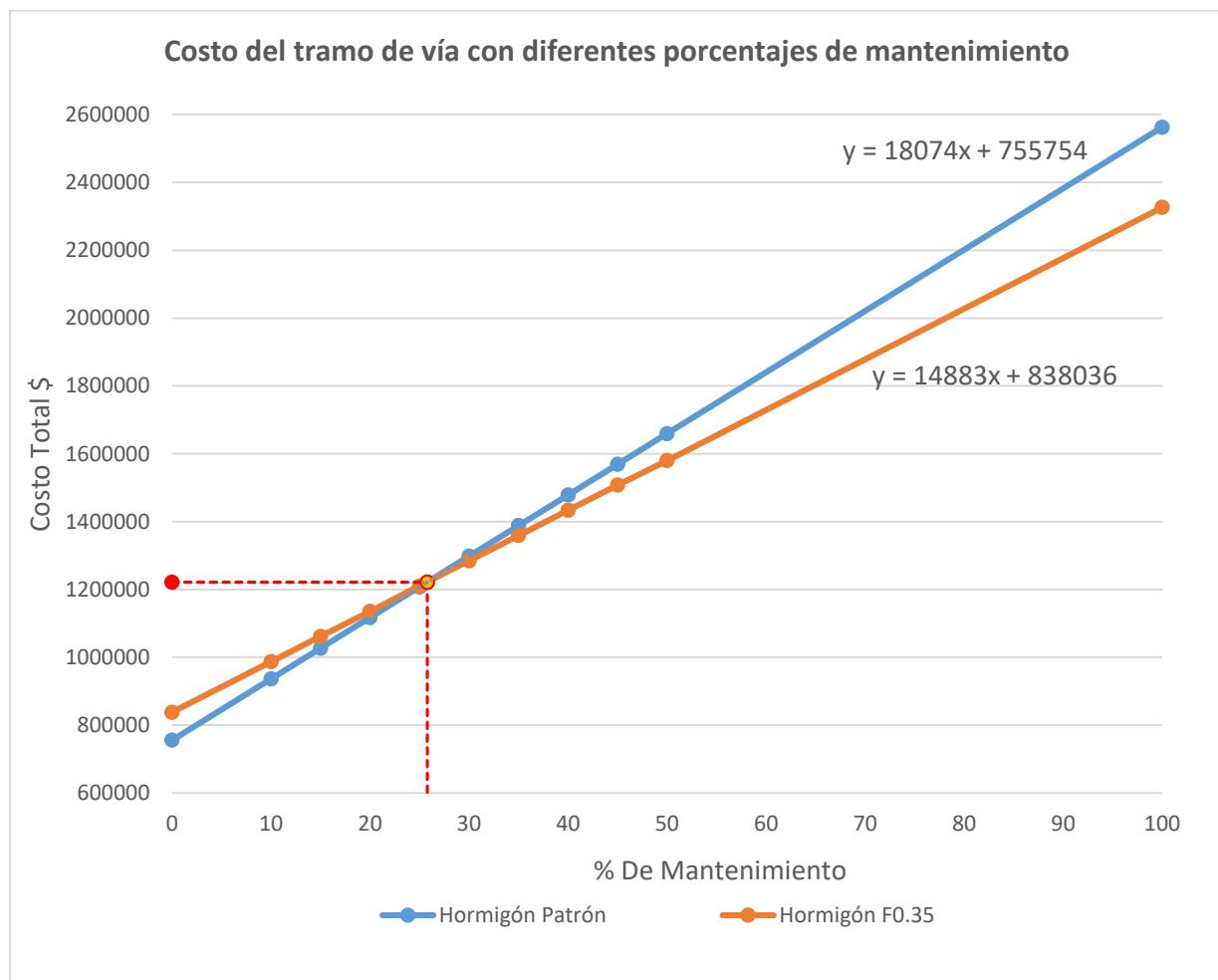


Ilustración 68. Costo total del tramo de vía con diferentes porcentajes de mantenimiento.



En base a estos resultados se concluye que el uso del hormigón alternativo F0.35 para la construcción del tramo de vía analizado, es económicamente viable a partir de un 25.79% de mantenimiento.



## CAPITULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. CONCLUSIONES

- La utilización de hormigón con fibra de vidrio es factible desde un punto de vista técnico, debido a que el hormigón con fibra de vidrio presenta un aumento **del 34.5% a los 7 días y un 31.7% a los 28 días** en la resistencia a tracción, reducción a la fisuración y también disminución de su peso permitiendo realizar construcciones más esbeltas. Con respecto al análisis económico, presenta una mejora notable, sobre todo en proyectos en donde se necesite gran volumen de hormigón, debido a que existe un ahorro en la energía necesaria para la producción (**para la vía propuesta existe un ahorro de energía 12.2%**), así como una disminución de su material en comparación con el hormigón estructural. Este tipo de hormigones tomando en cuenta el análisis de ciclo de vida favorece al medio ambiente ya que su producción presenta una disminución de CO<sub>2</sub> liberado a la atmósfera en comparación con el hormigón tradicional (**para la vía propuesta existe un ahorro del CO<sub>2</sub> del 13.4%**).

#### 4.1.1. Con respecto a la caracterización de los materiales pétreos.

- Tanto la grava como la arena cumplieron con los requisitos de granulometría, módulo de finura y abrasión necesarios para la elaboración de hormigones según la norma ASTM.

#### 4.1.2. Con respecto al diseño de los hormigones.

- La dosificación del hormigón patrón se basó en la realizada por los autores José Castro y Gabriela Ojeda en la tesis *“Diseño y elaboración de hormigones especiales de alto desempeño”*, debido a que los materiales utilizados en su investigación son similares a los empleados en nuestro trabajo de titulación.
- La dosificación optima de adición de fibra de vidrio según los autores analizados varía entre el 0.5 y 1% del total del peso del hormigón, debido a que empleamos una longitud de fibra de vidrio mayor (6cm) a la empleada por estos autores, escogimos como dotación inicial 0.5%, seguido del 0.35% y 0.25% de adición de fibra de vidrio.
- El mejor proceso para la colocación de la fibra de vidrio en la mezcla fue, el de verterla en forma homogénea asemejando una lluvia, mientras la mezcladora está en movimiento.

#### 4.1.3. Con respecto a las propiedades físico-mecánicas de los hormigones.

- La fibra de vidrio afecta en gran medida a la trabajabilidad, pudiéndose atribuir la disminución de esta a dos causas
  - % de fibra de vidrio: A mayor incorporación de fibra de vidrio en la mezcla de hormigón, menor será la trabajabilidad (disminuyendo su asentamiento de 26.5cm con el hormigón patrón a 2cm con un porcentaje de adición máximo de fibra de vidrio de 0.5% ).



- Longitud de fibra de vidrio: A mayor longitud de fibra de vidrio empleada en la mezcla de hormigón, menor será la trabajabilidad.
- La resistencia a compresión se ve afectada negativamente por la incorporación de la fibra de vidrio, produciéndose disminuciones proporcionales a la adición de la fibra de vidrio, pero al no ser disminuciones abruptas, estas se pueden considerar como poco significativas (8%).
- Al tratarse de hormigones de alta resistencia, las disminuciones de resistencia a compresión provocadas por la adición de fibra de vidrio, no comprometen la funcionalidad de este, como hormigón estructural ( $f'_c > 20\text{Mpa}$ ).
- La adición de la fibra de vidrio en el hormigón, provoca una falla dúctil ante esfuerzos a compresión, mientras mayor sea el porcentaje de fibra de vidrio adicionado, la falla será más dúctil. Esto resulta de mucha utilidad en hormigones de altas resistencias, debido a que estos al estar sometidos a grandes esfuerzos a compresión tienen la tendencia de liberar energía de forma explosiva, la fibra de vidrio evitaría esto, provocando fracturas de tipo dúctil, liberando la energía paulatinamente hasta la rotura.
- La adición de la fibra de vidrio en el hormigón, provoca aumentos significativos en la resistencia a tracción, llegando a tener un aumento de hasta un **34.5% a los 7 días y un 31.7% a los 28 días de la resistencia original**.
- La longitud de la fibra de vidrio es directamente proporcional al aumento de la resistencia a tracción, e inversamente proporcional al porcentaje de fibra necesario para obtener la resistencia máxima a tracción (dotación optima), aumentando la resistencia a tracción mientras más grande sea la longitud de la fibra a emplear, debido a que la longitud de desarrollo aumenta, y siendo menor el porcentaje necesario para llegar a la dotación óptima.
- Dotaciones mayores a la óptima ( $>0.35\%$ ) presentan problemas en la dispersión de la fibra de vidrio, ocasionando decrementos en la resistencia a tracción con respecto a la dotación óptima.
- En base al aumento de resistencia a tracción y la disminución de la trabajabilidad, se selecciona como dotación optima de fibra de vidrio una adición del 0.35% del peso total de la mezcla. **Provocando el máximo aumento en la resistencia a tracción y brindando una trabajabilidad plástico-rígida.**
- La fibra de vidrio provoca un aligeramiento al hormigón (2.4% a los 7 días y 2.5% a los 28 días con la dotación optima (0.35%)), el cual es proporcional al porcentaje de adición de la misma, este aligeramiento se debe a dos causas:
  - La baja densidad de la fibra de vidrio ( $2.58\text{ gr/cm}^2$ ).
  - Incorporación de aire provocada por la fibra de vidrio. Como resultado adicional de la incorporación de aire, el hormigón presenta una mayor absorción (aumentando de 0.36% a 0.52 % a los 7 días y de 0.31% a 0.6% a los 28 días).



- En el ensayo esclerométrico, se pudo notar que el índice de rebote disminuye conforme se aumenta el porcentaje de adición de fibra de vidrio, corroborando la disminución de resistencia a compresión obtenida mediante el uso de la prensa hidráulica.
- El índice de rebote obtenido en esta investigación disminuye de manera exponencial a medida que se aumenta el porcentaje de fibra de vidrio mediante la siguiente ecuación  $1.7*2.77e^{0.048*Q}$ .
- A medida que se incorpora fibra de vidrio al hormigón, la velocidad ultrasónica que pasa a través de los cilindros, disminuye (de 4800m/s a 4470m/s a los 7 días y de 4890m/s a 4250m/s a los 28 días), lo cual se puede interpretar como una disminución en su calidad. Cabe recalcar que las disminuciones son pequeñas y no producen un cambio en la clasificación del hormigón, esto debido a que se emplean rangos de velocidades ultrasónicas grandes.

#### **4.1.4. Con respecto al análisis de costos de los hormigones.**

- Aunque se emplean porcentajes pequeños de adición de fibra de vidrio (0-0.5%), el aumento económico es significativo, debido a que la fibra de vidrio es un material relativamente caro en comparación con los demás materiales que constituyen el hormigón. El aumento de precio de los materiales requeridos para el hormigón con dotación óptima de fibra de vidrio (0.35%) constituye un incremento del 23% con respecto al precio de los materiales requeridos para la creación del hormigón patrón.
- Si bien el hormigón con fibra de vidrio es más costoso que el hormigón patrón en volúmenes pequeños, este podría presentar un ahorro económico en proyectos de construcción a gran escala, este debido a que el hormigón alternativo presenta una menor densidad, provocando que la cantidad de materiales necesarios para ocupar un mismo espacio sea menor que el hormigón patrón, además de producir una menor cantidad de energía la cual representa un ahorro económico extra.
- Se analizó la energía producida y CO<sub>2</sub> emitido en los procesos de construcción y mantenimiento del tramo de vía propuesto, desde un punto de vista económico y **se demostró que el hormigón con fibra de vidrio resultó ser más económico a partir de mantenimientos que superen el 25.79% del total del tramo de vía.**

#### **4.1.5. Con respecto al análisis de sostenibilidad.**

- El análisis del ciclo de vida del hormigón demostró que el hormigón alternativo es más sostenible con el medio ambiente, gastando menos energía de producción y emitiendo menos CO<sub>2</sub>. Esto debido a que el hormigón alternativo tiene una menor densidad, por lo tanto, se necesitan menos materiales para ocupar un mismo volumen en relación al hormigón patrón.
- Al utilizar el hormigón con fibra de vidrio en el tramo de vía propuesto, y con un mantenimiento del 15% de la capa de rodadura, existe un ahorro de energía



producida de 667025 KWh el cual es equivalente a brindar luz a 33351 casas por 10 horas, ahorrando \$ 61766.5

- Al utilizar el hormigón con fibra de vidrio en el tramo de vía propuesto, y con un mantenimiento del 15% de la capa de rodadura, **existe un ahorro de CO<sub>2</sub> emitido de 320113kg, el cual es equivalente al CO<sub>2</sub> emitido por 1616732 automóviles al recorrer 1 km.**

#### 4.2. RECOMENDACIONES

##### 4.2.1. Metodologías y ensayos.

- Se debe tener cuidado al manipular la fibra, para esto se debe utilizar guantes y gafas de seguridad, ya que esta puede ingresar a los ojos o a la piel provocando irritaciones.
- Para la realización del ensayo de tracción indirecta, se debe tener en cuenta que las placas de apoyo se encuentren directamente sobre el eje del cilindro, para que así se distribuya uniformemente la fuerza aplicada por la prensa.
- Para la realización del ensayo de compresión, se recomienda utilizar neoprenos en buen estado para evitar falsas lecturas de rotura.
- Para la realización del ensayo de la velocidad ultrasónica, se recomienda utilizar gel o vaselina en suficiente cantidad, para lograr una correcta transmisión del impulso ultrasónico y obtener resultados adecuados.
- Para la realización del ensayo esclerométrico, se recomienda tener el esclerómetro en una posición perpendicular a la superficie del cilindro en donde se tomará la lectura.

##### 4.2.2. Con respecto a investigación futura.

- Para la ampliación del conocimiento del comportamiento del hormigón con fibra de vidrio, se recomienda la realización de vigas de hormigón macizo y hormigón armado con el objetivo de analizar el comportamiento mecánico de estas.
- Analizar la ventaja o desventaja que presente el hormigón con fibra de vidrio con respecto a la ductilidad en vigas.
- Analizar el comportamiento de la fibra de vidrio en el hormigón con diferentes aditivos y dosificaciones.
- se recomienda realizar un mayor número de ensayos para los porcentajes probados y comprobar la repetibilidad de los resultados.
- Analizar el comportamiento del hormigón con diferentes longitudes de fibra de vidrio, corroborando ciertas hipótesis teóricas que se plantearon en este trabajo de titulación.



## 5. BIBLIOGRAFIA

- AASHTO T358. (2015). *Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. Washington: AASHTO .
- ACI 211.1. (1991). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. ACI.
- Arango, S., & Zapata, J. (2013). *INFLUENCIA DE LA FIBRA DE VIDRIO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MEZCLAS DE CONCRETO*. Bogota: UNIVERSIDAD EAFIT.
- ASTM 494. (2005). *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. ASTM.
- ASTM C150. (2007). *Especificación Normalizada para Cemento Portland*. ASTM International.
- ASTM C33. (2018). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International.
- ASTM C39. (2018). *Standard Test Method Compressive Strength of Concrete Cylinders*. ASTM International.
- ASTM C494. (2005). *Especificación Normalizada de Aditivos Químicos para Concreto*. ASTM International.
- ASTM C496. (2017). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International.
- ASTM C597 -16. (2016). *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM C642. (1997). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. ASTM International.
- ASTM C805. (2018). *Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete*. West Conshohocken: ASTM.
- Babar, A., Liaqat , Q., Ali, R., Muhammad, N., Safi, R., & Muhammad, R. (2019). *Influence of Glass Fibers on Mechanical Properties of Concrete*. Taxila: Civil Engineering Journal.
- Barros, A., Caballero, M., & Zaldo, V. (1981). *APLICACIONES DEL CEMENTO REFORZADO CON FIBRAS DE VIDRIO*. Madrin: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Bohorquez, J. (2011). *Uso de materiales alternativos para mejorar las propiedades mecanicas del hormigon*. Bogota: UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA.



Bravo Celis, J. P. (2003). *“Comportamiento Mecánico del Hormigón Reforzado con fibra de vidrio”*. Santiago: UNIVERSIDAD DE CHILE .

Bravo, J. (2003). *Comportamiento Mecánico del Hormigón Reforzado con fibra de vidrio*. Santiago de Chile: UNIVERSIDAD DE CHILE.

CAÑAS, J. S. (2010). *DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA*. El Salvador: UNIVERSIDAD CENTROAMERICANA.

Carmona, S., & Cabrera, M. (2009). *Comportamiento al corte de hormigones reforzado con fibras de acero*. Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María.

Castañeda, A., Dias, N., Gonzales, E., Martínez , M., & Corvo, F. (2005). *Influencia de la penetración de Iones Cloruros en el hormigon armado a diferentes relaciones Agua/Cemento y Condiciones de Exposición*. Habana: Universidad de la ciencias informaticas.

Castro, J., & Ojeda, G. (2019). *Diseño y elaboración de hormigones especiales de alto desempeño*. Cuenca: Universidad De Cuenca.

Comisión Interdepartamental del cambio Climático . (2011). *GUÍA PRÁCTICA PARA EL CÁLCULO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO* . Catalunya : Oficina Catalana de Cavi Climàtic.

Corral\*, J. T. (2012). *CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DE LAS PLANTAS*. Republica Dominicana: CIENCIA Y SOCIEDAD.

Godoy, I. (2015). *COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO*. VALDIVIA: UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE.

Holcim. (2015). *Holcim Premium. Cemento hidráulico Tipo HE de alta resistencia inicial* . Guayaquil: Holcim Ecuador S.A.

Holcim. (2016). *Evolución de la normas*. Semana del cemento y el concreto Holcim, 2016-11-10.

Horvath, A., Pacca, S., Masanet, E., & Canapa, R. (2011). *PaLATE v2.2* . Washington: Greenroads.

Jiang, Fan, K., & Wu, F. (2014). *Experimental study on the mechanical properties and microstructure od chopped basalt fibre reinforced concrete*. Nanjing: Materials & Design.

Martinez, C. (2011). *HORMIGON TRASLUCIDO CON FIBRA DE VIDRIO*. VALENCIA: UNIVERSIDAD POLITECTICA DE VALENCIA.

Ministerio de Fomento de España. (2008). *EHE-08 INSTRUCCION DE HORMIGONES ESTRUCTURALES*. Madrid: Secretaria General Técnica.

Muñoz, C. (2007). *COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL HORMIGON REFORZADO CON FIBRAS DE VIDRIO*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.



- NTE INEN 1108. (2014). *AGUA POTABLE. REQUISITOS*. Quito: NTE INEN.
- Osorio, J. (2013, 04 17). *360 en concreto*. Retrieved from Concreto reforzado con fibras de vidrio: <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/el-concreto-reforzado-con-fibras-de-vidrio>
- Perez, C., Fernández, R., Monroy, F., Marcos, P., Caballero, J., & Thenoux, G. (2007). *MANUAL DE ENSAYOS DE SUELOS Y MATERIALES*. La paz: Administradora Boliviana de Carreteras.
- Pilicer, V. (2014). *Ensayos no destructivos en hormigón. Georadar y Ultrasonido*. Valéncia: Universidad Politécnica de Valéncia.
- Proceq. (S.F.). *The Silver Schmidt Reference Curve*.
- Sanchez, L., & Sanchez, V. (1991). *COMPORTAMIENTO A TRACCIÓN DE CEMENTOS REFORZADOS CON FIBRA DE VIDRIO*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- SIKA. (2015). *Sika® ViscoCrete®-4100*. Quito: SIKA.
- Sika Ecuador. (2018). *Plastificantes*. Guayaquil: Sika.



## 6. ANEXOS

### 6.1. HOJA TECNICA DEL CEMENTO HOLCIM TIPO HE

**Holcim**

**Certificado de Producto**

Autor:	Técnico de Control de Calidad	Revisa:	Jefe de Control de Calidad	Aprueba:	Jefe de Control de Calidad
			Doc ID:	ACB0-H00-RC25	
			Revisión:	6	

**Cemento de alta resistencia inicial Tipo HE**

El Cemento Holcim Premium Tipo HE es un cemento de alta resistencia inicial que se fabrica bajo la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2380. Esta norma establece los requisitos de desempeño que deben cumplir los cementos hidráulicos y los clasifica de acuerdo a sus propiedades específicas.

**Especificaciones técnicas**

Fecha reporte:	02.04.2019
Fecha de	01.03.2019 a 01.04.2019

**Requisitos Químicos**

La composición química para el cemento no está especificada en la NTE INEN 2380, sin embargo los constituyentes individuales molidos y mezclados para producirlo son analizados.

**Requisitos Físicos**

	NTE INEN 2380	Valor
Cambio de longitud por autoclave, % máximo	0,80	-0,01
Tiempo de fraguado, método de Vicat		
Inicial, no menos de, minutos	45	
Inicial, no más de, minutos	420	119
Contenido de aire del mortero, en volumen, %	A	4
Resistencia a la Compresión, mínimo MPa		
1 día	12	15,6
3 días	24	26,6
7 días	A	33,6
28 días	A	41,5
Expansión en barras de mortero 14 días, % máx.	0,020	0,002

**NOTAS:**

1. La información que consta en el certificado corresponde al promedio de los datos obtenidos en el período indicado. Los datos son del cemento típico despachado por Holcim; los despacho individuales pueden variar.
2. La resistencia a 28 días corresponde al promedio del mes anterior.
3. (A) Límite no especificado por la NTE INEN 2380. Resultado reportado sólo como información.
4. (ND) Resultado del ensayo no disponible para el período de análisis indicado.

**ALMACENAMIENTO:**

Almacenar el cemento en ambientes ventilados, sin humedad y cambios bruscos de temperatura. Para cemento a granel se debe contar en obra con silos de al menos 30 toneladas (capacidad promedio de camiones graneleros)

Planta Guayaquil	Vía a Salinas km 18.5	Servicio al cliente: 04-370 9000
Dirección	Guayaquil, Ecuador	Extensiones: 361066
Teléfono	593 4 3709000	361067

[www.holcim.com.ec](http://www.holcim.com.ec)

Jefe de Control de Calidad  
Planta Guayaquil  
Holcim Ecuador S.A.



## 6.2. HOJA TECNICA DEL ADITIVO Sika ViscoCrete 4100



# HOJA TÉCNICA DE PRODUCTO

## Sika® ViscoCrete 4100

ADITIVO REDUCTOR DE AGUA DE ALTO RANGO

### DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

Sika ViscoCrete 4100 es un aditivo reductor de agua de alto rango e hiperplastificante, fabricado con los polímeros policarboxilatos de nuestra Tecnología Sika ViscoCrete. Diseñado para cumplir con todos los requerimientos de la Norma ASTM C-494. Tipos A y F.

### USOS

- Sika ViscoCrete 4100 puede ser usado, tanto en hormigón premezclado, así como en prefabricados, adicionado en la planta como un reductor de agua de alto rango, proporciona excelente plasticidad mientras mantiene la trabajabilidad por más de una hora. Los tiempos de fraguado controlados del Sika ViscoCrete 4100 lo hacen ideal para aplicaciones tanto horizontales como verticales.
- Sika ViscoCrete 4100 es ideal para producción de hormigones autocompactados (SCC).

### VENTAJAS

**Reductor de agua:** Sika ViscoCrete 4100 con pequeñas dosificaciones, se obtienen reducciones de agua entre 10-15% y con altas dosificaciones se pueden lograr reducciones de agua de hasta un 45%. Sika ViscoCrete 4100 es aplicable para todos los niveles de reducción de agua.

**Alta plasticidad:** la acción superplastificante del Sika ViscoCrete 4100 permite obtener altos asentamientos, hormigones fluidos con alto mantenimiento de la trabajabilidad que facilitan la colocación con el mínimo vibrado aún cuando las relaciones agua-cemento sean tan bajas como 0,25

Sika ViscoCrete 4100 plastifica el hormigón dando alta fluidez, pero manteniendo la cohesión, evitando de esta manera sangrado o segregación.

**Larga trabajabilidad y control del fraguado:** Sika ViscoCrete 4100 está formulado para mantener la trabajabilidad por más de una hora, manteniendo los tiempos de fraguado normales.

La acción combinada de reductor de agua de alto rango y superplastificante del Sika ViscoCrete 4100, proporciona al hormigón endurecido los siguientes beneficios:

- Las altas resistencias finales permiten flexibilidad en los diseños de ingeniería y economía en las estructuras.
- Bajas relaciones agua cemento producen hormigones más durables, más densos y menos permeables.
- La alta plasticidad permite reducir los defectos de la superficie del hormigón y mejora la apariencia estética.

### DATOS TÉCNICOS

**ASPECTO:** Líquido translúcido  
**DENSIDAD:** 1.1 g/cc aprox.

Hoja técnica de producto  
Sika ViscoCrete 4100  
Edición N°1 12-2015  
Documento N° 011301011000000201



#### MODO DE EMPLEO

**Dosis:** Las dosis varían de acuerdo al tipo de material usado, condiciones ambientales y a los requerimientos de un proyecto específico.

Sika Ecuatoriana recomienda usar dosis entre 0,19% a 0,9% del peso del cemento. Dosis mayores a las recomendadas pueden usarse cuando están especificados materiales, tales como microsílica, condiciones ambientales extremas. Para mayor información comuníquese con el Departamento Técnico de Sika.

**Mezclado:** Para mejores resultados de superplastificación, adicionar el Sika ViscoCrete 4100 directamente a la mezcla fresca de hormigón en el mixer y dejar mezclándose por lo menos 60 segundos. El Sika ViscoCrete 4100 también puede adicionar a la mezcla fresca directamente en la planta al final del ciclo de mezclado.

**Combinación con otros aditivos:** Sika ViscoCrete 4100 es muy efectivo sólo o combinado con otros aditivos de Sika. Si se usa con ciertos aditivos Sikament puede afectar la plasticidad del hormigón fresco.

**Combinación con microsílica:** Sika ViscoCrete 4100 es particularmente recomendable para el uso con microsílica por su capacidad de reducción de agua y mayor control de la plasticidad.

#### PRESENTACIÓN

Tambores de 230 kg y al granel.

#### ALMACENAMIENTO

12 meses en su envase original, bien sellado y bajo techo.

#### SEGURIDAD

##### Medidas generales de protección e higiene.

Prever una ventilación suficiente o escape de gases en el área de trabajo.

Evitar el contacto con los ojos y la piel.

Protección preventiva de la piel con pomada protectora.

Quitarse inmediatamente la ropa manchada.

No fumar, no comer o beber durante el trabajo. Lavarse las manos antes de los descansos. Protección de las manos con guantes de goma de butilo/nitrilo.

Protección de los ojos con gafas herméticamente cerradas. Protección corporal.

##### Ecología

No verter directamente sobre vertientes de agua o el suelo, actuar de acuerdo a las regulaciones locales.

##### Toxicidad

No peligroso.

##### Transporte

Mercancía no peligrosa.

#### NOTA LEGAL

La información y en particular las recomendaciones sobre la aplicación y uso final de los productos Sika son proporcionados de buena fe, basados en el conocimiento y experiencia actuales de Sika respecto a sus productos, siempre y cuando éstos sean adecuadamente almacenados y manipulados, así como aplicados en condiciones normales de acuerdo a las recomendaciones Sika. En la práctica, las diferencias en los materiales, sustratos y condiciones de la obra son tan particulares que de esta información, cualquier recomendación escrita o cualquier otro consejo no se puede deducir ninguna garantía respecto a la comercialización o adaptabilidad del producto a una finalidad en particular, así como ninguna responsabilidad que surja de cualquier relación legal. El usuario del producto debe probar la conveniencia del mismo para un determinado propósito. Sika se reserva el derecho de cambiar las propiedades de sus productos. Se debe respetar los derechos de propiedad de terceros. Todas las órdenes de compra son aceptadas de acuerdo con nuestras actuales condiciones de venta y despacho. Los usuarios deben referirse siempre a la edición más reciente de la Hoja Técnica local, cuyas copias serán facilitadas a solicitud del cliente.

Sika Ecuatoriana S.A. dispone de un sistema de gestión de la calidad y ambiental certificado de acuerdo a las normas ISO 9001:2015 e ISO 14001:2015 respectivamente, por SGS.

**Sika Ecuatoriana S.A.** <https://ecu.sika.com>  
Durán.- Km. 3 1/2 vía Durán - Tambo (Casilla 10093) PBX (593-4) 2812700 Fax (593-4) 2801229  
Quito.- Av. Naciones Unidas entre Iñaquito y Núñez de Vela. Edificio Metropolitan. PBX (593-4) 2812700  
Cuenca.- Av. Ordoñez Lasso y Los Claveles. Edf. Palermo Tel: +593 4 089725 - 4102829

Hoja técnica de producto  
Sika ViscoCrete 4100  
Edición N°1 12-2015  
Documento N° 011301011000000201

**BUILDING TRUST**  **Sika®**



## 6.3. HOJA TECNICA DE LA FIBRA DE VIDRIO TIPO E

JUSHI GROUP (HK) SINOSIA COMPOSITE MATERIALS CO., LTD.

巨石集團(香港)華夏複合材料有限公司

ROOM 901, BONHAM CENTRE,

79 - 85 BONHAM STRAND EAST,

CENTRAL, HONG KONG.

TEL: (852) 2541 1114 FAX: (852) 2854 0404

ORIGINAL

To: Poliquim, Polímeros Y Químicos, C.A.

Km. 9.5 Vía A Daule, Zona Industrial Inmaculada,

Entre Calles Acacias Y Cedros, Ecuador.

RUC: 00900842752001

Tel: 00593-2110 777 Fax: 00593-2110 993

FOR INVOICE NO.: JSHK2143345

DATE OF ISSUE: 23-Mar-14

P/I NO.: CO2143190,

CO2143202

CERTIFICATE OF COMPLIANCE

ISO.2134978

JS/04-2JC-54

PRODUCT NAME	E-GLASS SPRAY UP ROVING 2400TEX, GRADE#180		PRODUCTION DATE	2014.01.29
SPECIFICATION AND TYPE	ER13-2400-180		TEST DATE	2014.01.29
SAMPLED SPOT	ROVING FORMING WORKSHOP		TOTAL AMOUNT	13,720 KGS
SAMPLED DEPARTMENT	TESTING CENTER			
VARIOUS TESTS CONDUCTED	ACCEPTED STANDARD		TEST RESULT	
	STANDARD NO.	STANDARD VALUE	AVERAGE VALUE	PASSED ? / YES OR NO
NOMINAL TEX (TEX)	ISO 1889-1997	2280-2520	2,376	YES
LOSS ON IGNITION (%)	ISO 1887-1995	0.85-1.15	1.01	YES
HUMTURE CONTENT (%)	ISO 3344-1997	≤0.10	0.05	YES
STIFFNESS (MM)	ISO 3375-1987	120-160	138	YES
SPLITTING RATIO (%)	Q/JS J0357-2010	83-99	92	YES

TEST CONDITIONS	TESTING TEMPERATURE	22°C	RELATIVE HUMIDITY	55%
TEST CONCLUSION	CONFORMED TO ALL ABOVE SPECIFICATION			
	PASSED ALL ABOVE REQUIREMENTS			
TEST CONDUCTED BY :	HU YANGMEI			DATE : 2014.01.29

For and on behalf of  
Jushi Group (HK) Sinosa Composite Materials Co., Ltd  
巨石集團(香港)華夏複合材料有限公司

Addressee's Signature(s)

#### 6.4. MATERIALES



Ilustración 69. secado del material (grava)



Ilustración 70. secado del material (arena)

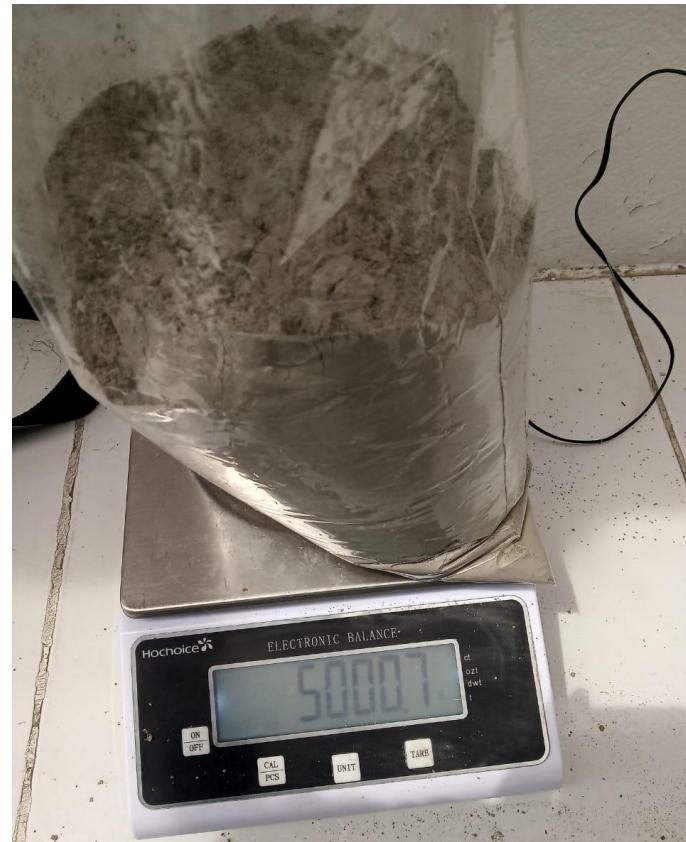


Ilustración 71. Pesado del cemento Holcim HE



Ilustración 72. Fibra de vidrio tipo AR



Ilustración 73. Longitud de la fibra de vidrio AR.



Ilustración 74. Aditivo Sika Viscocrete 4100



Ilustración 75. Tamización del agregado grueso. (grava)



Ilustración 76. Matraz con agregado fino y agua.



Ilustración 77. Densidad superficialmente seca (SSS)



## 6.5. HORMIGÓN PATRÓN



Ilustración 78. Mescla del hormigón Patrón.



Ilustración 79. Trabajabilidad del hormigón Patrón.



Ilustración 80. Peso del cilindro de hormigón Patrón.



Ilustración 81. Ensayo esclerométrico en un cilindro de hormigón Patrón.



Ilustración 82. Ensayo de velocidad ultrasónica en un cilindro de hormigón Patrón.



Ilustración 83. Ensayo de resistencia a compresión en un cilindro de hormigón Patrón.



Ilustración 84. Falla frágil conseguida en la prensa hidráulica del hormigón Patrón (Resistencia a compresión).



Ilustración 85. Ensayo de tracción indirecta del hormigón Patrón.



Ilustración 86. Falla conseguida en la prensa hidráulica (Tracción indirecta)



## 6.6. HORMIGÓN F0.25

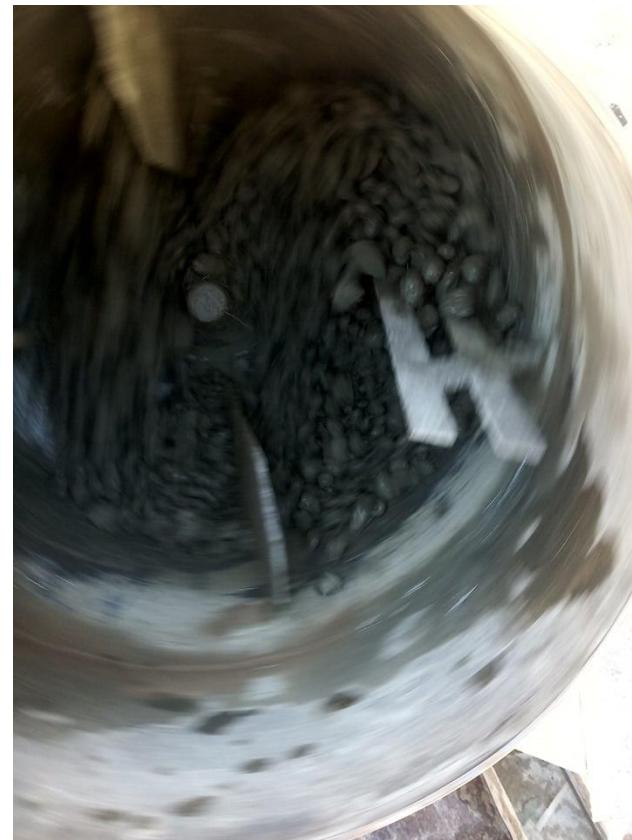


Ilustración 87. Mezcla del hormigón con 0.25% de fibra del peso total.



Ilustración 88. Trabajabilidad del hormigón con 0.25% de fibra de vidrio de su peso total



Ilustración 89. Ensayo de resistencia a la compresión de un cilindro con 0.25% de fibra de vidrio de su peso.



Ilustración 90. Falla frágil – dúctil del hormigón con 0.25% de fibra de vidrio del peso



Ilustración 91. Ensayo de tracción indirecta del hormigón con 0.25% de fibra de vidrio del peso.



Ilustración 92. Rotura por resistencia a la tracción indirecta del hormigón con 0.25% de fibra del peso.



## 6.7. HORMIGÓN F0.35



Ilustración 93. Mezcla del hormigón con 0.35% de fibra de vidrio del peso.



Ilustración 94. Trabajabilidad del hormigón con 0.35% de fibra de vidrio del peso.



Ilustración 95. Ensayo esclerométrico del cilindro de hormigón con 0.35% de fibra de vidrio del peso.



Ilustración 96. Ensayo de velocidad ultrasónica del cilindro de hormigón con 0.35% de fibra de vidrio del peso.



Ilustración 97. Falla dúctil en el ensayo de resistencia a la compresión.



Ilustración 98. Falla frágil en el hormigón con 0.35% de fibra de vidrio de peso.



Ilustración 99. Falla producida por el ensayo de tracción indirecta.



Ilustración 100. Falla producida por tracción indirecta del hormigón con 0.35% de fibra de vidrio de peso.



### 6.8. Hormigón F0.5



Ilustración 101. Trabajabilidad del hormigón con 0.5% de fibra de vidrio en peso.



Ilustración 102. Ensayo de velocidad ultrasónica del hormigón con 0.5% de fibra de vidrio en peso.



Ilustración 103. Ensayo de resistencia a la compresión del hormigón con 0.5% de fibra de vidrio en peso.



Ilustración 104. Falla dúctil en el hormigón con 0.5% de fibra de vidrio en peso.



Ilustración 105. *Ensayo de tracción indirecta en el hormigón con 0.5% de fibra de vidrio en peso.*



Ilustración 106. *Falla producida por el ensayo de tracción indirecta.*