



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Evaluación de mezclas de concreto modificadas con PET reciclado y adición mineral; su influencia en el módulo de ruptura y en la durabilidad de pavimentos rígidos

Tesis que para obtener el grado de

Maestro en Infraestructura del Transporte en la Rama de las Vías Terrestres

Presenta:

Ing. Victor Hugo Blancas Herrera

Bajo la dirección del:

Dr. Wilfrido Martínez Molina

y la co-dirección del:

Dr. Hugo Luis Chávez García

Morelia, Michoacán, Octubre de 2020.





Dedicatorias

Cada proyecto y cada meta cumplida en mi vida se la dedico a mis queridos padres: Roberto Blancas Cervantes y María Guadalupe Herrera Guízar; y a mis hermanos: Laura Gabriela Blancas Herrera, José Roberto Blancas Herrera y Sandra Paulina Blancas Herrera; que son las personas que más amo por sobre todas las cosas y que sé que sin ellos nada de esto fuera posible. ¡Porque no se necesita ser millonario para conocer la riqueza de la vida a su lado!

A mi novia Verónica Guadalupe Espinosa Espinosa, que ha tenido la sabiduría y la paciencia para comprenderme ante toda adversidad y que a pesar de la distancia siempre ha estado conmigo apoyándome. ¡Te amo mi chaparra!

Pero, en especial, quiero dedicar el presente trabajo a mi abuelo Alfonso Blancas Mejía, quien fue la persona que me enseñó el significado de la responsabilidad y la honestidad y, sobre todo, quien me demostró que, trabajando duro diariamente se puede llegar a ser el mejor en todo lo que uno haga. Te dedicó mis triunfos abuelo porque sé, que desde el cielo sonríes, de la misma manera que lo hacías cada vez que te platicábamos con mis hermanos, todo lo que hacíamos y lo que lográbamos en Morelia. ¡Porque tu historia, siempre fue más allá de una simple vida!

Agradecimientos

Le doy gracias a Dios por darme vida y salud para llegar hasta donde estoy en este momento.

A mis padres, que como siempre me han respaldado en mis estudios y han sido el pilar más importante en mi carrera profesional.

A mis hermanos, que son mis más grandes compañeros de vida y que durante estos dos años llegaron a ser parte de mis colaboradores en los ensayos de la investigación.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y a la Facultad de Ingeniería Civil, por formarme como ingeniero; a la Maestría en Infraestructura del Transporte en la Rama de las Vías Terrestres y a cada uno de sus docentes, por darme las herramientas necesarias para



seguir obteniendo mayor conocimiento en la ingeniería, el cual sé que nunca terminará; al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por brindarme una beca durante mis estudios de maestría; y al Laboratorio de Resistencia de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil (UMSNH), por brindarme el espacio, las instalaciones, material y equipo necesario para desarrollar con éxito la presente investigación.

A mi director de tesis, el Dr. Wilfrido Martínez Molina, a la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán y al Dr. Hugo Luis Chávez García, por brindarme su apoyo y sus conocimientos para llevar a buen fin la presente investigación, así como la confianza para poder ser parte de su grupo de investigación.

Al Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil del Tecnológico de Monterrey, Querétaro; en especial al Dr. Andrés Antonio Torres Acosta y a los ingenieros Paola Yazmín González, Celene Arista Perrusquía y Luis Ángel Delgado Hernández, que colaboraron en la investigación al realizar pruebas mecánicas de flexión en sus instalaciones.

Al Ing. Goliat, dueño del banco de material “El Coro”, por su gran disposición para proporcionarnos, de manera gratuita, la arena blanca empleada en la presente investigación.

A mis compañeros y amigos de la maestría, generación 2018-2020: Gabriel Redonda León, Emmanuel González Castro, José Emmanuel Álvarez Cornejo, Juan Adrián Ramírez Escobar, Alondra Martínez Rojas, Eduardo Avilés López y Dante Uriel Contreras Ferreyra; por la disposición tan grande de siempre ayudar en cualquier investigación y porque han sido el mejor grupo de estudio y de amigos que he tenido hasta ahora.

A todos los estudiantes de ingeniería que cumplían con su servicio social dentro del Laboratorio; a los ingenieros y amigos académicos del Laboratorio: Noel Díaz, Sandra del Carmen, Cipriano Bernabé, Marco Mondragón, Luis Colin, Maybelin García, Uriel Espino, José Perdomo, Rafa, Miguel, Alberto, Marco y a todas las personas que de alguna u otra forma colaboraron para hacer posible la presente investigación.



Resumen

Las mezclas de concreto hidráulico que se diseñan para la elaboración de pavimentos rígidos, son basadas en un diseño de resistencia mecánica que involucran el módulo de ruptura. Una forma de mejorar las prestaciones del concreto endurecido, su resistencia mecánica y la absorción de energía, es incorporando fibras y/o adiciones minerales. Las fibras en el concreto ayudarán a disminuir las contracciones plásticas y por secado en el concreto, así como a modificar su módulo de elasticidad, provocando que se tenga un material con falla dúctil y no súbita ante diversas sollicitaciones mecánicas; de este modo, las adiciones minerales como las fibras mitigarán la abertura de grietas, aumentando de igual manera su durabilidad. Al ser el Tereftalato de Polietileno, PET, un material ampliamente usado y altamente contaminante, se considera incluirlo como fibra en el concreto, para lograr las prestaciones antes mencionadas. La Ceniza de Bagazo de Caña, CBC, es un residuo producto de la quema de la caña de azúcar, que puede utilizarse por su actividad puzolánica para obturar parcialmente la porosidad de la matriz cementicia del concreto. Para lograr el objetivo de esta investigación se diseñó una mezcla control y cuatro mezclas de concreto modificado, involucrando una selección de los agregados pétreos; la incorporación de macrofibras de PET, producto de la transformación de botellas de PET post-consumo, y de una adición mineral como es el caso de la ceniza de bagazo de caña (materiales dosificados en cantidades de adición respecto a la masa del cemento). Posterior a ello, se evaluaron sus propiedades físico-mecánicas y de durabilidad en especímenes cilíndricos y prismáticos de cada mezcla de concreto, mediante ensayos de laboratorio a 7, 28, 90 y 180 días de edad en el caso de los ensayos físico-mecánicos, y a 180 días para los ensayos de durabilidad. Finalmente, se realizó una evaluación del costo de producción de las mezclas de concreto modificado respecto al concreto convencional que habitualmente es empleado en los pavimentos rígidos. Se encontró que la presencia de macrofibra de PET reciclado en las mezclas de concreto, ayudan a incrementar la resistencia a tensión del concreto y modificar las fallas típicas del concreto convencional ante cualquier modo de carga, mitigando así las fallas en el concreto y presentando una falla dúctil y no súbita en su estructura.

Palabras Clave: concreto hidráulico, módulo de ruptura, fibras de PET, adición mineral.



Abstract

Hydraulic concrete mixtures designed for the production of rigid pavements, are based on a mechanical strength design involving the rupture module. One way to improve the performance of hardened concrete, its mechanical strength and energy absorption, is by incorporating fibers and/or mineral additions. The fibers in the concrete will help to reduce the plastic contractions and by drying in the concrete, as well as modify its elasticity module, causing a material with a ductile and not sudden failure in the face of various mechanical stresses; in this way, mineral additions such as fibers will mitigate the opening of cracks, also increasing its durability. Being Polyethylene Terephthalate, PET, a widely used and highly polluting material, it is considered to be included as a fiber in the concrete, to achieve the aforementioned performance. The Cane Bagasse Ash, CBC, is a residue product of the burning of sugar cane, which can be used due to its pozzolanic activity to partially seal the porosity of the cementitious matrix of concrete. To achieve the objective of this research, a control mix and four modified concrete mixes were designed, involving a selection of stone aggregates; the incorporation of PET macrofibers, a product of the transformation of post-consumer PET bottles, and of a mineral addition such as cane bagasse ash (materials dosed in addition amounts with respect to the mass of the cement). Subsequently, its physical-mechanical properties and durability were evaluated in cylindrical and prismatic specimens of each concrete mixture, through laboratory tests at 7, 28, 90 and 180 days of age in the case of physical-mechanical tests, and 180 days for durability tests. Finally, an evaluation of the production cost of the modified concrete mixtures was carried out with respect to the conventional concrete that is usually used in rigid pavements. It was found that the presence of recycled PET macrofiber in concrete mixtures helps to increase the tensile strength of concrete and modify the typical failures of conventional concrete in any loading mode, thus mitigating failures in concrete and presenting a ductile and non-rising failure in its structure.

Keywords: hydraulic concrete, modulus of rupture, PET fibers, mineral addition.



Índice General

Dedicatorias	i
Agradecimientos	i
Resumen	iii
Abstract.....	iv
Índice General.....	v
Índice de Figuras	vii
Índice de Tablas.....	xvi
1. Introducción	1
1.1. Motivación	3
1.2. Planteamiento y delimitación del problema.....	5
1.3. Objetivos.....	6
1.3.1. Objetivo general	6
1.3.2. Objetivos específicos.....	7
2. Revisión del estado del arte.....	8
2.1. Recapitulativo	18
3. Fundamentos Teóricos de la Investigación	19
3.1. Un estudio general de los pavimentos de Concreto Hidráulico.....	19
3.1.1. Los caminos y carreteras en México	19
3.1.2. Pavimento rígido	23
3.1.3. Uso e importancia de los pavimentos rígidos en México.....	25
3.1.4. Una clasificación general de los pavimentos rígidos.....	27



3.1.5.	Métodos y criterios de diseño del concreto hidráulico aplicado a pavimentos	28
3.1.6.	Fallas en los pavimentos rígidos.....	35
3.1.7.	Durabilidad de los pavimentos rígidos.....	41
3.2.	El Concreto Hidráulico	44
3.2.1.	Tipos de concreto.....	45
3.2.2.	Componentes del concreto.....	46
3.2.3.	Propiedades principales del concreto fresco.....	51
3.2.4.	Propiedades principales del concreto endurecido.....	55
3.3.	Fibras como refuerzo en el concreto.....	57
3.3.1.	Clasificación de las fibras.....	60
3.3.2.	Polietileno Tereftalato (PET).....	62
3.3.3.	Reciclaje del PET	65
3.3.4.	Fibras de PET	70
3.4.	Adiciones minerales en el concreto	71
3.4.1.	Cenizas	73
3.4.2.	Ceniza de Bagazo de Caña (CBC).....	73
4.	Desarrollo experimental	75
4.1.	Planificación del estudio experimental	75
4.2.	Acondicionamiento, caracterización y selección de los materiales constituyentes de las mezclas de concreto en estudio	76
4.2.1.	Caracterización del Cemento.....	76
4.2.2.	Caracterización de los agregados pétreos (arena y grava).....	79
4.2.3.	Caracterización del Agua.....	146



4.2.4.	Caracterización de los materiales empleados como adición en el concreto .	148
4.3.	Diseño y elaboración de las mezclas de concreto en estudio.....	162
4.3.1.	Cálculo del proporcionamiento de la mezcla control (M-C) mediante el Método ACI	164
4.3.2.	Dosificación de las fibras de PET (PR), del PET molido (PM) y de la Ceniza de Bagazo de Caña (CBC).	174
4.3.3.	Elaboración de las mezclas en estudio y fabricación de los especímenes....	174
4.3.4.	Desmolde y curado de los especímenes	178
4.4.	Ensayos aplicados a las mezclas de concreto elaboradas.	180
4.4.1.	Ensayos realizados al concreto fresco	181
4.4.2.	Ensayos realizados al concreto endurecido	185
5.	Resultados y discusiones.....	219
5.1.	Propiedades en estado fresco	219
5.2.	Propiedades en estado endurecido	221
5.2.1.	Ensayos físico-mecánicos.....	221
5.2.2.	Ensayos por durabilidad	239
6.	Análisis del costo de producción de las mezclas de concreto	250
7.	Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro.....	256
6.1.	Recomendaciones y trabajo futuro	260
7.	Bibliografía.....	261

Índice de Figuras

Figura 1. Camino Blanco o Sabe, de Labna, Yucatan. Fuente: Marco A. de León Morga.20

Figura 2. Distribución porcentual de la longitud de la red de carreteras según su superficie de rodamiento. Fuente: Anuario SCT 2018. 22



Figura 3. Distribución de la carga en un pavimento rígido. Fuente: manual de diseño AASHTO-93.....	23
Figura 4. Estructura de un pavimento rígido. Fuente: Luis G. Loría Salazar.....	24
Figura 5. Libramiento Arco Norte, México. Fuente: imcyc.	25
Figura 6. Compresómetro para la determinación del Módulo de Elasticidad Estático. Fuente: ASTM C 469.	34
Figura 7. Gráfica esfuerzo-deformación del concreto. Fuente: imcyc.	35
Figura 8. Peladuras en la losa de concreto. Fuente: ARGOS.....	37
Figura 9. Bache generado en la losa de concreto. Fuente: ARGOS.....	37
Figura 10. Fallas por reacción álcali agregado. Fuente: ARGOS.....	38
Figura 11. Pulimento de la superficie. Fuente: ARGOS.....	38
Figura 12. Fisuración en forma de "D". Fuente: propia.	39
Figura 13. Fisuras por contracción plástica en la superficie del concreto hidráulico. Fuente: propia.....	40
Figura 14. Condiciones para la propagación de fisuras (grietas) por contracción por secado. Fuente: propia.....	41
Figura 15. Causas físicas del deterioro del concreto.	44
Figura 16. Estructura del concreto. Fuente: propia.	45
Figura 17. Comparación entre resistencia y relación agua/cemento del concreto. Fuente: Neville, 2013.	50
Figura 18. Medición del revenimiento en el concreto fresco. Fuente: Reyna, C., 2016.	52
Figura 19. Matriz reforzada con fibras en forma de microarmaduras. Fuente: propia.....	58
Figura 20. Forma de las fibras: a) sección circular, b) sección rectangular, c) ondulada, d) extremos conformados, e) extractos fundidos y f) extremos ensanchados. Fuente: Francisco J. Baldenebro,2015.	59
Figura 21. Clasificación de las fibras.....	61
Figura 22. Símbolo del PET. Fuente: ARPET.	62
Figura 23. Representación química del PET. Fuente: Departamento de Ciencia de polímeros.	63



Figura 24. Clasificación de los plásticos según el SPI. Fuente: Expertos en reciclaje [En línea]. Como identificar los plásticos. Recuperado de <https://cruplas.cl/como-identificar-los-plasticos/> 66

Figura 25. Proceso del Reciclaje Mecánico del PET. Fuente: Sitio web <https://recicla3dplabs.wordpress.com/tratamiento/>. 67

Figura 26. Proceso del reciclaje químico. Fuente: Sitio web <https://recicla3dplabs.wordpress.com/tratamiento/>. 67

Figura 27. Proceso del reciclaje energético del PET. Fuente: Sitio web: <https://recicla3dplabs.wordpress.com/tratamiento/>. 68

Figura 28. Acopio y reciclaje de PET en México, 2016. Fuente: ECOCE, 2017. 68

Figura 29. Usos de la fibra de PET reciclado. Fuente: Reciclaje de residuos industriales. Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora (Elías, 2009). 69

Figura 30. Obtención del bagazo de caña en el proceso de obtención de azúcar. Fuente: propia. 74

Figura 31. Etapas experimentales de la investigación. 75

Figura 32. Saco de cemento CPC 30R RS marca TOLTECA. Fuente: Cementos CEMEX. 77

Figura 33. Banco de material "San Bernabé". Fuente: Google Maps. 82

Figura 34. Toma de muestra y secado en laboratorio de la arena negra del banco de material "San Bernabé". Fuente: propia. 82

Figura 35. Banco de material "El Coro". Fuente: Google Maps. 83

Figura 36. Toma de muestra y secado en laboratorio de la arena blanca y material de balastre del banco de material "El Coro". Fuente: propia. 83

Figura 37. Banco de material "Janamuato". Fuente: Google Maps. 84

Figura 38. Arena del banco de material "Janamuato". Fuente: propia. 84

Figura 39. Cuarteo del agregado fino por el método "A". Fuente: propia. 86

Figura 40. Cuarteo del agregado fino por el método "B". Fuente: propia. 87

Figura 41. Enrase del agregado fino y determinación de la masa en el recipiente. Fuente: propia. 88

Figura 42. Secado superficial del agregado fino. Fuente: propia. 93



Figura 43. Llenado del frasco Chapman hasta nivel de aforo. Fuente: propia.	96
Figura 44. Límites de granulometría del agregado fino para mezclas de concreto. Fuente: propia.	98
Figura 45. Cribado de la arena por medio de la maquina agitadora (Raf-tap) para la división de los tamaños. Fuente: propia.	100
Figura 46. Distribución de tamaños producto del material retenido en los tamices. Fuente: propia.	101
Figura 47. Curvas granulométricas de las muestras de AN. Fuente: propia.	104
Figura 48. Curvas granulométricas de las muestras de AB. Fuente: propia.	105
Figura 49. Curvas granulométricas de las muestras de BL. Fuente: propia.	107
Figura 50. Curvas granulométricas de las muestras de AR. Fuente: propia.	108
Figura 51. Preparación del agregado fino y la solución dentro del frasco. Fuente: propia.	110
Figura 52. Comparación del color de las muestras con la tabla colorimétrica. Fuente: propia.	111
Figura 53. Llenado de frascos con agregado fino y agua.	112
Figura 54. Agregados finos en reposo una vez pasado el tiempo de 24 h. Fuente: propia.	113
Figura 55. Pesado del agregado fino y el cemento para la elaboración de mortero. Fuente: propia.	115
Figura 56. Moldes de acero inoxidable y bronce para la elaboración de cubos de mortero. Fuente: propia.	116
Figura 57. Llenado de los moldes. Fuente: propia.	117
Figura 58. Apisonamiento en el molde. Fuente: NMX-C-061-ONNCCE-2015.	117
Figura 59. Enrase de cubos de las diferentes mezclas de mortero. Fuente: propia.	118
Figura 60. Curado de los cubos de mortero. Fuente: propia.	118
Figura 61. Marcado en la cara de aplicación de carga del cubo. Fuente: propia.	120
Figura 62. Aplicación de la carga axial sobre el cubo de mortero. Fuente: propia.	120
Figura 63. Falla del espécimen al registrar la carga máxima. Fuente: propia.	121
Figura 64. Gráfica de resultados de la prueba de resistencia a compresión en especímenes cúbicos. Fuente: propia.	123
Figura 65. Humedecimiento de la losa de concreto. Fuente: propia.	124



Figura 66. Colocación y acabo de las pastas de mortero en cada cuadrante. Fuente: propia.
 125

Figura 67. Fraguado de pastas de mortero para el análisis de desempeño de las arenas. Fuente: propia. 125

Figura 68. Resultados de la superficie de las pastas de mortero a la edad de 7 días. Fuente: propia. 126

Figura 69. Banco de material "La Roka". Fuente: Google Maps. 128

Figura 70. Toma de muestra y secado en laboratorio de la grava del banco de material "La Roka". Fuente: propia. 128

Figura 71. Determinación de la masa suelta de la grava dentro del recipiente. Fuente: propia. 130

Figura 72. Grava sometida a saturación, secado superficial y secado total (paso 2 al 5). Fuente: propia. 134

Figura 73. Límites de granulometría en grava para mezclas de concreto. Fuente: propia. 138

Figura 74. Cribado del agregado grueso por medio del método manual. Fuente: propia. . 139

Figura 75. Curva granulométrica de la muestra 1 de grava. Fuente: propia..... 141

Figura 76. Curva granulométrica de la muestra 2 de grava. Fuente: propia..... 142

Figura 77. Metodología del ensayo de desgaste del agregado grueso. Fuente: propia..... 145

Figura 78. Obtención de las fibras de PET Reciclado; a la izquierda hilos provenientes de botellas de PET post-consumo, a la derecha fibras de PET Reciclado (PR). Fuente: propia. 149

Figura 79. Anuncio publicitario para el reciclaje de botellas de PET. Fuente: propia. 150

Figura 80. Fabricación de la máquina de corte a base de materiales reciclados. Fuente: propia. 151

Figura 81. Proceso de producción del hilo de PET: a) corte del extremo inferior de la botella de PET, b) giro de la botella al accionar la máquina de corte, c) obtención de hilos de PET, d) extremo superior de la botella de PET. Fuente: propia. 152

Figura 82. Rayado de la superficie del hilo de PET: a) método manual de rayado, b) textura final de la superficie del hilo de PET. Fuente: propia. 152

Figura 83. Corte del hilo de PET para la obtención de las fibras de PET. 153



Figura 84. Máquina cortadora o fileteador. Fuente: propia.....	153
Figura 85. Vaciado de las fibras de PET a la mezcladora estacionaria. Fuente: propia.	154
Figura 86. PET molido (PM) empleado en la investigación. Fuente: propia.	155
Figura 87. Secado de la CBC en el horno a temperatura de 50 ± 5 °C. Fuente: propia.	156
Figura 88. Molienda de la CBC en el tambor giratorio (máquina de Los Ángeles). Fuente: propia.....	157
Figura 89. Distribución de tamaños de la CBC. Fuente: propia.....	158
Figura 90. Tamaño de partícula de la CBC. Fuente: Arreola Sánchez, 2013.....	159
Figura 91. Distribución del tamaño de partícula de la CBC. Fuente: Arreola Sánchez, 2013.	159
Figura 92. Difractograma de la CBC. Fuente: Arreola Sánchez, 2013.	160
Figura 93. Forma y tamaño de partícula de la CBC. Fuente: Arreola Sánchez.....	161
Figura 94. Vaciado de la CBC en la mezcladora estacionaria. Fuente: propia.	162
Figura 95. Proceso para la selección de proporciones de una mezcla de concreto mediante el método ACI-211.1. Fuente: López Roman, 2015 (López Roman, 2015).	163
Figura 96. Acondicionamiento de 48 moldes para la elaboración de especímenes de prueba. Fuente: propia.	176
Figura 97. Llenado y compactado de la mezcla de concreto. Fuente: propia.....	178
Figura 98. Enrase de la superficie del espécimen. Fuente: propia.	178
Figura 99. a) Etiquetado de los especímenes para su identificación, b) Curado de los especímenes. Fuente: propia.....	179
Figura 100. Tanque de curado con cal hidratada. Fuente: propia.....	179
Figura 101. Condición de humedad de curado de los especímenes hasta antes de los ensayos del concreto. Fuente: propia.	180
Figura 102. Colocación del operador sobre el molde troncocónico. Fuente: propia.....	182
Figura 103. Lectura del valor de revenimiento de la mezcla. Fuente: propia.	183
Figura 104. Indicador de pH puesto en contacto con la mezcla de concreto fresco. Fuente: propia.....	184
Figura 105. Lectura del valor de pH sobre la tabla de referencia. Fuente: propia.	185



Figura 106. Lectura de la temperatura del concreto con ayuda de un termómetro de vástago. Fuente: propia. 185

Figura 107. Colocación de especímenes dentro de las placas metálicas del equipo de prueba. Fuente: propia. 188

Figura 108. Transmisión directa de pulso ultrasónico en cilindros y vigas de concreto. Fuente: propia. 191

Figura 109. Cabeceo de cilindros para el ensayo a compresión. Fuente: propia. 194

Figura 110. Aplicación de carga a cilindros elaborados de las diferentes mezclas en estudio. Fuente: propia. 195

Figura 111. Cilindro de 10 cm de diámetro x 20 cm de altura con deformímetro (anillos de acero) y extensómetro para medir deformaciones longitudinales. Fuente: propia. 197

Figura 112. Aplicación de carga a compresión hasta el 60% de su carga máxima de falla. Fuente: propia. 198

Figura 113. Posición del espécimen en la máquina de prueba. Fuente: NMX-C-163-ONNCCE-2019. 200

Figura 114. Aplicación de carga a compresión en la sección diametral del cilindro de concreto. Fuente: propia. 200

Figura 115. a) colocación de viga sobre los apoyos con ayuda de las marcas de referencia; b) colocación de los bloques de aplicación de carga sobre la superficie de la viga. Fuente: propia. 202

Figura 116. Aplicación de la carga sobre la viga hasta su falla. Fuente: propia. 202

Figura 117. Obtención de discos de concreto a partir del corte de cilindros de 10 cm Ø x 20 cm h. Fuente: propia. 204

Figura 118. Elaboración de la solución de sulfato de sodio. Fuente: propia. 207

Figura 119. Primer ciclo de prueba: a) Recipientes de plástico adaptados en su fondo con rejilla perforada, b) Inmersión de los discos de concreto en la solución de sulfato, c) Secado de las muestras después de la inmersión, d) Obtención de la masa seca. Fuente: propia. . 208

Figura 120. Proceso de desintegración de los discos de concreto. Fuente: propia. 208

Figura 121. Obtención del espécimen de prueba a partir de la mitad de una viga fallada en su sección transversal. Fuente: propia. 210



Figura 122. Aplicación del indicador de ácido-base sobre la superficie del espécimen fracturado. Fuente: propia.....	211
Figura 123. Medición de la profundidad de la zona incolora en la superficie del espécimen fracturado. Fuente: propia.....	211
Figura 124. Sellado de la superficie lateral de los especímenes. Fuente: propia.	215
Figura 125. Sellado del extremo opuesto de prueba. Fuente: propia.	215
Figura 126. a) Colocación de los discos sobre la esponja, b) medida de la masa del disco invertido sobre la balanza. Fuente: propia.....	216
Figura 127. Resultados del pH de las mezclas en estudio.....	220
Figura 128. Resistividad eléctrica en cilindros de 10 cm x 20 cm.	221
Figura 129. Resistividad eléctrica en cilindros de 15 cm x 20 cm.	222
Figura 130. Resistividad eléctrica medida longitudinalmente en vigas de 15 cm x 15 cm x 60 cm.	222
Figura 131. VPU en cilindros de 10 cm x 20 cm.	224
Figura 132. VPU en cilindros de 15 cm x 30 cm	224
Figura 133. VPU medida longitudinalmente en vigas de 15 cm x 15 cm x 60 cm.	225
Figura 134. VPU medida transversalmente en vigas de 15 cm x 15 cm x 60 cm	225
Figura 135. Densidad calculada en cilindros de 10 cm \varnothing x 20 cm h.....	226
Figura 136. Módulo de elasticidad dinámico a partir de valores de VPU en cilindros de 10 cm x 20 cm.	227
Figura 137. Resistencia a la compresión en cilindros de 10 cm \varnothing x 20 cm h.	228
Figura 138. Falla típica en el concreto: a) cilindro con fracturas y fragmentos separados a la matriz, b) cilindro con fragmentos unidos a la matriz mediante la fibra de PET.....	229
Figura 139. Módulo de elasticidad estático a partir de someter cilindros de 10 cm \varnothing x 20 cm h a compresión.....	230
Figura 140. Curva Esfuerzo-Deformación Unitaria a 7 días de edad de las mezclas en estudio.	231
Figura 141. Curva Esfuerzo-Deformación Unitaria a 28 días de edad de las mezclas en estudio.....	232



Figura 142. Curva Esfuerzo-Deformación Unitaria a 90 días de edad de las mezclas en estudio..... 232

Figura 143. Curva Esfuerzo-Deformación Unitaria a 180 días de edad de las mezclas en estudio..... 233

Figura 144. Resistencia a la tensión indirecta en cilindros de 15 cm Ø x 30 cm h. 234

Figura 145. Fallas por tensión en cilindros de concreto: a) falla frágil en el concreto, b) falla dúctil en el concreto..... 235

Figura 146. Módulo de ruptura en vigas de 15 cm x 15 cm x 60 cm. 236

Figura 147. Curva esfuerzo vs deformación transversal a partir de ensayo a flexión en vigas de concreto..... 237

Figura 148. Falla súbita y no súbita (con fibra de PET) en vigas de concreto sometidas a flexión..... 238

Figura 149. Falla no súbita en el concreto con fibra de PET. 239

Figura 150. Porcentaje de pérdida de masa en discos de 10 cm Ø x 5 cm h, sometidos a 180 días de edad. 240

Figura 151. Pérdida de masa en los especímenes del concreto M-C al 4º ciclo de prueba. 241

Figura 152. Concreto PR-0.8 en el ciclo 7 de prueba..... 241

Figura 153. Profundidad de carbonatación en la sección transversal de un pedazo de viga a 180 días de edad. 242

Figura 154. Constante de carbonatación obtenida a partir del valor medido de carbonatación en la sección transversal de un pedazo de viga a 180 días de edad..... 242

Figura 155. Proyección de la profundidad de carbonatación suponiendo una exposición de 25 años..... 245

Figura 156. Análisis de regresión lineal, a partir de graficar el Índice de absorción vs t para el primer disco de la mezcla PR-0.8. 247

Figura 157. Tasa inicial de absorción de agua a 180 días de edad de las mezclas de concreto. 248

Figura 158. Tasa secundaria de absorción de agua a 180 días de edad de las mezclas de concreto. 249



Índice de Tablas

Tabla 1. Valores de Módulos de ruptura recomendados.	32
Tabla 2. Valores típicos de la desviación estándar.	32
Tabla 3. Códigos de la Sociedad de la Industria del Plástico.	66
Tabla 4. Propiedades físicas del PET virgen y del PET reciclado.	69
Tabla 5. Variables de las mezclas de concreto.	76
Tabla 6. Valor de la densidad del cemento empleado en la investigación.	79
Tabla 7. Características, ensayos y normativa correspondiente a los agregados.	80
Tabla 8. Resultados de la Masa Volumétrica Seca y Suelta (MVSS) de las arenas.	89
Tabla 9. Resultados de la Masa Volumétrica Seca y Varillada (MVSV) de las arenas.	90
Tabla 10. Resultados de la humedad de absorción de las arenas.	94
Tabla 11. Resultados de la densidad de las arenas.	96
Tabla 12. Límites de granulometría para agregado fino.	98
Tabla 13. Tabla para el registro de la masa retenida en los tamices requeridos para el análisis granulométrico en arenas.	101
Tabla 14. Análisis granulométrico de la AN - muestra No. 1.	103
Tabla 15. Análisis granulométrico de la AN - muestra No. 2.	103
Tabla 16. Análisis granulométrico de la AB - muestra No. 1.	104
Tabla 17. Análisis granulométrico de la AB - muestra No. 2.	105
Tabla 18. Análisis granulométrico de la BL - muestra No. 1.	106
Tabla 19. Análisis granulométrico de la BL - muestra No. 2.	106
Tabla 20. Análisis granulométrico de la AR - muestra No. 1.	107
Tabla 21. Análisis granulométrico de la AR - muestra No. 2.	108
Tabla 22. Límites máximos de carbón y lignito en el agregado fino.	109
Tabla 23. Resultados del ensayo de colorimetría.	111
Tabla 24. Resultados del ensayo de sedimentación.	113
Tabla 25. Dosificación de las mezclas de mortero.	115



Tabla 26. Resultados de la prueba de resistencia a la compresión en especímenes cúbicos.	121
Tabla 27. Resumen de características físicas del agregado fino empleado en esta investigación.	127
Tabla 28. Resultados de la Masa Volumétrica Seca y Suelta (MVSS) de la grava.....	131
Tabla 29. Resultados de la Masa Volumétrica Seca y Varillada (MVSV) de la grava.	132
Tabla 30. Resultados de humedad de absorción del agregado grueso.....	135
Tabla 31. Resultados de la densidad del agregado grueso.	137
Tabla 32. Límites de granulometría para agregado grueso de tamaño nominal de entre 3/4” a 3/8”.	137
Tabla 33. Tabla para el registro de la masa retenida en los tamices requeridos para el análisis granulométrico en gravas.....	139
Tabla 34. Análisis granulométrico de la grava - muestra No. 1.	141
Tabla 35. Análisis granulométrico de la grava - muestra No. 2.	142
Tabla 36. Composición de la muestra de prueba y cargas abrasivas (M-MMP-2-02-032, 2018).	144
Tabla 37. Resultados del porcentaje de degradación por trituración mediante la máquina de Los Ángeles.	146
Tabla 38. Resultados del análisis de una muestra de agua potable emitido por el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil.	147
Tabla 39. Características de las fibras.	149
Tabla 40. Análisis granulométrico de la CBC.....	157
Tabla 41. Composición química de la CBC. Fuente: Arreola Sánchez, 2013.....	160
Tabla 42. Características físicas de los materiales constituyentes del concreto hidráulico.	164
Tabla 43. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado.....	166
Tabla 44. Correspondencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión del concreto.....	166
Tabla 45. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.....	168



Tabla 46. Resumen de las cantidades necesarias de material para un m ³ de mezcla de concreto.	169
Tabla 47. Resumen de las cantidades corregidas de material para un m ³ de mezcla control (M-C).....	170
Tabla 48. Cantidad total de especímenes elaborados por mezcla y para la investigación.	171
Tabla 49. Resumen de las cantidades requeridas de material para la cantidad total de especímenes de la mezcla control (M-C).	173
Tabla 50. Cantidades requeridas de material de las diferentes mezclas con adición de PR, PM y CBC.	174
Tabla 51. Número de capas requeridas para los especímenes.....	177
Tabla 52. Diámetro de la varilla y número de penetraciones por capa de mezcla.	177
Tabla 53. Valor nominal de revenimiento y tolerancias (NMX-C-156-ONNCCE, 2010).	183
Tabla 54. Criterio General de valores de resistividad eléctrica del concreto [NMX-C-514-ONNCCE-2019].	189
Tabla 55. Criterios de evaluación de la calidad del concreto hidráulico en función de la VPU (NMX-C-275-ONNCCE-2004, 2004).....	191
Tabla 56. Criterios de evaluación de la resistencia a la carbonatación del concreto hidráulico (NMX-C-515-ONNCCE, 2016).	212
Tabla 57. Resultados de revenimiento en las mezclas en estudio.	220
Tabla 58. Profundidad de carbonatación, en mm, estimada a partir de la constante de carbonatación.....	243
Tabla 59. Serie de datos para el primer disco de la mezcla PR-0.8.	245
Tabla 60. Resultados obtenidos a partir de la metodología descrita en la Red DURAR. ..	247
Tabla 61. Cálculo del costo total del concreto control M-C.....	250
Tabla 62. Cálculo del costo total del concreto con fibra de PET (PR-0.8).	251
Tabla 63. Cálculo del precio unitario de la fibra de PET elaborada en la investigación....	251
Tabla 64. Cálculo del costo total del concreto con PET molido (PM-0.8).....	253
Tabla 65. Cálculo del costo total del concreto con fibra de PET y CBC (PR0.8 + CBC15).	253



Tabla 66. Cálculo del precio unitario de la CBC para fines de adición en la investigación.
..... 254

Tabla 67. Cálculo del costo total del concreto con PET molido y CBC (PM0.8 + CBC15).
..... 255



1. Introducción

Las mezclas de concreto hidráulico que se diseñan actualmente para la elaboración de pavimentos rígidos, son basadas en un diseño de resistencia mecánica que involucran el módulo de ruptura (MR) o resistencia a la flexión. Un incremento del valor de MR en el concreto hidráulico, involucra cumplir con propiedades de resistencia mecánica y de durabilidad aptos para que un pavimento de concreto hidráulico no presente grietas en su estructura y se defienda ante agentes externos que degraden su superficie.

En un estudio del estado del arte, Camacho Velasco (Camacho Velasco, 2010) menciona que el concreto debe contener propiedades físicas y mecánicas, de alta viscosidad, resistencia a la compresión, una excelente resistencia a la corrosión, baja permeabilidad y un ajuste rápido a los moldes o espacios. Por su parte, Susanto Teng et al. (Teng et al., 2018) describe que normalmente se requiere una gran cantidad de cemento para producir una matriz de concreto de alto rendimiento (Rossi, 2013). Sin embargo, algunos residuos de materiales derivados incluyen el humo de sílice (SF), cenizas volantes (FA) y la masa de escoria granulada de alto horno (GGBS) que se pueden utilizar para reducir la cantidad de cemento requerida y en consecuencia producir un concreto ambientalmente sostenible (Shannag, 2000). En general, se entiende bien que la sustitución de cemento Portland ordinario (CPO) con aditivos minerales en el concreto reduce la porosidad y también convierte los poros a tamaños más pequeños en comparación con el concreto convencional. Además, la incorporación de aditivos minerales, tales como SF y FA puede cambiar la mineralogía de los hidratos de cemento y posteriormente se traduce en una disminución en el movimiento de los iones de cloruro (Divsholi & T.Y.D. Lim, 2013).

Este mismo autor, menciona que la carga mecánica, así como la contracción por secado pueden ocasionar al concreto convencional un agrietamiento con la subsiguiente reducción en la fuerza global y la rigidez de la estructura de concreto. Una vez que se ha formado una grieta, el agua y los agentes destructivos como cloruros y sulfatos pueden penetrar rápidamente en el concreto y posteriormente acelerar el proceso de corrosión y seriamente degradar la capacidad de servicio de las estructuras (Passuello et. al., 2009). Una posible



solución para el control de extensión de la fisura es a través del refuerzo del concreto con la adición de fibras. El uso de fibras en el concreto es reconocido como una forma prometedora para hacer el concreto más homogéneo y producir un material con mayor resistencia a la tracción, resistencia a la flexión, ductilidad y a la absorción de energía (Caggiano et. al., 2012).

El uso de una gran variedad de fibras adicionadas a la mezcla de concreto ha tomado mucha relevancia en las últimas dos décadas y actualmente se realizan investigaciones para la incorporación de materiales reciclados como es el caso de las botellas de plástico post-consumo.

La producción mundial de residuos plásticos ha incrementado significativamente en los últimos años y en la actualidad es uno de los problemas que más aquejan a los países en desarrollo. Cifras dadas por asociaciones ambientales europeas (PlasticsEurope, 2018) indican que para el año 2018 se llegaron a producir 359 millones de toneladas de residuos plásticos, los cuales en su mayoría son de un solo uso y no son biodegradables. Por lo tanto, los residuos plásticos son considerados universalmente como un problema de contaminación ambiental peligroso (Liguori, Iucolano, Capasso, Lavorgna, & Verdolotti, 2014) (N. Singh, 2017) y es factible, el empleo de materiales post-consumo en el concreto hidráulico como una alternativa fundamental en la gestión de los residuos sólidos en nuestro planeta. Un tipo común de plástico que se ha utilizado diariamente por la humanidad, son los envases de bebidas, cuyo material es el tereftalato de polietileno (PET) y cuyas cantidades de consumo va en aumento; por consiguiente, los esfuerzos han sido ejercidos sobre el reciclado de botellas de PET y el empleo de estas como materiales de construcción (Silva & J. De Brito, 2014) (Choi, Moon, Kim, & Lachemi, 2009).

El tereftalato de polietileno o Poli-Etilen-Tereftalato es un polímero termoplástico, conocido por sus siglas PET, el cual pertenece al grupo de los poliésteres, que como lo indica su nombre conformado por el grupo tereftalato y el grupo etilo. Se caracteriza por sus propiedades físicas como brillo, ligereza, conserva el sabor de los alimentos además de su aroma, resistencia mecánica, química (Camacho Velasco, 2010).



La presente investigación tiene como objetivo analizar, mediante ensayos de laboratorio, el desempeño mecánico y por durabilidad de mezclas de concreto hidráulico modificado con material de PET y ceniza de bagazo de caña (CBC), de tal forma que exista un nuevo material sostenible que incremente la vida de servicio de pavimentos rígidos, que ayude a mitigar los problemas de contaminación al medio ambiente y que sea viable respecto al costo inicial de construcción del material. Para este fin, como primera etapa se analizarán las características de los agregados pétreos obtenidos para la investigación, de tal modo que se seleccionen los agregados con las mejores características para el desarrollo de las nuevas mezclas de concreto; se elaborará una nueva fibra de PET con características particulares mediante el uso de una máquina de corte creada en el laboratorio de Resistencia de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la FIC-UMSNH, se realizará el diseño y la elaboración de las diferentes mezclas de concreto mediante el método ACI 211.1 y finalmente, se realizará un análisis del costo de producción de las mezclas de concreto, que compruebe la viabilidad en lo económico de las nuevas mezclas de concreto hidráulico.

1.1.Motivación

En el área de la ingeniería y especialmente en el estudio de la ciencia de los materiales, el grupo consolidado de investigadores, correspondiente a la sección de Resistencia de Materiales y de Corrosión, del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil (UMSNH) está, actualmente, trabajando en la creación de materiales de construcción enfocados en la sostenibilidad ambiental, a partir del uso de residuos sólidos que puedan ser reciclados y modificados por medios mecánicos, que no demanden grandes cantidades de energía, y a su vez puedan ser empleados nuevamente para un uso distinto al que fueron utilizados originalmente, de tal manera que contribuyan al desarrollo sostenible de algún material de construcción.

De acuerdo con el informe emitido por la Comisión Mundial sobre el Ambiente y Desarrollo en 1987, el desarrollo sostenible se define como: “la satisfacción de las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”. Es entonces, que el desarrollo sustentable, reúne tres aristas interdependientes: economía, medio ambiente y sociedad; relación que se traduce en



desarrollo económico y social respetuoso con el medio ambiente, es decir, actualmente se busca el desarrollo soportable en lo económico, viable en lo económico, y equitativo en lo social (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018).

Actualmente, uno de los materiales más utilizado en el área de la construcción es el concreto hidráulico, el cual por sus exigencias de desempeño debe cumplir, con altas resistencias a la compresión a diferentes edades, con una adecuada rigidez, con un módulo de ruptura apto para cumplir con las recomendaciones dadas por las teorías de diseño de pavimentos, con una alta absorción de energía (tenacidad) y con una alta durabilidad; para lo cual, se considera el estudio de nuevas mezclas de concreto hidráulico modificadas con materiales innovadores como aditivos y fibras, las cuales cumplan el propósito de ser materiales reciclados que colaboren a incrementar el desempeño mecánico y por durabilidad del concreto y a su vez, reduzcan el volumen de residuos sólidos (y así reducir la contaminación ambiental generada), la preservación de los recursos naturales (al emplear materiales reciclados) y la reducción o beneficio en los costos asociados a los producción y mantenimiento durante la vida útil del concreto hidráulico.

De los materiales adicionados al concreto hidráulico, encaminados al favorecimiento de las características del material, existe el uso de adiciones minerales, producto de los procesos agroindustriales, como es el caso de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBC), el cual es recopilado como un residuo generado por la quema a altas temperaturas del bagazo de caña para generar energía eléctrica. Este material es llevado al laboratorio para darle un tratamiento de secado y molienda para formar así un nuevo material con propiedades puzolánicas y con características específicas para ser incorporado al concreto hidráulico. Datos generados por CONADESUCA (CONADESUCA, 2018), mencionan que para el año 2018, México ocupó el sexto lugar en producción mundial de caña de azúcar con poco más de 5.4 millones de toneladas, cuya cantidad es distribuida en 51 ingenios azucareros distribuidos en 15 estados de la república mexicana.

También, dentro de las nuevas investigaciones innovadoras planteadas en el Laboratorio de Materiales, se encuentra la reducción y reúso de residuos plásticos post-consumo para formar fibras que ayuden al refuerzo y al mejoramiento de las propiedades del concreto hidráulico.



El reciclaje mecánico del plástico post-consumo, especialmente de envases o botellas de PET, representa directamente una reducción al volumen de desechos producidos a nivel nacional e internacional y cuyos valores de costo de reciclaje por otros medios tecnológicos se elevan, así como el consumo de energía para poder transformarlo, por lo que en términos medio ambientales lo más adecuado es su reutilización para evitar así un impacto mínimo. México recicla 6 de cada 10 botellas de PET que se consumen, siendo el país con mayor cantidad de PET reciclado a nivel continental y por encima de Estados Unidos el cual sólo recicla un 30% del material plástico que genera (ECOCE, 2017).

Lo ideal sería contribuir a la solución de los graves problemas de generación de residuos sólidos que afectan a las principales ciudades del mundo, por medio del aprovechamiento de nuevos productos a través del reciclaje, pues al buscar mejorar un material tradicional como el concreto hidráulico con aditivos provenientes de residuos agroindustriales y plásticos reciclados, se atacan al mismo tiempo problemas de desempeño del concreto y los resultados obtenidos pueden ser aún más benéficos para la sociedad e interesantes para la comunidad científica.

1.2. Planteamiento y delimitación del problema

La creación de nuevos concretos hidráulicos de altas resistencias y prestaciones, llevan consigo una serie de problemas que se deben considerar actualmente para alcanzar los estándares de calidad aptos en los elementos constructivos de una obra civil, específicamente en las losas de los pavimentos rígidos:

1. El aumento de la resistencia a la flexión del concreto, a partir de incorporar mayor cantidad de cemento en el diseño de la mezcla de concreto, teniendo principalmente problemas prematuros de contracciones plásticas en el material; además de que, el costo inicial de construcción se eleve tan alto que para la industria de la construcción no sería factible en lo económico.
2. El aumento en la rigidez del concreto hidráulico requerida en las especificaciones de diseño, cuyas características llevan consigo problemas de fallas frágiles en la superficie de rodamiento, disminuyendo la vida útil del pavimento.



El concreto hidráulico por naturaleza cumple o atiende esfuerzos a compresión en su estructura, pero no es así cuando requiere poseer ductilidad para reducir las contracciones por secado y directamente las cargas constantes de tránsito vehicular en un pavimento rígido, las cuales provocan agrietamientos severos en el concreto y consigo problemas de durabilidad.

3. La poca o nula durabilidad del concreto hidráulico ante agentes agresivos del ambiente, se da a partir de no considerar la microestructura del material, el cual, nos lleva a pensar en el uso de adiciones minerales para densificar la matriz de concreto de tal forma que obstruyan los poros capilares del concreto y así no exista un proceso de deterioro ante la interacción con el medio ambiente.
4. La mala calidad de ejecución de las técnicas de construcción y de puesta en servicio del concreto hidráulico, teniendo en cuenta que existe la idea errónea que, con un buen acabado en la superficie de la losa del pavimento se alcanzarán altas características de resistencia y durabilidad en el material.

De manera general, el incremento del módulo de ruptura en el concreto hidráulico, lleva consigo una serie de aspectos que hay que considerar para cumplir con propiedades de rigidez, ductilidad y durabilidad, como por ejemplo: un análisis granulométrico bien definido, la determinación de la relación a/c que permita tener una mezcla homogénea, la opción de adicionar fibras y residuos minerales al concreto en un porcentaje y tamaño idóneo, la aplicación de ensayos que demuestren cuantitativamente que los concretos modificados son más resistentes y durables que un concreto convencional y por último que el elaborar este tipo de concretos ecológicos tenga beneficio respecto al costo total de un pavimento rígido durante su vida útil.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar mezclas de concreto modificadas con PET reciclado y una adición mineral; su influencia en el módulo de ruptura y en la durabilidad de pavimentos rígidos.



1.3.2. Objetivos específicos

- ✚ Elaborar macrofibras de PET, con características particulares, a partir de envases de plástico post-consumo para ser incorporadas a mezclas de concreto convencionales.

- ✚ Mejorar las características de un concreto convencional mediante la adición de material producto de botellas de PET reciclado y de ceniza de bagazo de caña, para obtener un concreto hidráulico resistente, durable y sostenible para aplicarlo en pavimentos.

- ✚ Evaluar los valores obtenidos, a partir de pruebas estándar en el concreto, de resistencia mecánica y de durabilidad de las distintas mezclas elaboradas y determinar la mejor configuración de materiales empleados en las mezclas respecto al comportamiento en el MR y en la durabilidad.

- ✚ Determinar el costo total de la elaboración del concreto modificado y evaluar su beneficio al aplicarlo en un pavimento rígido.

2. Revisión del estado del arte

Actualmente, se busca reutilizar materiales producto de desecho que ayuden a disminuir el gran problema existente de contaminación en el medio ambiente; así como, que logren aportar en beneficio de las propiedades mecánicas y físicas de los materiales de construcción, reduciendo su contenido de cemento, agua o agregado en el caso del concreto hidráulico.

En esta investigación se busca mejorar el comportamiento respecto al módulo de ruptura y la durabilidad de un concreto hidráulico modificado y ecológico, utilizado en la elaboración de superficies de rodamiento de los pavimentos rígidos, el cual conste de una mezcla de materiales pétreos, cemento, agua y la incorporación de fibras de PET reciclado y adiciones minerales que ayuden a densificar la matriz cementicia y reducir las grietas por contracciones plásticas y térmicas.

De los trabajos desarrollados, respecto al uso de fibras, adiciones minerales y de PET en el concreto hidráulico u otro material de construcción se tiene lo siguiente:

Obtención de Concreto Polimérico a partir de la degradación del PET.

En esta investigación, Camacho Velasco (Camacho Velasco, 2010) elaboró un concreto polimérico, por medio de la degradación o reciclaje químico de PET, en el cual el polímero conserva sus propiedades químicas obteniendo el monómero virgen; primeramente, depolimerizando el PET para obtener una resina y posteriormente obtener el concreto polimérico. De la elaboración del concreto polimérico y los resultados de esta investigación, se realizaron gráficas esfuerzo-deformación unitaria de las distintas muestras o probetas elaboradas.

Flexural behavior and durability properties of high performance hybrid-fiber-reinforced concrete.

Susanto Teng et al. (Teng et al., 2018) empleó mezclas de concreto reforzado con fibra (FRC), utilizó humo de sílice (SF) y escoria de alto horno granulada molida (GGBS) como aditivos minerales en las proporciones de 10% y 30% del cemento, respectivamente. Las fibras de acero de doble gancho (DHE), las fibras de acero de un solo gancho (HE) y las



fibras de alcohol polivinílico (PVA) se mezclaron en diferentes proporciones en el concreto para desarrollar un FRC híbrido. El volumen combinado total de las fracciones de las fibras fue 0%, 0.6% y 1.2%. Los estudios se basaron en el comportamiento de las propiedades mecánicas por flexión y durabilidad de un FRC híbrido de alto rendimiento con combinaciones de fibras metálicas y no metálicas en diferentes fracciones de volumen de fibra. De los resultados obtenidos, se menciona que la adición de aditivos minerales, no sólo mejora la resistencia de las muestras en el tiempo, sino que también puede mejorar la dispersión de fibras en los materiales compuestos, provocando un aumento de unión entre fibras y matriz de cemento, de tal forma que se minimizó la formación de microgrietas en los materiales compuestos.

Mechanical properties of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice.

El estudio realizado por Nicolas Ali Libre et al. (Libre et al., 2011) describe que su propósito es el de mejorar la ductilidad del concreto con agregado liviano de piedra pómez mediante la incorporación de fibras híbridas de acero y polipropileno (PP). Las propiedades mecánicas investigadas incluyen la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión, la resistencia a la rotura y la tenacidad del concreto endurecido. Del programa experimental, se prepararon nueve mezclas con diferentes volúmenes de fibras de acero y PP. La fracción de volumen de fibras de acero varió entre 0% y 1% de la mezcla de concreto, en rangos de 0.5%; mientras que la fracción de volumen de fibras del PP varió entre 0% y 0.4% de concreto, en variaciones de 0.2%. Del comportamiento de las pruebas a compresión en los especímenes, se puede concluir que las fibras de PP no tienen ningún efecto evidente sobre la resistencia a compresión del concreto. La adición de fibras de acero hasta 0.5% del volumen de concreto mejoró la resistencia a la compresión por aproximadamente 47%. La adición de más fibras de acero de hasta 1% del volumen de concreto no fue tan eficaz y no se observaron incrementos respecto a la fuerza adicional. En este caso, la mejora de la resistencia a la compresión fue de aproximadamente 44%. Para la fracción de volumen de fibras de acero más de 0.5%, el efecto de la fibra de acero en resistencia a la compresión parece insignificante y bastante inconsistente.



✚ Modulus of rupture evaluation of cement stabilized recycled glass/recycled concrete aggregate blends.

Arul Arulrajah et al. (Arulrajah et al., 2015) menciona que los desechos de construcción y demolición se utilizan cada vez más como material de construcción en una gama de aplicaciones de ingeniería civil. El vidrio fino reciclado (FRG) se recolecta en los basureros municipales y su uso hasta la fecha se ha limitado a las capas de pavimento sin unir. Esta investigación se realizó para evaluar el rendimiento de FRG como material complementario en mezclas con agregado de concreto reciclado (RCA) estabilizado con cemento. Resultados sobre el módulo de ruptura y el módulo de flexión para todas las mezclas RCA/FRG estabilizadas con cemento indican que estas mezclas son adecuadas para aplicaciones tales como bases/subbases de pavimento estabilizadas con cemento. También se destaca que mezclas de cemento estabilizado con FRG como material suplementario con hasta un 30% de contenido de FRG y 3% de cemento de GB tenían propiedades físicas y de resistencia, que cumplirían con los requisitos de las autoridades viales.

✚ Optimization of mechanical properties in concrete reinforced with fibers from solid urban wastes (PET bottles) for the production of ecological concrete.

Erlon Lopes Pereira et al. (Lopes Pereira et al., 2017) desarrolló una investigación para resolver problemas estructurales como las grietas causadas por la retracción plástica o hidráulica y el secado, mediante la adición de fibras de polímero. Lopes Pereira, buscó evaluar el uso de fibras a partir de residuos de botellas de PET en la producción de concreto ecológico y para estudiar el efecto sinérgico entre la longitud y el porcentaje de estas fibras en la tracción y propiedades mecánicas a la compresión y tensión del concreto ecológico en relación con un concreto tradicional (mezcla de concreto con cemento Portland). Para los ensayos descritos botellas de PET se transformaron en fibras con longitudes de 7, 9, 10, 15, 20 y 22 mm y con un ancho estándar de 3 mm. La transformación de la botella de PET en fibras de tamaño deseado se realizó con la ayuda de una trituradora eléctrica de botella de PET con ajuste de medición para obtener la longitud deseada. Para la optimización de procesos se utilizó un método estadístico de diseño compuesto de ortogonales y rotación central (CCD), con dos factores denominados longitud PET de fibra (F1) y el porcentaje de



fibra en relación con el volumen total de concreto (F2). El modelo matemático descrito en el trabajo presentado por el autor ayuda a predecir la eficiencia que puede tener la fibra de PET de botellas de plástico en el comportamiento mecánico que puede lograr un concreto, proporcionándole el tamaño de fibra y el volumen utilizado de éste.

Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers.

Como parte de la investigación sobre el concreto reforzado con fibra, Dora Foti (Foti, 2011) presenta resultados de algunas pruebas para un enfoque más amplio de la posibilidad de usar fibras de botellas de polietileno tereftalato (PET) para aumentar la ductilidad del concreto. Diferentes formas de fibras de PET se utilizan, en forma de tiras o laminas y fibras en forma de "O". Las fibras de tipo laminar se trabajaron con una longitud de 32 mm y una sección de $2 \times 0.1 \text{ mm}^2$, y fibras circulares, con un diámetro de 30-50 mm y una anchura variable alrededor de 5 mm obtenidos. En la serie de pruebas preliminares una cantidad muy pequeña de fibras de PET, del orden de 0.26% del peso de cemento se añadió tanto para fibras laminares y tipo "O". Los resultados de las pruebas han demostrado, de hecho, que la adición de una cantidad muy pequeña de fibras de botellas de PET recicladas y desmenuzadas puede tener una gran influencia sobre el comportamiento post-agrietamiento de elementos de concreto en masa. Fibras en forma laminar y tipo "O" mejoran en gran medida la dureza de los especímenes. La mejora de la tenacidad es especialmente evidente para las fibras tipo "O" y parece que su forma especial ayuda a unir el concreto a cada lado de una sección fisurada. Las pruebas mostraron que es probable que al incorporar las fibras de PET en una mezcla de concreto aumente la ductilidad del concreto.

Effects of mineral admixtures and steel fiber on rheology, strength, and chloride ion penetration resistance characteristics of wet-mix shotcrete mixtures containing crushed aggregates

El estudio de Pangil Choi et al. (Choi et al., 2017) presenta los efectos de varios aditivos minerales tales como humo de sílice, cenizas volantes, escoria de alto horno granulada molida (GGBFS), metacaolín y fibra de acero sobre la reología, la resistencia y las características de resistencia a la penetración de ión cloruro de mezcla húmeda de concreto proyectado (WMS)



elaborado con áridos triturados. El análisis se realizó desde el punto de vista de proyección de concreto lanzado, indicadores de rendimiento y la capacidad de bombeo. Las proporciones de mezcla usadas en este estudio se determinaron basándose en varios tipos de mezclas con una gama más amplia de las tasas de sustitución a fin de proporcionar información adicional en profundidad sobre las propiedades de WMS que incorporan los agregados triturados: humo de sílice (0, 5, 9.1 y 15%), cenizas volantes (0, 10, 20 y 30%), GGBFS (0, 10, 20, 30 y 40%), y metacaolín (0, 5, 10 y 15%). Las dosificaciones de agente incorporador de aire (sulfonato a base de sílice) y superplastificante (policarboxilato-based) se fija en 0.01 y 1.1% en peso del aglutinante, respectivamente, independientemente de las variables experimentales.

De los resultados, la investigación arrojó que, para pruebas de compresión simple, los esfuerzos al sustituir humo de sílice, no fue considerable el cambio respecto a un concreto convencional. En la prueba de penetración de ion cloruro, menciona que la carga total aprobada en 6 h se redujo a 1318 culombios con 5% de humo de sílice, resultando en un nivel "bajo" de permeabilidad a los iones cloruro basado en ASTM C1202. Cuando se utilizaron 9.1 y 15% reemplazos de humo de sílice, se redujo su lectura a 505 y 303 culombios, respectivamente, lo que indica un nivel "muy bajo" de permeabilidad a los iones cloruro. Sobre la base de estos hallazgos, humo de sílice parece ser una mezcla que mejora sustancialmente la resistencia a la penetración de ion cloruro de WMS.

Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete

El trabajo presentado por Mariaenrica Frigione (Frigione, 2010) hace referencia a la elaboración de concreto, empleando una sustitución del 5% en peso de agregado fino, el cual fue sustituido por un peso idéntico de partículas de PET molidas (WPET) en la fracción de 0.1-5 mm. Estas partículas poseían una curva granulométrica similar a la de la arena natural sustituida. Los resultados de las pruebas físicas y mecánicas elaboradas en dicha investigación muestran que, en el intervalo estudiado de contenido de cemento (de 300 a 400 kg/m³) y de relación agua/cemento (a partir de 0.45 a 0.55), la sustitución de 5% en peso de arena silícea con piezas de WPET, obtenido de la molienda de PET de residuos, permite lograr un concreto que se caracteriza por la misma trabajabilidad y no segregación con

respecto a un concreto de referencia. La resistencia a la tracción y a compresión del concreto WPET fueron de 0.4 a 1.9% más bajo que las muestras de concreto de referencia, pero con una ductilidad ligeramente superior.

The possibility of enhancing some properties of self-compacting concrete by adding waste plastic fibers

Abdulkader Ismail Al-Hadithi (Al-Hadithi & Hilal, 2016) realizó una investigación sobre las propiedades del concreto auto-compactable (SCC) mediante la adición de fibras de residuos plásticos (WPF) producto del corte de botellas de bebidas. La investigación determinó propiedades del concreto fresco y endurecido en mezclas de concreto auto-compactable en relación constante de agua/cemento de 0.35, con un contenido de cemento de 490 kg/m³ y un contenido de ceniza volante del 25% del contenido total de aglutinante. La incorporación de la fibra producto del corte, fue en cantidades de 0 a 2.0% con rangos de 0.25, en volumen de la mezcla. El autor menciona que los SCC requieren una mayor proporción de materiales ultrafinos y la incorporación de aditivos químicos, particularmente un eficaz reductor de agua de alto rango. De los resultados obtenidos por el autor, menciona que la respuesta a las propiedades mecánicas del concreto modificado con fibras plásticas son muy favorables, obteniendo valores a compresión simple y flexión mayores a un concreto auto-compactable control.

Abdulkader Ismail menciona que, la adición de fibras producto de botellas de plástico ayuda a convertir los hormigones frágiles en otros más dúctiles. El papel principal de las fibras de WPF es transferir la tensión a través de la grieta y por lo tanto frena la apertura y propagación de grietas. Pero existe un efecto negativo de la adición de las propiedades de las mezclas frescas del concreto, representadas por una disminución en la capacidad de trabajo.

Influencia de la fibra de PET a partir de botellas recicladas sobre el comportamiento mecánico en un concreto aplicado en prefabricados

Aguilera y Diestra (Aguilera Bazán & Diestra Lujan, 2017) desarrollaron una investigación experimental relacionada al estudio del comportamiento mecánico del concreto hidráulico incorporando fibras de Tereftalato de Polietileno o PET, las cuales el autor menciona que son

materiales reciclados y sostenibles dentro de la industria de la construcción. La fibra utilizada fue en forma de escamas a diferentes porcentajes: 0%, 0.5%, 1.0% y 1.5%, la cual fue empleada para materiales prefabricados tales como: baldosas, bancas, cercos perimétricos y topellantas para estacionamiento. Los resultados de la investigación elaborada por Aguilera Bazán y Diestra Luján muestran que a medida que aumenta la porción de fibra adicionada en forma de escama en el concreto (1.0% y 1.5%); reducen la trabajabilidad, la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción respecto a un concreto sin fibras de PET, por lo que concluyen que estos porcentajes de adición reducen la resistencia global del concreto. Los autores observaron en las probetas ensayadas una buena adherencia de la fibra dentro de la matriz de concreto, reduciendo el tamaño de las fisuras, es decir presentaron un mejor comportamiento dúctil ya que cuando se probaron las muestras sin fibra, estas presentaron “desmoronamiento” en comparación con los de fibra que se mantuvieron adheridas mediante dichas fibras.

The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; a laboratory evaluation

Amir Mahyar Azhdarpour et al. (Mahyar Azhdarpour, Reza Nikoudel, & Taheri, 2016) realizó una investigación enfocada al estudio del efecto producido por la adición de partículas de residuos de plástico en las propiedades del concreto hidráulico. Dichas partículas de plástico fueron incorporadas a la curva granulométrica de los agregados utilizados en la elaboración del concreto, teniendo partículas de plástico grueso con un diámetro de 2-4.9 mm y en una segunda graduación, fragmentos finos, con un diámetro que variaba de 0.05 a 2 mm. Las proporciones empleadas de las partículas de PET fueron del 5%, 10%, 15%, 20%, 25% y 30% y remplazadas por el agregado pétreo según correspondía. Los resultados de la investigación arrojaron que, al sustituir los fragmentos de PET por una parte en porcentaje de los agregados, la densidad del concreto en seco y en húmedo, disminuye de tal forma que su peso del concreto elaborado se reduce. Respecto a la resistencia a la compresión del concreto, ésta incrementó respecto a un concreto control cuando se emplearon porcentajes bajos de PET (5% y 10%) en un 39% y 7.6%, respectivamente. También, el concreto elaborado con un 30% de PET presentó un comportamiento de fluencia, es decir, presentó



mayor deformabilidad dicho concreto antes de su falla. El comportamiento a la flexión del concreto se fortaleció al incorporar valor de 5% y 10%, caso contrario de las mezclas con un valor mayor al 10% de residuos plásticos.

Estudio numérico-experimental de fibras de PET y su comportamiento en la matriz de concreto

La investigación desarrollada por Baldenebro López (Baldenebro López, 2015) plantea la simulación computacional y el modelado por elemento finito a partir del comportamiento mecánico de elementos de concreto reforzado con fibras de PET mediante pruebas experimentales. Del estudio experimental elaborado por el autor, se identificó la elaboración de probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura, para la resistencia a compresión y el módulo de deformación del concreto. De las fibras de PET adicionadas al concreto, se emplearon porcentajes de 0.5%, 1% y 2%, en forma de fibras cortas, largas y continuas. También se incorporó un aditivo a todas las mezclas de concreto para alcanzar la fluidez necesaria. De los resultados, se menciona que a partir de la elaboración de curvas de carga-deflexión obtenidas experimentalmente se encontró que la incorporación de fibra en la mezcla de concreto incrementa la resistencia a la flexión y la capacidad de deformación en comparación con las vigas de control.

Elaboración de PET-concreto, buscando mejorar sus propiedades mecánicas de tensión y flexión

Palacios Santillán (Palacios Santillán, 2014) desarrolló una investigación con base en el reciclaje de botellas de PET y el empleo de este, como una proporción del agregado fino para la elaboración de un nuevo concreto y con la finalidad de mejorar sus propiedades mecánicas a la flexión y a la tensión. El concreto desarrollado se le incorporó hojuelas de PET de uno por un centímetro, aproximadamente, en proporciones de sustitución de la arena del 0%, 10%, 20% y 50% y mezclándolo con grava, agua, cemento. De los resultados obtenidos en la investigación, el autor menciona que las mezclas dosificadas con PET registraron baja resistencia a la compresión debido a la falta de adherencia, obligando a diseñar con un mayor consumo de cemento y a la par incrementando el costo del concreto, siendo que, al incorporar

PET triturado, el costo se incrementó hasta un 44.61% respecto al del concreto convencional. Al utilizar mayor porcentaje de PET como sustitución de una parte de arena en la mezcla, se obtuvo una mayor resistencia a la flexión, pero la resistencia a la compresión fue prácticamente nula.

Propiedades mecánicas de un concreto reforzado con fibras de PET reciclado

Quintero y Mahecha (Quintero Blandón & Mahecha Rico, 2016) analizaron las propiedades mecánicas de un concreto con porcentajes de PET reciclado y triturado del 0%, 10%, 20% y 30% como agregado. El PET reciclado fue procedente de botellas y envases de plástico. De los resultados obtenidos en la investigación de Quintero y Mahecha, se establece que la combinación en un punto óptimo entre concreto y agregado PET no es posible, dado que si bien se observó un crecimiento en la resistencia a la flexión a medida que aumentaba el porcentaje de agregado PET (1,5% en adición de 30% PET), la resistencia a la compresión decrece en un porcentaje mayor bajo las mismas cantidades de adición de PET (-6,9% en adición de 30% PET), por lo cual no es eficiente trabajar con este tipo de material como agregados en el diseño de mezcla.

Efecto en las propiedades en tensión de un material compuesto base cemento reforzado con fibras de PET reciclado

Flores Fernández (Flores Fernández, 2014) realizó un trabajo cortando botellas de PET en tiras aproximadamente de 3 mm de ancho por 55 cm de largo en su versión continua y de 4 cm de largo en su forma discontinua, en porcentajes de 0.25%, 0.50% y 1% en volumen, para reforzar probetas de mortero y analizarlas a tensión directa (ensayo no normado). El PET fue analizado por medio de espectroscopía de infrarrojo para determinar si existe degradación al interactuar con una matriz base cemento. La colocación de las tiras continuas antes de la elaboración de mezcla de concreto fue un proceso previo de fijación y pretensado, a diferencia de las tiras cortas que sólo se pesó el porcentaje necesario para posteriormente agregarlas a la mezcla.

Flores Fernández menciona que el PET reciclado no presenta degradación al interactuar con la reacción química que provoca el mortero, por lo cual es factible su uso como refuerzo.

También menciona que utilizar PET reciclado en tiras como refuerzo de un mortero sometido a tensión directa presenta una mejora en su comportamiento después de la falla, ya que la adherencia matriz-PET genera un esfuerzo residual que va en aumento; por lo que no presenta separación total después de dicha falla, lo que quiere decir que, las fibras de PET mitigan las fisuras en los morteros.

Hormigón fibro-reforzado, fibras obtenidas de envases post-consumo vs fibras sintéticas comerciales. Estudio preliminar

Sanabria Chioino (Sanabria Chioino, 2016) realizó una investigación en donde compara las características resistentes de un concreto reforzado con fibras obtenidas de residuos post-consumo (PET), un concreto reforzado con fibras comerciales de polipropileno (SikaFiber® ForcePP48) y un concreto tradicional (sin fibras). El autor hace mención del uso de fibras de polipropileno en la reconstrucción de la Ruta 24 en Uruguay, donde se observaron buenos resultados de la aplicación de fibras en el pavimento, siendo estas distribuidas uniformemente en la mezcla de concreto. Las fibras de PET fueron obtenidas del corte de botellas post-consumo de agua con gas de 2 litros, con un equipo mecánico tipo guillotina. De los resultados obtenidos en esta investigación, el autor menciona que el concreto reforzado con fibras de PET tiene un 20% más resistencia a tracción que el concreto sin fibras y también dicho concreto con fibras presentó menor resistencia a los esfuerzos de compresión que el concreto sin fibras (en promedio un 15% menos) y un 6% menos que el concreto con fibras de polipropileno.

Contribución de fibras PP provenientes de plásticos reciclados en el agrietamiento y resistencia del concreto en pavimentos portuarios de Veracruz

Santos Cortés (Santos Cortés, 2006) realizó un trabajo de investigación aplicado a pavimentos de concreto hidráulico usado en las zonas portuarias de Veracruz, cuyo objetivo principal era contribuir a disminuir el agrietamiento y aportar en la resistencia del concreto, para ello empleó fibras de polipropileno (PP) provenientes de plásticos reciclados. Las fibras de PP son de color blanco, de longitudes de 19 mm (3/4"). En esta investigación se elaboró una mezcla patrón sin fibras y a partir de ésta se agregarán diversas dosificaciones de fibras



de polipropileno, considerando como base la adición de 660 g por m³ y a partir de ésta se elaborarán tres mezclas con mayores dosificaciones. Los porcentajes adicionados estuvieron dados en función del peso del cemento, en intervalos de 0.25%. El concreto elaborado para las diferentes mezclas presentaron una relación a/c de 0.58. De los resultados expuestos por esta investigación, el autor menciona que la aportación de las fibras de PP se da a partir de la detención o reducción de los agrietamientos observados en el laboratorio, es decir que, si una microfisura se comienza a originar y se propaga, ésta es detenida al llegar a la primera fibra, previniendo así el futuro desarrollo de la grieta.

2.1. Recapitulativo

De las investigaciones mencionadas anteriormente, se pudo observar la variación que existe en la aplicación de fibras y adiciones minerales dentro de los materiales de construcción que con el paso del tiempo y hasta la fecha han logrado ser una solución al mejoramiento de sus propiedades tanto físicas como mecánicas.

La mayoría de estos autores coinciden en la incorporación de distintas fibras comerciales (fibra de vidrio, de acero, de polipropileno, etc.) al concreto hidráulico para disminuir la contracción y aumentar la ductilidad del concreto, las cuales, a pequeñas concentraciones que van por debajo del 1% del volumen de la mezcla, realizan este efecto, aumentando las propiedades mecánicas del material. De la misma forma, algunos autores trabajan con adiciones minerales las cuales proporcionan una mayor densidad en el concreto, reduciendo el tamaño de los poros internos del concreto hidráulico y proporcionando una mayor protección a la hora de existir algún ataque químico externo que debilite el pavimento, lo cual ayudará a aumentar la durabilidad del material.

Como ya se ha mencionado anteriormente, los pavimentos rígidos buscan establecer un equilibrio entre el cumplimiento de su resistencia mecánica del concreto hidráulico y la disminución de grietas en su superficie, es entonces que se busca en la presente investigación mejorar el comportamiento en el MR del concreto con la incorporación de fibras de PET y adiciones minerales. La mayoría de los trabajos estudiados, determinan la resistencia a la flexión y compresión de los concretos modificados pero ningún de ellos lo relaciona con la



aplicación hacia pavimentos rígidos y solo un par de autores trabajan en la resistencia por durabilidad.

3. Fundamentos Teóricos de la Investigación

3.1. Un estudio general de los pavimentos de Concreto Hidráulico

3.1.1. Los caminos y carreteras en México

Las vías de comunicación que han sido formadas a lo largo de la vida social, por tierra, agua y aire; han sido motores e instrumentos indispensables para el desarrollo de la civilización. Por necesidad, los primeros caminos fueron vías de tipo peatonal donde nuestros antecesores ya le proporcionaban una utilidad para poder facilitar su nivel de vida, es así como las vías terrestres surgieron y se desarrollaron a lo largo de la historia con un solo objetivo: beneficiar a la sociedad en todo aspecto al aplicar la ingeniería de vías adecuadamente, de tal forma que se pueda comunicar un punto A con un punto B.

Las vías terrestres son obras de infraestructura de transporte, como son, por ejemplo: caminos, carreteras, autopistas o autovías, puentes, túneles y vías férreas. Las vías terrestres, así llamadas se construyen fundamentalmente de tierra y sobre tierra.

La historia de las vías terrestres en México comienza con la aparición de las carretas que, dado a sus dimensiones, las veredas y caminos peatonales tuvieron que ser ampliados para facilitar su acceso, que con el paso del tiempo se trazaron las primeras grandes terracerías (Olivera, 1996).

Los senderos, caminos y rutas son una expresión de la forma en que los grupos humanos organizan el espacio social a partir del geográfico (de León Morga, 2015). Según la Real Academia de la Lengua Española (RAE), un *sendero* se define como: “Camino más estrecho que la vereda, abierto principalmente por el tránsito de peatones y del ganado menor”; un *camino* como: “Tierra hollada por donde se transita habitualmente”; y *carretera* como: “Camino público, ancho y espacioso, pavimentado y dispuesto para el tránsito de vehículos”.

En comparación, la evolución de las veredas a caminos y a su vez en carreteras se debe al aumento de tráfico en los mismos, por donde no solo circulaban peatones, sino en otros casos

también animales o carruajes, y por donde más tarde circularían automóviles (de León Morgia, 2015).

En el antiguo México, los aztecas y sus antecesores construyeron majestuosas calzadas en los lagos de la Cuenca de México, complementadas con los canales para llegar en canoa a la ribera, islas y zonas chinamperas, muchas de estas zonas de México y las huellas de esas antiguas sendas han quedado cubiertas por asentamientos de los periodos colonial e independiente.

Durante la época prehispánica, la presencia de calzadas o *sacbé* (o *sacbeob* en plural) es uno de los rasgos arquitectónicos que identifica relaciones externas e internas entre las ciudades mayas. Estas construcciones, comúnmente consisten en elevaciones artificiales que forman caminos que se extienden entre complejos arquitectónicos de un mismo sitio, o en ocasiones se extienden haciendo una conexión entre diferentes ciudades. La palabra "*sacbé*" se deriva de dos vocablos mayas, "sac" que quiere decir blanco y "bé" camino. Estos caminos blancos fueron construidos básicamente con piedra caliza y recubiertas de una gruesa capa de estuco blanco (de León Morgia, 2015).



Figura 1. Camino Blanco o Sacbe, de Labna, Yucatan. Fuente: Marco A. de León Morgia.

Ya para la época de la colonia, en el año de 1533, la Reina de España emitió en Madrid la Cédula Real que ordenó la construcción de caminos en la Nueva España. Es así que, en nuestro país, Juan Bautista Antonelli -ingeniero militar italiano- trazó la primera vía transitable que iba de México a Veracruz, vía Orizaba, por mandato del Virrey Luis de Velasco (hijo), en 1590.



El Gobierno del presidente Benito Juárez crea la primera dependencia federal con el encargo de construir caminos, la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas (SCOP), jugando un papel relevante en el desarrollo del México moderno. Es de destacarse la construcción de la carretera México-Nuevo Laredo que unió a la Ciudad de México con la frontera de los Estados Unidos a lo largo de sus mil 174 kilómetros.

También le correspondió a la SCOP construir las primeras carreteras México-Pachuca, México-Acapulco y México-Guadalajara, las cuales fueron inauguradas entre 1927 y 1929 por los presidentes Plutarco Elías Calles y Emilio Portes Gil.

En 1950 es el presidente Miguel Alemán Valdez quien inaugura la carretera Panamericana, la cual marcó un hito histórico por su longitud de tres mil 446 kilómetros de Ciudad Juárez, Chihuahua a Ocotlán, Chiapas.

La SCOP cierra su trayectoria institucional con la construcción de las autopistas de cuota con características modernas: México-Querétaro y México-Cuernavaca, las cuales fueron inauguradas por el presidente Adolfo Ruiz Cortines.

A partir de 1959, siendo presidente el Licenciado Adolfo López Mateos, se instituye la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, con lo que inicia una era de mayor modernidad en la construcción de los caminos de México.

Esta instancia gubernamental es responsable de planear, programar, construir, modernizar, operar y dar mantenimiento y rehabilitación a la red de carreteras federales, así como a caminos rurales y alimentadores.

Le corresponde a esta nueva etapa de la Secretaría la construcción de importantes autopistas, entre las que destacan: la México-Puebla, la Querétaro-Irapuato, inauguradas ambas por el presidente Adolfo López Mateos.

Le siguieron otras relevantes: como la Monterrey-Nuevo Laredo, la Guadalajara-Colima, la México-La Marquesa, la Mérida-Cancún, la Autopista del Sol, el Arco Norte, la Mazatlán-Durango, y la México-Tuxpan, éstas dos últimas inauguradas por el presidente Enrique Peña Nieto (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2015).

3.1.1.1. Panorama actual de la Red Carretera

El Anuario Estadístico del Sector Comunicaciones y Transportes 2018 (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2018), menciona que entre los logros registrados hasta el año publicado, se encuentra la extensión de la capacidad y especificaciones técnicas de la Red Nacional de Carreteras, al destacar el aumento en la longitud de la Red Carretera en poco más de 9 809 km., que significa una adición comparativa del 2.5% en cuanto al periodo anterior.

También de acuerdo con dicho anuario emitido por la SCT en México, la Red Carretera Federal se compone de aproximadamente 407,959 kilómetros de carreteras y caminos. A continuación, se presenta una distribución porcentual de la longitud de la red de carreteras según su superficie de rodamiento (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2018):

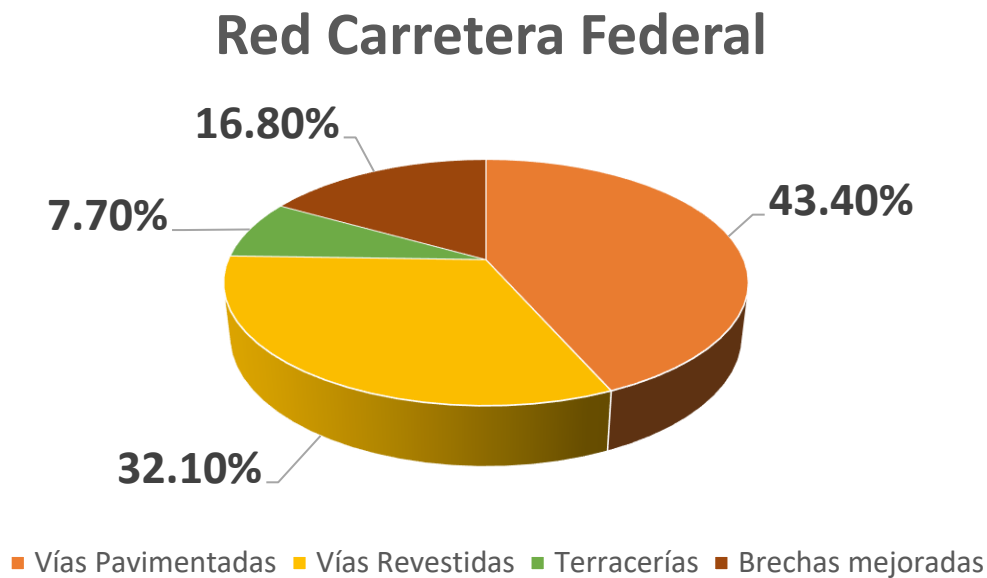


Figura 2. Distribución porcentual de la longitud de la red de carreteras según su superficie de rodamiento. Fuente: Anuario SCT 2018.

De los datos estadísticos anteriores, las vías pavimentadas corresponden a una longitud igual a 177,192 km a lo largo de la superficie de México, cuya cantidad va en aumento cada año, pero sin existir un dato exacto de las vías pavimentadas con concreto hidráulico y asfáltico.

3.1.2. Pavimento rígido

Podemos definir el *pavimento* como la estructura constituida por una capa o conjunto de capas de materiales con determinadas propiedades comprendidas entre la subrasante o nivel superior de las terracerías y la superficie de una obra vial, cuyas funciones principales son las de proporcionar una superficie de rodamiento uniforme y resistente a la acción de tránsito, al intemperismo y otros agentes que puedan perjudicarlo. Su función es la de transmitir adecuadamente a las capas inferiores, los esfuerzos producidos por el tránsito (Hayasaka Reyes & Peñafiel Soto, 1996).

Las capas que constituyen la estructura de un pavimento son de materiales naturales seleccionados, sometidos a diversos tratamientos y cubiertos por una carpeta asfáltica o con una losa de concreto hidráulico. De lo anterior, es que se identifican los dos tipos de pavimento, como *flexibles (asfálticos)* o *rígidos (hidráulicos)*.

En comparación de los pavimentos flexibles, la superficie de rodamiento de un pavimento rígido es proporcionada por losas de concreto hidráulico de cemento Portland, las cuales distribuyen las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores por medio de toda la superficie de la losa y de las adyacentes, que trabajan en conjunto con la que recibe directamente las cargas. Por su rigidez distribuyen las cargas verticales sobre un área grande y con presiones muy reducidas (figura 3).

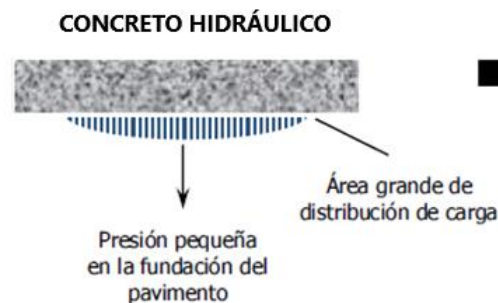


Figura 3. Distribución de la carga en un pavimento rígido. Fuente: manual de diseño AASHTO-93.

La sección transversal de un pavimento rígido está constituida por la losa de concreto hidráulico, apoyada en una sub-base y que a su vez se construye en una capa subrasante

(figura 4). Dichas capas que conforman este tipo de pavimentos presentan de forma general las siguientes características:

Subrasante: capa constituida por materiales no seleccionados y es, junto con el cuerpo de terraplén, el cuerpo de las terracerías. Se considera como la cimentación del pavimento y una de sus funciones principales es la de soportar las cargas que transmite el pavimento y darle sustentación, así como evitar que el terraplén contamine al pavimento y que sea absorbido por las terracerías.

Sub-base: es la capa de la estructura de pavimento destinada fundamentalmente para soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura de pavimento.

Losa (superficie de rodadura): es la capa que se construye mediante la colocación de una mezcla de agregados pétreos, cemento Portland y agua, para proporcionar al usuario una superficie de rodadura uniforme, bien drenada, resistente al derrapamiento, cómoda y segura. Tiene además la función estructural de soportar y distribuir la carga de los vehículos hacia las capas inferiores del pavimento (N-CTR-CAR-1-04-009, 2006). Dado a la rigidez y alto módulo de elasticidad de la capa de concreto, basan su capacidad portante en la losa, más que en la capacidad de la subrasante.

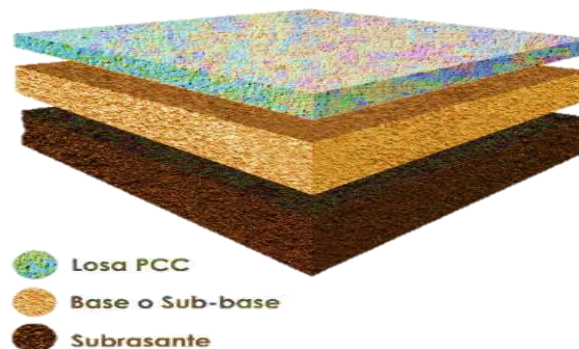


Figura 4. Estructura de un pavimento rígido. Fuente: Luis G. Loría Salazar.

3.1.3. Uso e importancia de los pavimentos rígidos en México

El uso de concreto hidráulico en la pavimentación de carreteras en la República Mexicana es una de las áreas con mayor potencial de crecimiento dentro de la industria del concreto. En este sentido, cabe decir que en la Ciudad de México tenemos uno de los casos excepcionales de construcción de una carretera con concreto de la primera mitad del siglo XX: la que atraviesa el Parque Nacional del Desierto de los Leones, misma que fue inaugurada en la década de los treinta del siglo XX y que sigue brindando un excelente servicio.

Un importante trabajo realizado en los años noventa fue el Libramiento Ticumán, con una longitud de poco más de 15 km, construido en 1992 y cuya obra fue la primera ejecutada en México con equipo de encofrados deslizantes. La carretera consiste en una sobrecapa de concreto hidráulico de aproximadamente 20 cm de espesor que fue aplicada sobre el pavimento de asfalto existente con el propósito de rehabilitarlo para proporcionar un tránsito seguro y eficiente a una vía que tiene un alto porcentaje de vehículos pesados.

A partir de 1993 se inició a gran escala la construcción de pavimentos rígidos nuevos. Por ese año también tuvo lugar la construcción de sobrecapas ultra delgadas de concreto hidráulico en el estado de Chihuahua y en el resto del país.

A lo largo de los años el uso del concreto para generar carreteras de calidad está presente en obras como la Autopista Pirámides-Tulancingo, en el estado de Hidalgo. Esta carretera, con una longitud de 67 km muestra dos calzadas de dos carriles y fue construida entre 1997-1998. Otras importantes obras han sido, el libramiento Querétaro-San Luis Potosí, y de los más recientes, el Libramiento Arco Norte (figura 5) (Celis Navarro, 2011).



Figura 5. Libramiento Arco Norte, México. Fuente: imcyc.



Actualmente, de manera sostenida y a la par con el desarrollo, la modernidad y competitividad de la red carretera, la tecnología de los materiales ha venido evolucionando y contribuyendo a incrementar el ciclo de vida, la calidad, seguridad y eficiencia de los pavimentos.

3.1.3.1. *Características importantes de los pavimentos de concreto hidráulico*

La capa superficial de los pavimentos rígidos presenta características particulares durante la vida útil o de servicio de la estructura, las cuales se diferencian de los pavimentos flexibles. Una de las características más importantes es la resistencia a la flexión y compresión, mientras que la mayor desventaja es que se ve afectada por los cambios de temperatura.

Antes de ingresar al trabajo de investigación se deben entender algunos criterios en cuanto a las características del concreto hidráulico y que derivarán en el uso dentro de los pavimentos rígidos, dichos criterios deben ir enfocados al beneficio del buen funcionamiento tanto del material como de la estructura. Dichas características son:

- ✚ Alta resistencia a la flexión y compresión: estas dependen principalmente del material (cemento) en combinación con los agregados pétreos que la conforman. En pruebas del laboratorio se han podido alcanzar resistencias hasta de 1050 kg/cm^2 a los 90 días para consumo bajo de cemento, las cuales se han alcanzado con la adición de cenizas volcánicas.
- ✚ Rigidez: Es la capacidad que tienen los elementos de las estructuras de aguantar los esfuerzos sin perder su forma (deformarse) manteniendo sus uniones. En ingeniería, es una medida cualitativa de la deformación elástica producida en un material. Un material rígido tiene un alto módulo de elasticidad, mantiene su tamaño y forma al ser sometido a una carga elástica (Askeland, 2016). Dicha propiedad está en función de la resistencia del concreto en forma de losas y del módulo de elasticidad (E). Característica que le da el nombre al tipo de pavimento y es la encargada de resistir la mayoría de los esfuerzos y deformaciones que se producen por efecto del tránsito.



- ✚ Estabilidad de la superficie de rodamiento: esta característica se da a partir de la ejecución correcta de las técnicas de construcción y de las normas técnicas que, para el caso de calidad de la superficie de rodamiento, nos proporcionara una superficie plana, de mayor estabilidad y seguridad en el manejo.
- ✚ Color: el color natural que transfiere el cemento Portland al concreto hace que éste posea una alta reflectancia a la luz, y esto representa un enorme ahorro en cuanto a iluminación y el mantenimiento del pavimento (Hayasaka Reyes & Peñafiel Soto, 1996).

3.1.4. Una clasificación general de los pavimentos rígidos

Los pavimentos rígidos más comunes son los siguientes:

- ✚ Pavimentos de concreto simple con juntas (*Jointed Concrete Pavements, JCP*): son un sistema de losas de concreto simple, unidas entre sí por juntas transversales y longitudinales. Los pavimentos son construidos sin acero de refuerzo y pueden ir con o sin barras de transferencia de cargas en las juntas (barras pasajuntas). La transferencia de carga entre losas se logra a través de la trabazón entre los agregados en el caso de no llevar pasajuntas. Este tipo de pavimentos se recomienda generalmente para caminos donde el volumen de tránsito medio o bajo (Inciarte Melan, 2012) (Miranda Rebolledo, 2010).
- ✚ Pavimentos de concreto reforzado con juntas (*Jointed Reinforced Concrete Pavements, JRCP*): sistema de losas de concreto armado, unidas entre sí por juntas transversales y longitudinales. Este tipo de pavimentos contienen acero de refuerzo y pasajuntas en las juntas de contracción, las cuales presentan una separación mayor en comparación con las empleadas en pavimentos convencionales. Debido a esto es posible que entre las juntas se produzcan una o más fisuras transversales, las cuales se mantienen prácticamente cerradas a causa del acero de refuerzo, lográndose una excelente transferencia de carga a través de ellas.



- ✚ Pavimentos de concreto con refuerzo continuo (*Continuously Reinforced Concrete Pavements, CRCP*): sistema de losas de concreto armado, unidas entre sí por acero de refuerzo. Debido a su continuo contenido de acero en dirección longitudinal, estos pavimentos desarrollan fisuras transversales a intervalos muy cortos. Sin embargo, por la presencia de refuerzo, se desarrolla una gran transferencia de carga en las caras de las fisuras.

Existen otros tipos de pavimentos, como pueden ser:

- ✚ Pavimentos de concreto presforzado: sistema a base de losas que han sido previamente esforzadas y de esta manera no contienen juntas de construcción. Con este sistema de presfuerzo se ha logrado construir losas de más de 120 m de longitud, con una reducción del 50% del espesor de la losa. Sin embargo, pese a los esfuerzos para desarrollar esta técnica, en carreteras se han producido más dificultades que ventajas.
- ✚ Pavimentos de concreto con fibras o fibroso: en este tipo de losas las fibras de acero, de productos plásticos o de fibra de vidrio, distribuidos aleatoriamente, funcionan como el armado de las losas; de tal manera, que se aumenta la resistencia a la tensión y a la fatiga, fisuración controlada, resistencia al impacto, durabilidad, etc. (Miranda Rebolledo, 2010).

3.1.5. Métodos y criterios de diseño del concreto hidráulico aplicado a pavimentos

De manera común el concreto hidráulico utilizado en una gran variedad de elementos constructivos, lleva consigo el cumplimiento de la resistencia a compresión ($f'c$) como propiedad principal del material. Sin embargo, cuando el concreto se usa en la construcción de pavimentos, las condiciones de calidad establecidas son un tanto diferentes.

Aunque la resistencia a la compresión sigue siendo importante, garantizar un módulo de ruptura adecuado a las condiciones de uso se vuelve fundamental en el caso de los concretos para pavimentos. La durabilidad, la resistencia al desgaste y otras, son características



fundamentales, a diferencia de aquellas que se requieren en la construcción de edificios (Santos Cortés, 2006).

Encontrar un concreto sustentable, que reúna dichas características y que posteriormente sea aplicable a pavimentos, es una tarea importante. Uno de los objetivos de la presente investigación comprende este panorama, para lo cual se ha considerado agregar al concreto, nuevos materiales como fibras y adiciones minerales.

En México las dos metodologías de diseño de pavimentos de concreto más utilizadas son el Método AASTHO y el Método de la Asociación del Cemento Portland (Portland Cement Association, PCA).

Ambos métodos de diseño son apropiados para el diseño de espesores de pavimentos rígidos en cualquier tipo de proyecto, coincidiendo en cumplir con el factor de diseño de módulo de ruptura (MR); factor que representa una propiedad fundamental del concreto hidráulico.

A diferencia del método de la PCA, el método AASHTO considera la variación del módulo de elasticidad del concreto y del coeficiente de Poisson, la cual varía en relación con la resistencia a la flexión del concreto; por lo anterior y por ser un método considerado en la gran mayoría de proyectos carreteros, se optó por desarrollar las características del método AASHTO como la base para entender el comportamiento del concreto en el diseño de pavimentos.

3.1.5.1. Método AASHTO

La metodología de diseño recomendada por la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) está basada en los resultados de una prueba denominada “prueba AASHO” realizada entre 1951 y 1960 en Ottawa, Illinois, para estudiar el comportamiento de estructuras de pavimento de espesores conocidos, ante cargas móviles de magnitudes y frecuencias también conocidas y bajo el efecto del medio ambiente (Inciarte Melan, 2012).

Entre 1984 y 1985, el Subcomité en Diseño de Pavimentos y consultores revisaron la guía en vigencia y así sale la “AASHTO” Guide for Design of Pavement Structures (1986) con

muchas variaciones con respecto a las versiones anteriores. En 1993 se publica una nueva versión de la guía, pero sin cambios en lo que concierne al diseño de pavimentos rígidos (Hormigón, 2006).

Con base a la prueba ya citada, la AASHTO obtuvo la siguiente expresión para el diseño de pavimentos rígidos:

$$\log_{10}(E18) = Z_r \times S_o$$
$$+ 7.35 \times \log_{10}(D + 1) - 0.06 + \frac{\log_{10} \left[\frac{(\Delta PSI)}{4.5 - 1.5} \right]}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}}$$
$$+ (4.22 - 0.32 \times p_t) \times \log_{10} \left\{ \frac{MR \times Cd \times (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \times J \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{k}\right)^{0.25}} \right]} \right\}$$

donde E18 es el tránsito en ejes equivalentes de 8.2 t, Z_r es la desviación normal estándar para “R”, S_o es la desviación estándar, D es el espesor de la losa del pavimento, ΔPSI es la diferencia de serviciabilidad, P_t es la serviciabilidad final, MR es el módulo de ruptura del concreto, Cd es el coeficiente de drenaje, J es el coeficiente de transferencia de carga, E_c es el módulo de elasticidad del concreto y k es el módulo de reacción de la subrasante.

El procedimiento de dimensionamiento de un diseño normal es suponer un espesor de pavimento (D) e iniciar a realizar tanteos, con el espesor supuesto se calculan los ejes equivalentes y posteriormente se evalúan todos los factores adicionales de diseño. Si se cumple el equilibrio en la ecuación, el espesor supuesto es resultado del problema, de lo contrario se deben seguir haciendo tanteos.

Como ya se mencionó anteriormente, de las propiedades principales del concreto que se incluyen en la ecuación de diseño y que influyen en el espesor del pavimento y en su comportamiento a lo largo de su vida útil son:



- i) La resistencia a la tensión por flexión o módulo de ruptura (MR) y
- ii) El módulo de elasticidad del concreto (Ec).

3.1.5.2. *Módulo de ruptura (MR).*

Debido a que los pavimentos de concreto trabajan principalmente a flexión, es recomendable que su especificación de resistencia sea acorde con ello. Por esa razón el diseño considera la resistencia del concreto a la flexión por tensión o módulo de ruptura (MR), especificada normalmente a los 28 días (Inciarte Melan, 2012).

La normativa mexicana NMX-C-191-ONNCCE define al módulo de ruptura como el valor obtenido mediante el procedimiento indirecto para determinar la resistencia a la tensión del concreto por el ensaye a la flexión de una viga.

El ensayo de resistencia a la flexión del concreto es útil en el diseño de pavimentos es también utilizado para el control de campo y de aceptación de los pavimentos (National Ready Mixed Concrete Association, 1998).

La resistencia a la flexión del concreto o valor del módulo de ruptura, es obtenida usando una viga con cargas concentradas en los tercios del claro. A partir de la falla del espécimen ensayado, se consideran dos tipos de fractura para determinar el módulo de ruptura del concreto (NMX-C-191-ONNCCE, 2015):

Si la fractura se presenta en el tercio medio del claro el módulo de ruptura se calcula como sigue:

$$MR = \frac{(PL)}{bd^2}$$

donde MR es el módulo de ruptura, en kPa (kgf/cm²); P es la carga máxima aplicada, en N (kgf); L es la distancia entre apoyos, en cm; b es el ancho promedio del espécimen, en cm y d es al peralte promedio del espécimen, en cm.

Si la ruptura se presenta fuera del tercio medio del claro, en no más del 5% de su longitud, se calcula el módulo de ruptura como sigue:

$$MR = \frac{(3Pa)}{bd^2}$$

donde a es la distancia promedio entre la línea de fractura y el apoyo más cercano en la superficie de la viga en mm.

Si la fractura ocurre fuera del tercio medio del claro en más del 5% se desecha el resultado de la prueba.

Los valores recomendados para el módulo de ruptura varían desde los 41 kg/cm² (583 psi) hasta los 50 kg/cm² (711 psi) a los 28 días, dependiendo del uso que vayan a tener. En la Tabla 1 se presentan los valores recomendados (Inciarte Melan, 2012).

Tabla 1. Valores de Módulos de ruptura recomendados.

Tipo de Pavimento	MR recomendado	
	kg/cm ²	psi
Autopistas	48	682.7
Carreteras	48	682.7
Zonas industriales	45	640.1
Urbanas principales	45	640.1
Urbanas secundarias	42	597.4

La metodología de diseño AASHTO permite utilizar una resistencia a la flexión promedio, obtenida de ensayos a flexión, con cargas concentradas en los tercios del claro, de elementos elaborados con mezclas diseñadas para cumplir la resistencia especificada del proyecto.

$$MR_{promedio} = MR_{especificado} + (Z_r)(S_o \text{ del } MR)$$

Estos resultados dependen de las condiciones de control y calidad que tenga el fabricante del concreto en sus procesos. En la Tabla 2 se indican valores típicos de la desviación estándar.

Tabla 2. Valores típicos de la desviación estándar.

Tipo	Desviación estándar	Promedio
Concreto premezclado	6% a 12%	9.0%
Mezclado central	5% a 10%	7.5%



3.1.5.3. *Módulo de elasticidad del concreto hidráulico (E_c).*

La elasticidad es la propiedad mecánica que hace que los materiales sufran deformaciones reversibles por la acción de las fuerzas exteriores que actúan sobre ellos. La deformación es la variación de forma y dimensión de un cuerpo. Un material es elástico cuando la deformación que sufre ante la acción de una fuerza, cesa al desaparecer la misma. El Módulo de Elasticidad es una medida de la rigidez del material ante una carga impuesta sobre el mismo (Askeland, 2016).

En el diseño AASHTO, el valor de elasticidad del concreto hidráulico está íntimamente relacionado con su módulo de ruptura. Existen varios criterios con los que puede estimarse a partir del módulo de ruptura; los dos más utilizados son:

$$E_c = (6750)(14.22MR)$$
$$E_c = (26454)(14.22MR)^{0.77}$$

Específicamente en el caso del concreto, se determina mediante la relación que existe entre el esfuerzo a la compresión y la correspondiente deformación unitaria (Pérez Alama, 1986).

Como muchos otros materiales estructurales, el concreto es, hasta cierto grado, elástico. Cuando el concreto es sometido a carga sostenida, la deformación aumenta con el tiempo; es entonces, que se dice que el concreto exhibe fluencia. Para propósitos prácticos, se hace una distinción arbitraria: la deformación que ocurre durante la carga se considera elástica y el incremento subsecuente de deformación se considera fluencia. El módulo de elasticidad que satisface este requerimiento es un módulo estático porque se determina a partir de una relación experimental de esfuerzo-deformación sobre un cilindro de prueba (Neville A. , 2013).

Para la determinación del módulo de elasticidad estático del concreto, se emplean cilindros de concreto moldeados y galgas de deformación o un compresómetro que consta de dos horquillas o anillos (figura 6). Uno de ellos (anillo B), se instala firmemente en la muestra, mientras que el otro (anillo C), es conectado en dos puntos diametralmente opuestos de modo que puede girar este libremente. También, se utiliza una varilla (punto A) de pivote a media

distancia entre los dos anillos del compresómetro; de tal forma que, se mantenga una distancia constante entre estos.

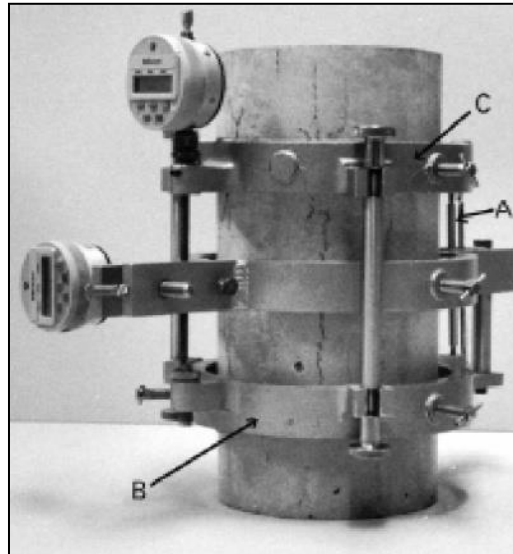


Figura 6. Compresómetro para la determinación del Módulo de Elasticidad Estático. Fuente: ASTM C 469.

A partir de la aplicación de carga en el concreto, se mide la deformación con un medidor de marcación o micrómetro con la finalidad de formar una gráfica esfuerzo-deformación unitaria (figura 7) y también se pueda determinar el esfuerzo (S_1), correspondiente a la deformación unitaria de 50 millonésimas (e_1), así como la deformación unitaria (e_2), correspondiente al 40% del esfuerzo máximo (S_2) aplicado del esfuerzo final o total del cilindro según lo especificado en la norma ASTM C 469. Es entonces, que se calcula el módulo de elasticidad con la siguiente ecuación:

$$E_c = \frac{(S_2 - S_1)}{(e_2 - 0.000050)}, \text{ en } kg/cm^2$$



Figura 7. Gráfica esfuerzo-deformación del concreto. Fuente: imcyc.

De los valores especificados del módulo de elasticidad en el concreto, algunos autores mencionan que en concretos de peso normal, el módulo de elasticidad (E_c) puede variar de 14,000 a 41,000 MPa (140,000 a 420,000 kg/cm²) y puede ser aproximado a 5,000 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en Megapascales (15,500 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en kg/cm²) (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004).

3.1.6. Fallas en los pavimentos rígidos

Una vez diseñada y colocada la superficie de rodamiento de un pavimento rígido se pueden identificar las fallas producidas durante su vida de servicio y determinar porque se han producido. Una primera etapa se da a partir de la identificación del tipo, severidad y magnitud de cada falla; pero también, se debe tratar de determinar si el diseño del pavimento, la carga soportada, el agua, la temperatura, los materiales del pavimento o el proceso constructivo fueron las causas de la falla. A demás de la inspección visual, pueden emplearse pruebas destructivas y no destructivas para determinar la condición estructural y las condiciones del material bajo la superficie del pavimento.

Lo que respecta a pavimentos rígidos y en particular a su carpeta de concreto hidráulico, se pueden presentar diferentes tipos de daño, los cuales pueden ser agrupados en cuatro categorías, dependiendo el comportamiento en el pavimento (Miranda Rebolledo, 2010):

1. Juntas



2. Fisuras y grietas
3. Deterioro superficial
4. Otros deterioros

De acuerdo con el objetivo de la presente investigación, se describirán de manera específica el tipo de daño número 3 anteriormente mencionado, teniendo como causa principal el comportamiento físico-mecánico del material constituyente en la superficie del pavimento: concreto hidráulico.

El concreto hidráulico constituye el 100% de la superficie de rodadura de un pavimento rígido y el cual al presentar buenas propiedades físicas y mecánicas, este llevará a una respuesta favorable a la estructura del pavimento, presentando una buena ductilidad y mitigando además de los deterioros superficiales, las fisuras longitudinales y transversales producto de la fatiga en el pavimento.

La ductilidad, en ciencia de los materiales, se define como la capacidad de un material de ser deformado permanentemente sin que ocurra ruptura cuando se le aplica una fuerza. La ductilidad mide el grado de deformación que un material puede soportar sin fallarse (Askeland, 2016).

3.1.6.1. Deterioro superficial

✚ **Desintegración o peladuras:** en este tipo de falla existe una progresiva desintegración de la superficie del pavimento por pérdida de material fino desprendido de la matriz arena-cemento del concreto, provocando una superficie de rodamiento rugosa y eventualmente con pequeñas cavidades, como se muestra en la siguiente figura 8. Es causada por el efecto abrasivo del tránsito sobre concretos de calidad deficiente o pobre, ya sea por el empleo de dosificaciones inadecuadas o bien por deficiencias durante su ejecución.



Figura 8. Peladuras en la losa de concreto. Fuente: ARGOS

- ✚ **Baches:** es la descomposición o desintegración de la losa de concreto y su remoción en una cierta área, formando una cavidad de bordes irregulares (figura 9), causada por la conjunción de varios efectos: suelos y capas inferiores inestables; espesores del pavimento estructuralmente insuficientes; defectos constructivos; retención de agua en zonas hundidas y/o fisuradas (Miranda Rebolledo, 2010).



Figura 9. Bache generado en la losa de concreto. Fuente: ARGOS

- ✚ **Reacción álcali agregado:** en general el patrón de este tipo de falla es en forma de mapa con fisuras predominantemente orientadas en dirección paralela a los bordes libres del pavimento (figura 10). La causa principal de estos deterioros es el empleo de agregados potencialmente reactivos sin la adopción de medidas preventivas.



Figura 10. Fallas por reacción álcali agregado. Fuente: ARGOS

✚ **Pulimento de la superficie:** este tipo de deterioro se hace notar en el pavimento, al presentar una superficie de rodamiento excesivamente lisa por efecto del pulimento de los agregados que la componen (figura 11). Las causas de este tipo de fallas están relacionadas con la exposición de placas de concreto a tránsito prematuro, a la calidad pobre o deficiente del concreto y a concretos que presentan agregados de naturaleza degradable (ARGOS, 2010).

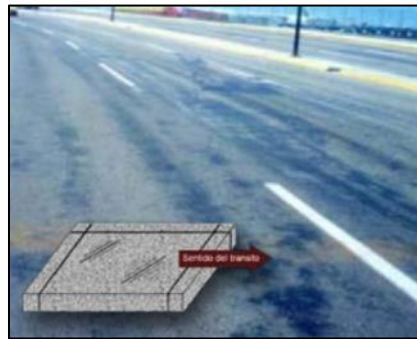


Figura 11. Pulimento de la superficie. Fuente: ARGOS

✚ **Fisuración en “D”:** consiste en una serie de fisuras muy próximas en forma de media luna (similar a una letra “D”), que aparecen en la superficie del pavimento en forma adyacente y aproximadamente paralela a las juntas transversales y longitudinales del pavimento y al borde libre (figura 12). Pueden originarse por el congelamiento y descongelamiento de agregados saturados en el concreto, cuando estos son excesivamente porosos, es entonces un problema más bien de los agregados que conforman el concreto que del comportamiento mismo del pavimento (Hormigón, 2006).



Figura 12. Fisuración en forma de "D". Fuente: propia.

✚ **Grietas producto de la contracción del concreto (tipo malla):** es la fractura provocada en la superficie de la losa hasta una profundidad de 5 a 15 mm, por desprendimiento de pequeños trozos de concreto. Por fisuras capilares se refiere a una malla o red de fisuras superficiales muy finas, que se extiende solo a la superficie del concreto. Las mismas que tienden a interceptarse en ángulos de 120° .

Los efectos considerados en el concreto hidráulico, una vez colado cualquier elemento constructivo de una obra civil, son comprendidos a partir del cambio que ligeramente se observa en el volumen del material, desde su estado fresco y hasta su vida en servicio. Dichos efectos inician cuando el agua sale del cuerpo poroso que no es completamente rígido, resultando una contracción (Neville A. , 2013).

Las grietas (fisuras) se desarrollan porque el concreto es relativamente débil en tensión, pero bastante resistente a compresión. El control de las variables que afectan los cambios de volumen puede minimizar las tensiones elevadas y el agrietamiento.

El cambio de volumen del concreto está relacionado con la expansión lineal y la contracción ocasionada por ciclos de temperatura y humedad, sin embargo, existen otros efectos menores como la contracción (retracción) por carbonatación, el ataque de sulfatos, la expansión perjudicial resultante de la reacción álcali-agregado o una deformación causada por aplicación de esfuerzos (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004).

Los cambios tempranos de volumen empiezan en las primeras 24 horas después del colado e influyen en la formación de fisuras en el concreto endurecido, especialmente en concretos

con baja relación agua-cemento; a este efecto, se le conoce como una **contracción plástica** en el concreto.

Se cree generalmente que es probable que ocurra agrietamiento por contracción plástica cuando la rapidez de evaporación sobrepasa la rapidez a la cual el agua de sangrado (exudación) se eleva a la superficie. Para prevenir estos agrietamientos, el medio más efectivo es el de mantener baja la rapidez de evaporación del agua a partir de la superficie del concreto; no excediendo el valor de 1 kg/m^2 por hora (Neville A. , 2013); es decir, emplear técnicas del curado del concreto como: el uso de rociado, rompevientos, sombreado, cubiertas de láminas de plástico, arpillera húmeda, auxiliares de acabado aerosol (retardadores de evaporación) y **fibras plásticas** (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004).

Las grietas por contracción plástica que se observan en el concreto (figura 13) se parecen a rasgaduras en la superficie las cuales pueden ser muy profundas, variando su ancho entre 0.1 y 3 mm, y pueden ser muy cortas o tan largas como 1 m (Neville A. , 2013).

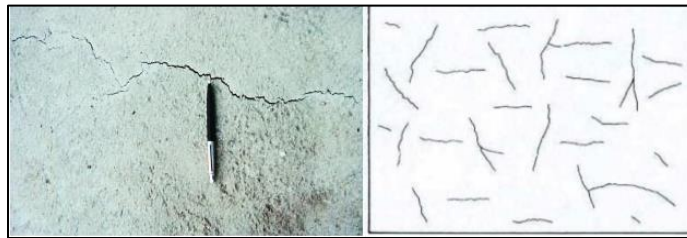


Figura 13. Fisuras por contracción plástica en la superficie del concreto hidráulico. Fuente: propia.

Un segundo efecto, conocido como **contracción por secado** en el concreto endurecido, es cuando el elemento puesto en servicio se expande ligeramente con el aumento de humedad y se contrae con la pérdida de la misma, provocando cambios repentinos de volumen y por consecuencia agrietamientos. El concreto se contrae o se expande con cada cambio de contenido de humedad debido principalmente a las respuestas de la pasta de cemento. La mayoría de los agregados presenta poca respuesta a los cambios de contenido de humedad, aunque hay pocos agregados que se expanden o contraen en respuesta a estos cambios.

Existen 4 condiciones para que se presenten este tipo de grietas en el concreto endurecido. Durante su secado, el concreto se contrae por naturaleza y donde no exista una restricción, el

movimiento ocurrirá libremente y no desarrollará esfuerzos ni fisuras (figura 14a superior). Si los esfuerzos de tracción (tensión) que resultan de la contracción por secado restringida superan la resistencia a tracción del concreto, se desarrollarán grietas (figura 14a inferior). Fisuras aleatorias se desarrollarán si las juntas, en losas de pavimentos, no se espacian adecuadamente y el concreto estará restringido cuanto a su acortamiento (figura 14b). Para controlar las fisuras aleatorias, las juntas de contracción en losas sobre el terreno deberán espaciarse a distancias de 24 a 36 veces el espesor de la losa (figura 14c). Las juntas en muros son igualmente importantes para el control del agrietamiento (figura 14d).

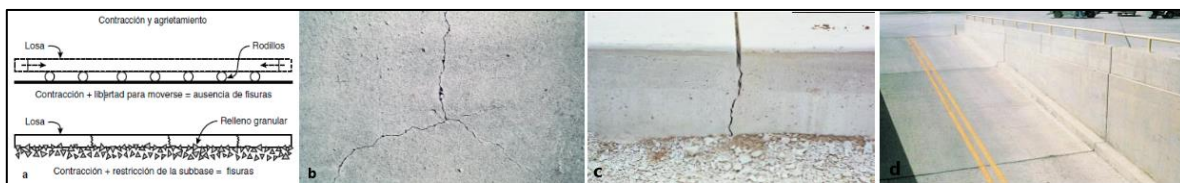


Figura 14. Condiciones para la propagación de fisuras (grietas) por contracción por secado. Fuente: propia.

En aplicaciones en donde se presenta el concreto reforzado es menor la contracción por secado que en elementos de concreto simple y la diferencia depende de la cantidad de refuerzo. El acero de refuerzo restringe, pero no previene, la contracción por secado (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004).

3.1.7. Durabilidad de los pavimentos rígidos

Como ya se ha mencionado anteriormente, la superficie de rodadura de un pavimento rígido está constituida por concreto hidráulico, el cual de forma general se dice que es un material muy durable.

Anteriormente existía la idea de que "el concreto resistente es concreto durable", las únicas consideraciones especiales eran los efectos de la alternancia de congelación y deshielo y algunas formas de ataque químico. Ahora se sabe que, para muchas condiciones de exposición de las estructuras de concreto, ambas propiedades, resistencia y durabilidad, se han de considerar explícitamente en la etapa de diseño.

Se define como durabilidad del concreto a la habilidad del concreto hidráulico en resistir durante un tiempo determinado (vida útil) la acción ambiental, ataque químico, abrasión, corrosión del acero de refuerzo o cualquier otro proceso de deterioro, manteniendo sus



propiedades de ingeniería: forma original, condición de servicio y propiedades mecánicas (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004).

El comité ACI 201 la define como la capacidad para resistir a la acción del tiempo, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro; es decir, el concreto durable retendrá su forma original, su calidad y su servicio, cuando se exponga a su medio ambiente (Metha & Monteiro, 2013).

La durabilidad del concreto depende de manera importante de la facilidad con la cual los fluidos, tanto líquidos como gases, pueden entrar en el concreto y moverse a través de él (como un flujo a través de un medio poroso); a esto se le llama comúnmente “permeabilidad” del concreto (Neville A. , 2013).

Puesto que la resistencia y la permeabilidad están relacionadas una con la otra a través de la porosidad capilar, como una primera aproximación, los factores que influyen en la resistencia del concreto también influyen en la permeabilidad. Una reducción en el volumen de huecos capilares grandes (> 100 nm) en la matriz de la pasta de cemento, reducirá la permeabilidad. Esto deberá ser posible utilizando una relación agua/cemento baja, un contenido adecuado de cemento y una adecuada compactación y condiciones de curado. Igualmente, son medidas necesarias una atención adecuada al tamaño del agregado y a la granulometría, a las deformaciones térmicas y por retracción por secado y evitar una carga prematura o excesiva, para reducir la incidencia del microagrietamiento en la zona de transición, que parece ser la causa principal de la alta permeabilidad del concreto en la práctica (Metha & Monteiro, 2013).

Debe tenerse bien clara la idea que una durabilidad inadecuada se manifiesta en sí misma por el deterioro, que puede ser el producto ya sea de factores externos o de causas internas dentro del concreto mismo. Las acciones pueden ser físicas, químicas o mecánicas.

3.1.7.1. Clasificación de las causas del deterioro del concreto por baja durabilidad

Las causas físicas del deterioro incluyen los efectos de las altas temperatura o de las diferencias de expansión térmica del agregado y de la pasta de cemento endurecida. Una



causa importante de daño en pavimentos de concreto hidráulico, es la congelación y deshielo alternadas y la acción asociada de sales para descongelar. Mehta y Gerwick (Mehta & Gerwick, 1982) agruparon las causas físicas del deterioro del concreto (figura 15) en dos categorías:

- ✚ Desgaste de la superficie o pérdida de masa debida a la abrasión; erosión y cavitación
- ✚ Agrietamiento debido a la temperatura normal y a los gradientes de humedad, las presiones de cristalización de sales en los poros, la carga estructural y la exposición a temperaturas extremas como el congelamiento o el fuego.

Igualmente, los autores agruparon las causas químicas del deterioro en tres categorías:

- ✚ Hidrólisis de los componentes de la pasta de cemento por agua suave;
- ✚ Reacciones por cambio de cationes entre los fluidos agresivos y la pasta de cemento;
- ✚ Reacciones que conducen a la formación de productos expansivos, tales como el ataque por sulfatos, la expansión álcali-agregado y la corrosión del acero en el concreto.

Es necesario nuevamente enfatizar que la distinción entre causas físicas y químicas es puramente arbitraria. Un ejemplo de ello, la pérdida de masa por desgaste de la superficie y el agrietamiento incrementan la permeabilidad del concreto, la que así se convierte en la causa principal de uno o más procesos de deterioro químico.

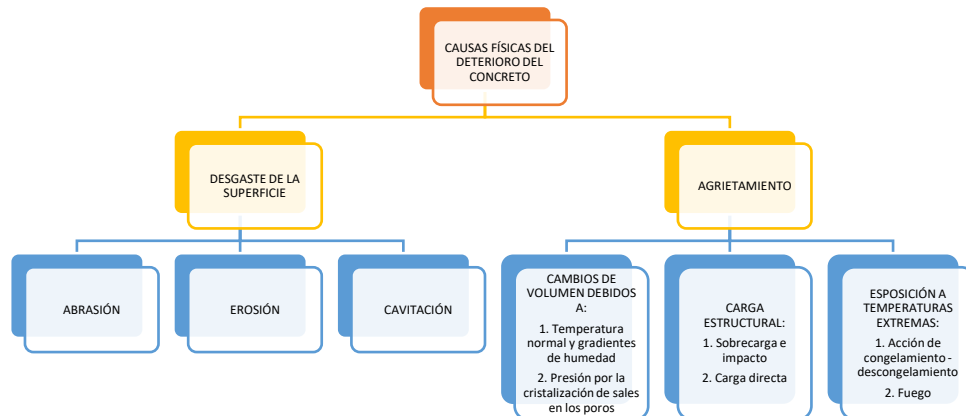


Figura 15. Causas físicas del deterioro del concreto.

En cuanto a las medidas adicionales para mejorar la durabilidad del concreto ante la abrasión o la erosión, el uso de aditivos minerales, presentan posibilidades interesantes. Además de causar una reducción sustancial en la porosidad del concreto después del curado húmedo, el concreto fresco que contiene aditivos minerales es menos propenso al sangrado (Metha & Monteiro, 2013).

3.2. El Concreto Hidráulico

El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento portland y agua, une los agregados, normalmente arena y grava, creando una masa similar a una roca. Esto ocurre por el endurecimiento de la pasta en consecuencia de la reacción química del cemento con el agua (figura 16). Otros materiales cementantes y adiciones minerales se pueden incluir en la pasta (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004).

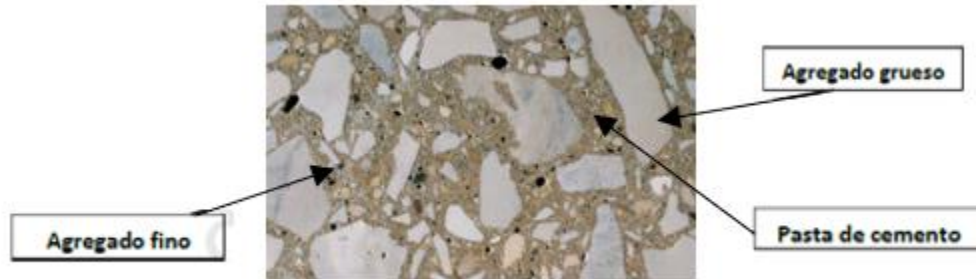


Figura 16. Estructura del concreto. Fuente: propia.

La pasta se compone de materiales cementantes, agua y aire atrapado o aire incluido. La pasta constituye aproximadamente del 25% hasta 40% del volumen total del concreto. El volumen absoluto del cemento está normalmente entre 7% y 15% y el volumen del agua está entre 14% y 21%. El contenido de aire atrapado varía del 4% hasta 8% del volumen.

Como los agregados constituyen aproximadamente del 60% al 75% del volumen total del concreto, su selección es muy importante. Los agregados deben componerse de partículas con resistencia mecánica adecuada y con resistencia a las condiciones de exposición y no deben contener materiales que puedan causar deterioro del concreto (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004).

3.2.1. Tipos de concreto

Con base en su peso unitario el concreto se puede clasificar en tres grandes categorías. El concreto que contiene arena natural y grava o agregados de roca triturada, que pesa aproximadamente $2,400 \text{ kg/m}^3$, es conocido como concreto de peso normal y es el concreto más comúnmente empleado para propósitos estructurales.

Para aplicaciones en donde se desea una relación más alta de resistencia contra peso, es posible reducir el peso unitario del concreto usando ciertos agregados naturales que tienen una densidad de masa más baja. El término concreto ligero se utiliza para un concreto que pesa menos de $1,800 \text{ kg/m}^3$.

Por otra parte, el concreto pesado, es un concreto producido con agregados de alta densidad y pesa en general más de $3,200 \text{ kg/m}^3$.



También, se puede dividir el concreto en tres categorías generales basadas en su resistencia a la compresión:

- ✚ Concreto de baja resistencia: menos de 20 MPa (204 kgf/cm²).
- ✚ Concreto de resistencia moderada: de 20 a 40 MPa (204 a 408 kgf/cm²).
- ✚ Concreto de alta resistencia: más de 40 MPa (408 kgf/cm²).

El concreto de resistencia moderada es un concreto ordinario o normal, que se utiliza en la mayor parte de los trabajos estructurales. El concreto de alta resistencia se utiliza para aplicaciones especiales (Metha & Monteiro, 2013).

3.2.2. Componentes del concreto

3.2.2.1. *Cemento*

El cemento puede describirse como un material con propiedades tanto adhesivas como cohesivas, las cuales le dan la capacidad de aglutinar fragmentos minerales para formar un todo compacto.

Para la construcción, el cemento se restringe a materiales aglutinantes utilizados con piedras, arena, ladrillos, bloques de construcción, etc. Los cementos que se utilizan en la fabricación del concreto tienen la propiedad de fraguar y endurecer en contacto con el agua o sumergidos en ella, en virtud de su reacción química, por lo que se les da el nombre de cementos hidráulicos (Neville A. , 2013).

3.2.2.2. *Agregados*

Según la norma mexicana NMX-C-122-ONNCCE, los agregados son materiales de naturaleza pétreo que pueden proceder de minas, de bancos de extracción, de la trituración de elementos de concreto o también resultantes de un proceso industrial que, al ser mezclados con cementantes, permiten según el caso la elaboración de concretos y morteros.

Los agregados le proporcionan el cuerpo al concreto, proporcionan resistencia y estabilidad volumétrica. Anteriormente, los agregados fueron considerados como materiales químicamente inertes, pero ahora se ha reconocido que algunos de los agregados son



químicamente activos y ciertos agregados muestran enlaces químicos en la interfaz del agregado y la pasta de cemento.

El sólo hecho de que los agregados ocupen del 60 al 75 % del volumen del concreto (70% a 85% de la masa), su impacto en diversas características y propiedades del concreto es, sin duda, considerable. Para saber más sobre el concreto es muy importante que se aprenda más acerca de los agregados que constituyen el mayor volumen del concreto. La profundidad y el alcance de los estudios que se requieren para entender sus efectos variables y su influencia en las propiedades del concreto no pueden ser subestimados (Shetty M. , 2005).

En la mezcla de concreto, se conocen dos tipos de agregados pétreos, los agregados finos que generalmente consisten en arena natural o piedra triturada con la mayoría de sus partículas menores que 5 mm (0.2 in) y agregados gruesos que consisten en una o en la combinación de gravas o piedras trituradas con partículas predominantemente mayores de 5 mm y generalmente entre 9.5 mm y 37.5 mm (3/8 y 1 1/2 in) (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004).

Los agregados naturales normalmente se excavan o dragan de la mina, del río, del lago o del lecho marino. La piedra triturada se produce triturando la roca de cantera, roca redondeada, guijarros o gravas grandes. La fuente de materiales debe ser localizada a una distancia razonable del sitio de trabajo y para su selección hay que tener presente que sus propiedades difieren considerablemente de una a otra. Cada una puede variar en la mineralogía de sus componentes o de las condiciones físicas de sus partículas, tales como, la distribución de tamaños, la forma y la textura (Instituto del Concreto, 1997).

3.2.2.2.1. Influencia de los agregados pétreos en el comportamiento del concreto

El esfuerzo que el concreto puede resistir como material compuesto está determinado principalmente, por las características del mortero (mezcla de cemento, arena y agua), de los agregados gruesos y de la interfase entre estos dos componentes.

Cuando se trata de influir en las propiedades del concreto fresco, los agregados juegan un papel importante, como se puede observar al presentarse una buena consistencia y



manejabilidad de la mezcla que se obtiene con la combinación de índices bajos de absorción y un coeficiente bueno de forma, en donde las partículas son aproximadamente redondas.

En el agregado fino hay dos elementos que deben ser considerados, por un lado, el módulo de finura (MF), y por el otro la continuidad en los tamaños. Cuando existe la condición de que el módulo de finura es menor a 2.2 (arena fina), puede ocurrir que los concretos sean pastosos y que haya mayores consumos de cemento y agua para una resistencia determinada, y también una mayor probabilidad que ocurran agrietamientos de tipo contracción por secado. En el agregado grueso un contenido excesivo de materiales finos puede provocar problemas similares.

A lo referido a la influencia que tiene el agregado pétreo sobre las propiedades del concreto endurecido, estudios revelan que la roca triturada produce una adherencia superior comparado con la grava de canto rodado. Una propiedad de los agregados que resulta ser de vital importancia es la densidad, ya que si se emplea un material con una buena densidad (≥ 2.25) el concreto resultante podría ser mayor o igualmente denso, lo cual tendrá una influencia directa sobre el peso volumétrico y la resistencia a la compresión de este.

Un porcentaje máximo en volumen de agregados, sobre todo gruesos, tiene un efecto positivo tanto en su resistencia, como en sus características de flujo plástico, contracción por secado y permeabilidad, hecho que se presenta debido a que la pasta de cemento endurecido constituye el elemento más débil en lo que se refiere a las propiedades antes citadas (Chan Yam, Solis Carcaño, & Moreno, 2003).

3.2.2.3. Agua

En el concreto hidráulico prácticamente cualquier agua natural que sea potable y no presente fuerte sabor u olor se puede usar como agua de mezcla para el preparo del concreto. Sin embargo, también se pueden emplear en concreto algunas aguas que no se consideran potables (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004).

El agua es un ingrediente fundamental en la elaboración de concreto debido a que desempeña una función importante en estado fresco y endurecido. Generalmente se hace referencia a su papel en cuanto a la cantidad para proveer una relación agua/cemento acorde con las

necesidades de trabajabilidad y resistencia, pero es evidente que, para usarla en el lavado de agregados, en la preparación de la mezcla o durante el curado del concreto, no solamente su cantidad es importante, sino también su calidad física y química. Por consiguiente, existen normas de la calidad del agua para empleo en concreto, en los diferentes países del mundo. En México la norma NMX-C-122-ONNCCE regula la calidad del agua, mientras que en EE. UU. la ASTM-C-94 hace lo propio.

Emplear agua en la mezcla de concreto con un exceso de impurezas no sólo puede afectar el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, sino también puede causar eflorescencias, manchado, corrosión del refuerzo, inestabilidad del volumen y reducción de la durabilidad (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004).

3.2.2.3.1. Influencia de la relación agua/cemento en el comportamiento del concreto

La resistencia del concreto, en condiciones de curado en agua a una temperatura prescrita, depende de dos factores: de la relación agua/cemento y el grado de compactación. Cuando un concreto está totalmente compactado (concreto endurecido con 1% de vacíos de aire), su resistencia es inversamente proporcional a la relación agua/cemento. Dicha relación, fue establecida por Duff Abrams en 1919, la cual establecía que la resistencia es igual a:

$$f_c = \frac{K_1}{K_2^{w/c}}$$

Donde w/c representa la relación agua/cemento de la mezcla, mientras que K_1 y K_2 son constantes empíricas. Esta ley de Abrams relaciona la resistencia del concreto con los volúmenes de agua y cemento (Neville A. , 2013).

En la relación agua/cemento, establecida por Duff Abrams, la importancia del agua resulta de gran magnitud, ya que al combinar este material con el cemento surgen una gran cantidad de propiedades del material final, en donde usualmente conforme más agua se adicione a la mezcla, aumentará su fluidez y, por lo tanto, su trabajabilidad y plasticidad, lo cual presenta grandes beneficios para la mano de obra; no obstante, también comienza a disminuir la resistencia debido al mayor volumen de espacios creados por el agua libre (figura 17).

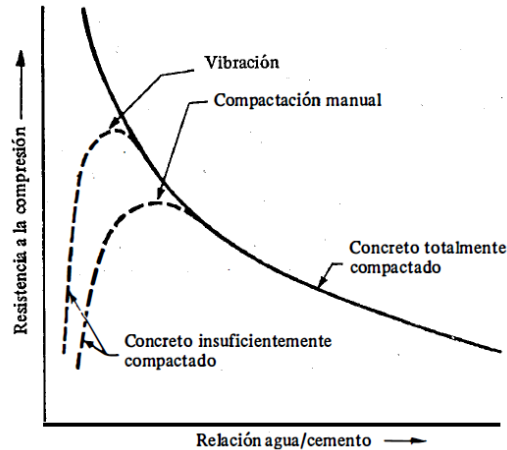


Figura 17. Comparación entre resistencia y relación agua/cemento del concreto. Fuente: Neville, 2013.

Es entonces que, a partir de la ley de Abrams, se establece que, a mayor cantidad de agua en la mezcla, mayor será la relación agua/cemento; mientras que, su resistencia disminuirá. Tal efecto parte de la relación inversa entre la porosidad y la resistencia que existe en cualquier material sólido, por lo que lógicamente los huecos son perjudiciales en el concreto.

Para un volumen dado de cemento, la pasta con el mayor contenido de agua tendrá el mayor volumen total de espacio disponible, pero después de la hidratación completa, todas las pastas contendrán la misma cantidad de productos sólidos resultantes de tal proceso, por lo que la pasta con el mayor espacio total termina en un correspondiente mayor volumen de huecos capilares.

Estos espacios huecos se atan entre sí, creando la llamada porosidad. Frecuentemente, los poros crean unas quebraduras finísimas dentro del concreto, debilitándolo. Los poros que están entretrejidos e interconectados, permiten así el pasaje lento del agua a través del concreto. Cuanto más denso el concreto, más apretados los poros y menos agua pueden pasar a través de ellos.

La estructura de la porosidad en el concreto influye fuertemente en su actuar. La porosidad determina no sólo la resistencia a compresión del concreto, sino también la durabilidad del concreto; es decir, las proporciones a las que los agentes agresivos pueden entrar en la masa y causar destrucción (Guevara, Hidalgo, Pizarro, Rojas, & Segura, 2012).



3.2.3. Propiedades principales del concreto fresco

En una mezcla de concreto, al integrar los materiales antes mencionados y eventualmente aditivos, se dice que se ha obtenido concreto fresco o concreto recién mezclado cuya principal propiedad es la de ser plástica o semifluida y generalmente capaz de ser moldeado a mano (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004).

La norma NMX-C-155-ONNCCE-2014 define al concreto hidráulico en estado fresco como la etapa inicial del proceso de fraguado del concreto durante la cual presenta una consistencia que permite realizar las operaciones de transporte, colocación, compactación y acabado. A continuación, se describen las propiedades que debe cumplir un concreto fresco, después de ser mezclados todos sus componentes.

3.2.3.1. Trabajabilidad

La facilidad de colocación, consolidación y acabado del concreto fresco y el grado que resiste a la segregación se llama trabajabilidad (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004). La norma ASTM C125 define a la trabajabilidad como “la propiedad que determina el esfuerzo requerido para manipular una cantidad de concreto acabado de mezclar con una pérdida mínima de homogeneidad”; mientras que el ACI la define como: “aquella propiedad del concreto o mortero acabado de mezclar que determina la facilidad y homogeneidad con las cuales se puede mezclar, colocar, compactar y acabar”.

Los factores que influyen en la trabajabilidad del concreto son:

1. El método y la duración del transporte
2. La cantidad y características de los materiales cementantes
3. La consistencia del concreto (asentamiento en cono de Abrams o revenimiento)
4. Tamaño, forma y textura superficial de los agregados finos y gruesos
5. Aire incluido (aire incorporado)
6. Cantidad de agua o contenido de humedad
7. Temperatura del concreto y del aire
8. Aditivos incorporados a la mezcla

La consistencia es considerada una buena indicación de trabajabilidad. En el caso del concreto, la consistencia algunas veces se utiliza para significar el grado de humedad; dentro de ciertos límites, los concretos húmedos son más trabajables que los secos, pero los concretos de la misma consistencia pueden variar en trabajabilidad (Neville A. , 2013).

El asentamiento en cono de Abrams o medición del revenimiento se usa como medida de la consistencia y de la humedad del concreto. La norma ASTM C143 describe la metodología de prueba y consiste en tener un cono truncado de 30 cm de alto que se coloca sobre una superficie lisa, con la abertura menor en la parte superior, y se llena con concreto en tres capas. Cada capa se apisona 25 veces con una varilla de acero normal de 15 mm de diámetro, redondeada en el extremo, y la superficie superior se recorta por medio de un movimiento de aserrar y rodar de la varilla de apisonar.

Inmediatamente después del llenado, el cono se levanta lentamente, y el concreto sin soporte ahora se va a revenir. La disminución en la altura del concreto revenido se llama revenimiento y se mide hasta el punto más alto (figura 18).



Figura 18. Medición del revenimiento en el concreto fresco. Fuente: Reyna, C., 2016.

3.2.3.2. Segregación

Para un concreto trabajable, la ausencia de segregación es esencial para que una mezcla tenga una compactación completa. Se puede definir a la segregación como la separación de los constituyentes de una mezcla heterogénea de modo que su distribución ya no es uniforme. En el caso del concreto, las diferencias en el tamaño de las partículas y en el peso específico de los constituyentes de la mezcla son las causas primarias de la segregación, pero su efecto puede controlarse con la selección de una granulometría adecuada y con el cuidado en el manejo de la mezcla.



La segregación es difícil de medir cuantitativamente, pero se descubre fácilmente cuando el concreto se maneja en obra en alguna de las dos formas siguientes:

1. Las partículas más gruesas tienden a separarse porque tienden a moverse a lo largo de una pendiente o a asentarse más que las partículas más finas.
2. Esta ocurre particularmente en mezclas húmedas, manifestándose con la separación de lechada (cemento más agua) de la mezcla.

Con algunas granulometrías, al utilizar una mezcla pobre puede ocurrir el primer tipo de segregación si la mezcla está demasiado seca; la adición de agua mejoraría la cohesión de la mezcla, pero cuando la mezcla llegara a estar demasiado húmeda, sucedería la segregación del segundo tipo (Neville A. , 2013).

3.2.3.3. *Temperatura*

En el concreto hidráulico, la temperatura temprana que se presenta al elaborar la mezcla tiene una gran influencia en la resistencia que puede alcanzar dicho material.

Las pruebas del laboratorio del concreto fresco suelen ejecutarse a una temperatura controlada, normalmente constante y anteriormente se realizaban principalmente en climas templados. La temperatura normalizada escogida estaba generalmente en la región de 18 a 21 °C, de modo que mucha de la información básica respecto a las propiedades del concreto, tanto fresco como endurecido, se basa sobre el comportamiento del material a estas temperaturas.

En la práctica, sin embargo, el concreto se mezcla a una amplia gama de temperaturas y también permanece en servicio a diferentes temperaturas.

Una elevación de temperatura durante la colocación y el fraguado, aumenta la resistencia muy temprana del concreto, afectando adversamente la resistencia desde alrededor de los 7 días en adelante. Esto se debe a que una rápida hidratación inicial parece formar productos de una estructura física más pobre, probablemente más porosa, de modo que una proporción de los poros siempre permanecerán sin llenar (Neville A. , 2013).



Existen documentos, normas y más referencias sobre tecnología del concreto, en donde especifican una temperatura máxima del concreto en estado fresco de 32 °C, tomando esta temperatura como regla general para especificaciones en limitaciones y proyectos.

La norma ASTM C94 menciona que la temperatura máxima del concreto fresco no debe exceder los 32 °C, mientras que el ACI limita la temperatura máxima del concreto a 35 °C en el momento de la colocación.

De igual manera, en el caso de la normativa mexicana, la SCT recomienda que, para la calidad del concreto hidráulico (N-CMT-2-02-005), la temperatura máxima del concreto, en climas cálidos, en el momento de la producción y colocación no exceder de 32 °C.

3.2.3.4. *Potencial de hidrogeno (pH)*

El pH es una unidad de medida que sirve para establecer el nivel de acidez o alcalinidad de una sustancia, más específicamente el pH mide la cantidad de iones de hidrógeno que contiene una solución determinada.

En el caso del concreto reforzado, el pH de la solución del poro es importante en términos de durabilidad (Moreno, 2006); puesto que, tener valores ideales de pH elevados de 12 a 13, mantiene protegido o pasivo el acero de refuerzo, ante procesos como la carbonatación. Es así que, el concreto tiene la propiedad de ser alcalino o básico por naturaleza.

Los hidróxidos de calcio, sodio y potasio, disueltos en el componente acuoso del concreto, son los responsables del elevado pH que actúa como protector del acero, y es cuando el CO₂ penetra en el concreto que se produce una reacción entre los hidróxidos de la fase líquida intersticial y los compuestos hidratados del cemento, de tal manera que cuando todo el Ca(OH)₂, Na(OH) y K(OH) presentes en los poros han sido carbonatados, el pH empieza a decrecer, dando como resultado un medio ácido que produce un constante y progresivo efecto corrosivo en el acero.

Cuando el valor del pH llega a niveles inferiores a 9,5 la alcalinidad del concreto ya no es suficiente para mantener pasiva la capa de óxido protectora de las armaduras de acero (Ycaza, 2011).



3.2.3.5. *Hidratación, tiempo de fraguado y endurecimiento*

La calidad de unión (adhesión) de la pasta de cemento portland se debe a las reacciones químicas entre el cemento y el agua, conocidas como hidratación.

Los dos silicatos de calcio (tricálcico y dicálcico), los cuales constituyen 75% del peso del cemento portland, reaccionan con el agua para formar dos compuestos: hidróxido de calcio y silicato de calcio hidratado (hidrato de silicato de calcio). Este último es, sin duda, el más importante compuesto del concreto. Las propiedades de ingeniería del concreto: fraguado y endurecimiento, resistencia y estabilidad dimensional; dependen principalmente del silicato de calcio hidratado, resultando éste el corazón del concreto.

El conocimiento de la velocidad de reacción entre el cemento y el agua es importante porque determina el tiempo de fraguado y endurecimiento. La reacción inicial debe ser suficientemente lenta para que haya tiempo para transportar y colocar el concreto. Una vez que el concreto ha sido colocado y acabado, es deseable un endurecimiento rápido (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004).

3.2.4. Propiedades principales del concreto endurecido

El concreto hidráulico en estado endurecido es la condición en la que el concreto hidráulico es capaz de resistir las acciones para las cuales fue especificado (NMX-C-155-ONNCCE, 2014).

La propiedad más valiosa del concreto endurecido es su resistencia mecánica, aunque como se ha mencionado anteriormente, en muchos casos otras características tales como la durabilidad o la permeabilidad pueden tener mayor importancia. Sin embargo, la resistencia mecánica es tomada como un parámetro general de calidad, por estar directamente relacionada con la estructura de la pasta de cemento hidratada, además de cumplir como un elemento vital para el diseño de la mezcla de concreto, para el diseño estructural y por especificada como un valor con fines de cumplimiento.

La resistencia mecánica o esfuerzo del concreto o cualquier otro material, se entiende como la capacidad de soportar las cargas por unidad de área que en él se apliquen (Askeland, 2016). Para que el concreto desarrolle la resistencia indicada en los planos de falla, deberá prepararse



con cemento, agregados pétreos y agua de buena calidad; además, deberá cumplir con las propiedades del concreto en estado fresco que anteriormente se han mencionado.

3.2.4.1. *Comportamiento a compresión*

La resistencia a compresión se puede definir como la medida máxima de la resistencia a carga axial de especímenes de concreto. Normalmente se expresa en kilogramos por centímetros cuadrados (kg/cm^2), Megapascales (MPa) o en libras por pulgadas cuadradas (lb/pulg^2 o psi) a una edad de 28 días. La resistencia a los 7 días normalmente se estima como 75% de la resistencia a los 28 días y las resistencias a los 56 y 90 días son aproximadamente 10% y 15% mayores que la resistencia a los 28 días.

La resistencia a compresión es una propiedad principalmente física y frecuentemente usada en los cálculos para diseño de puentes, edificios y otras estructuras. Los concretos para uso general tienen una resistencia a compresión entre 200 y 400 kg/cm^2 . Concretos con resistencias a compresión de 700 y 1400 kg/cm^2 han sido empleados en puentes especiales y edificios altos (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004).

El comportamiento a compresión del concreto se mide con la prueba de resistencia a la compresión, en parte porque es fácil de practicarse, y en parte porque la mayoría de las características deseables del concreto están relacionadas cualitativamente con su resistencia; pero fundamentalmente por la importancia intrínseca de la resistencia a la compresión del concreto en el diseño estructural (Neville A. , 2013).

3.2.4.2. *Comportamiento a tracción*

El concreto hidráulico normalmente no se diseña para resistir comportamiento a tensión o tracción directa, sin embargo, es valioso el conocimiento de este comportamiento para estimar la carga bajo la cual se desarrollará el agrietamiento. Aunque los problemas de agrietamiento se presentan cuando se desarrolla tensión diagonal por medio de esfuerzos cortantes, el caso más frecuente de agrietamiento es causado por contracción restringida y por gradientes de temperatura.

La resistencia a la tensión (resistencia a tracción, resistencia en tracción) directa del concreto es aproximadamente de 8% a 12% de la resistencia a compresión y se estima normalmente



como siendo de 0.4 a 0.7 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en Megapascuales (1.3 a 2.2 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en kg/cm^2) (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004).

3.2.4.3. *Comportamiento a flexión*

El comportamiento a flexión del concreto endurecido es también conocido como módulo de ruptura y como ya se mencionó en el apartado 3.1.5. se observa directamente en la losa de pavimentos rígidos sobre el terreno. La resistencia a compresión, se puede usar como un índice de resistencia a flexión, una vez que la relación empírica entre ambas ha sido establecida para los materiales y los tamaños de los elementos involucrados. La resistencia a flexión de concretos de peso normal es normalmente de 0.7 a 0.8 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en Megapascuales (1.99 a 2.65 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en kg/cm^2) (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004).

3.3. Fibras como refuerzo en el concreto

Un concreto se puede considerar de altas prestaciones cuando presenta una mejora considerable en su comportamiento ante determinadas exigencias, como puede ser un aumento en su resistencia, ductilidad, durabilidad, etc., conseguida por la adición de componentes no ordinarios o elementos avanzados distintos a los que convencionalmente constituyen un concreto.

Concretos requeridos para altas resistencias que presentan una mayor fragilidad, un mayor contenido en cemento y en porcentaje de finos (aumento de la contracción), así como, una mayor sensibilidad al desprendimiento, han propiciado el refuerzo de concretos mediante la adición de fibras de distintos tipos (naturales, artificiales y sintéticas) durante la elaboración de la mezcla de estos, conocidos comúnmente como concreto reforzado con fibra (FRC) (Baldenebro López, 2015).

El concreto reforzado con fibra (FRC) tiene el potencial de exhibir una mayor resistencia y ductilidad en comparación con el concreto sin refuerzo de fibras, que fallan inmediatamente después de la formación de una sola fisura (Aguilera Bazán & Diestra Lujan, 2017). En el caso de pavimentos de concreto, estos son propensos a la fisuración, el uso de fibras aparece

como una de las mejores alternativas técnico-económicas para mejorar su desempeño mecánico.

Pero no solamente se utiliza el refuerzo con fibras en concretos que presenten una alta resistencia, sino en cualquier otro concreto susceptible de presentar problemas por fisuración o microfisuración (debido al exceso de reacción, fatiga, etc.), o que haya de presentar una durabilidad elevada. Así, se suele emplear concretos de resistencia normal, o incluso de baja resistencia, reforzado con fibras en la fabricación de pavimentos, soleras, vigas, columnas, etc. (M. Barreda, 2000).

Al agregar fibras al concreto se incrementa en forma importante la tenacidad del material; es decir, el concreto reforzado con fibras es capaz de soportar cargas bajo flexión o deformaciones mucho mayores que aquellas a las cuales aparece el primer agrietamiento en la matriz (Dávila Mercado, 2010).

Ahora bien, se conoce como fibra a un filamento de origen natural, artificial o sintético, apto para ser hilado y tejido, que generalmente presenta gran finura y buena flexibilidad. La norma ASTM C 1116, que trata sobre Terminología para Cemento y Concreto, define las fibras como: "Filamentos finos y elongados en forma de haz, malla o trenza, de algún material natural o manufacturado que pueda ser distribuido a través de una mezcla de concreto fresco."

En el caso de las fibras que refuerzan al concreto, el efecto es similar a la introducción de unas microarmaduras homogéneamente distribuidas en la matriz del concreto (figura 19) que cosen las fisuras originadas por tensión.

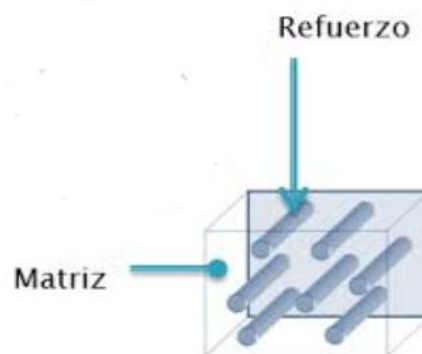


Figura 19. Matriz reforzada con fibras en forma de microarmaduras. Fuente: propia.

Cuando se requiere que las fibras actúen en las microfisuras, se debe adicionar un gran número de fibras y su diámetro debe ser pequeño. La trabajabilidad del material conduce a preferir fibras cortas. Por otro lado, para controlar las macrofisuras las fibras deben ser lo suficientemente largas para estar adecuadamente ancladas en la matriz, si bien por requerimientos de trabajabilidad las fibras largas deben ser usadas en menores proporciones que las cortas.

Las fibras son estructuras unidimensionales, largas y delgadas cuya longitud es muy superior a su diámetro y están orientadas a lo largo de un solo eje. Pueden tener formas muy variadas: rectas, onduladas, corrugadas, con extremos conformados, dentadas y otras. Las secciones también pueden ser muy variadas: circulares, cuadradas, rectangulares y planas (figura 20).

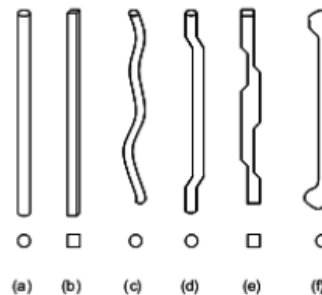


Figura 20. Forma de las fibras: a) sección circular, b) sección rectangular, c) ondulada, d) extremos conformados, e) extractos fundidos y f) extremos ensanchados. Fuente: Francisco J. Baldenebro, 2015.

El contenido de fibras de un CRF tradicional oscila entre el 0.25 y el 2% respecto del volumen del concreto (Naaman, 2000). Las longitudes típicas de las fibras son de 20 mm a 150 mm y espesores variables de 0.005 mm a 0.75 mm (López, 2015).

H. Kosmatka menciona en su libro “Diseño y Control de Mezclas de Concreto” (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004) que las fibras se adicionan al concreto normalmente en bajos volúmenes (frecuentemente menos del 1%) y han mostrado eficiencia en el control de la fisuración por retracción (Shah & Weiss, Abril 1998). Además de que es habitual que las fibras se distribuyan de manera aleatoria por la sección transversal del concreto.

Por otro lado, el empleo de fibras de algunos tipos de polímeros no aumenta tan significativamente la propiedad de resistencia a la compresión, sin embargo, presenta otras series de ventajas con respecto al uso de fibras de acero como puede ser la ausencia total de corrosión, mejora de la ductilidad, el menor peso y la mejora de sus propiedades de fractura (Arabi Nawwaf Saoud AL Qadi, 2011).

En general, las fibras no alteran considerablemente la contracción libre del concreto, pero, si son empleadas en cantidades adecuadas, pueden aumentar la resistencia al agrietamiento (fisuración) y disminuir la abertura de las fisuras (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004)

3.3.1. Clasificación de las fibras

Una primera clasificación de las fibras sintéticas de acuerdo con su diámetro presenta dos grupos: microfibras y macrofibras (Antillón, 2016).

- ✚ Microfibras: normalmente son fibras de plástico, polipropileno, polietileno o nylon, que ayudan a reducir la segregación de la mezcla de concreto y de esta manera reducir las fisuras originadas en la retracción plástica, es decir en estado fresco. Presentan una longitud que oscila entre los 12 y los 75 mm y un diámetro menor a 0.25 mm.
- ✚ Macrofibras: Generalmente son de materiales como acero, vidrio, materiales sintéticos o naturales, los cuales se utilizan como refuerzo distribuido en todo el espesor del elemento y orientado en cualquier dirección. Las fibras incrementan la tenacidad del concreto y agregan al material la capacidad de carga posterior al agrietamiento. Su diámetro oscila entre los 0.25 mm y 1.5 mm con longitudes variables entre 13 mm y 70 mm.

De manera básica también las fibras se clasifican en tres grupos: fibras naturales, artificiales y sintéticas (figura 21). Las fibras naturales son las derivadas de la naturaleza, pueden ser de procedencia animal, vegetal o mineral y su principal ventaja de estas fibras es que con ellas se pueden obtener materiales a un bajo costo.

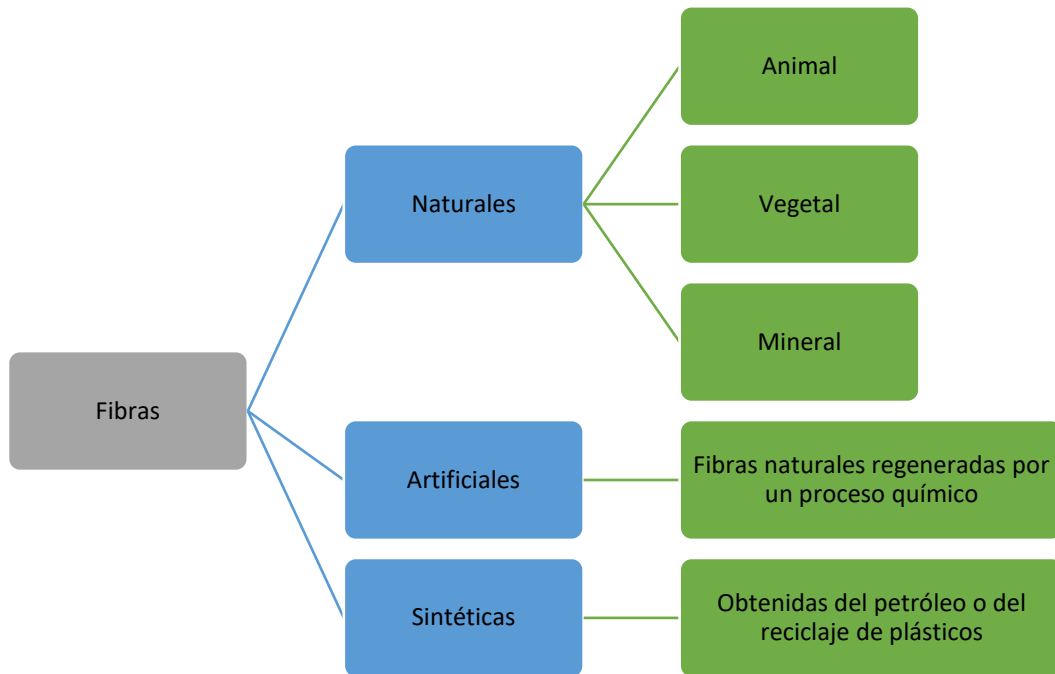


Figura 21. Clasificación de las fibras

Dentro de las fibras naturales, las de origen mineral actualmente se aplican como refuerzo del concreto, ejemplos de ellas son las fibras de acero y las fibras de carbono, sin embargo, la principal desventaja que presentan es su alto costo.

Las fibras artificiales son producidas a partir de elementos naturales, pero han sido regeneradas mediante algún proceso químico, por lo que son más uniformes y resistentes a roturas y al fuego. Ejemplo de éstas son el acetato, la viscosa, el rayón y la seda artificial.

Las limitaciones que las fibras naturales y artificiales presentan dieron origen a las fibras sintéticas, cuyo objetivo principal ha sido mejorar las características de las fibras naturales. Este tipo de fibras se obtienen a partir de resinas derivadas del petróleo, pero recientemente se han empezado a obtener del reciclaje de productos plásticos, con lo que su popularidad ha crecido en los últimos años, ejemplos de ellas son el acrílico, el nylon, poliestireno, polipropileno, etc.

De las fibras sintéticas, el nylon es el que presenta un mejor desempeño, ya que por su textura es más fácil de manejar que las demás fibras. Sin embargo, aunque estas fibras han sido eficientes y presentan algunas mejoras tienen una desventaja, la cual consiste en una

tendencia a la segregación de las superficies. Con el desarrollo de las fibras sintéticas, la industria de la construcción se ha visto beneficiada con su incorporación para mejorar las mezclas de concreto (Santos Cortés, 2006).

3.3.2. Polietileno Tereftalato (PET)

Fue producido por primera vez en 1941 por los científicos británicos John Rex Whinfield y James Tennant Dickson, quienes lo patentaron como polímero para la fabricación de fibras. A partir de 1946 se empezó a utilizar industrialmente como fibra y su uso textil ha perseguido hasta el presente. En 1952 se comenzó a emplear en forma de láminas delgadas para envasar alimentos, pero la aplicación que le significó su principal mercado fue el de envases rígidos, en la década de los 70's (Brent, 2006).

El PET se considera un termoplástico (reciclable) de alta calidad que se identifica con el número uno o las siglas PET o PETE, rodeado por tres flechas en el fondo de los envases según el sistema de identificación de la SPI (Sociedad de Industrias de Plástico, por sus siglas en inglés).



Figura 22. Símbolo del PET. Fuente: ARPET.

Químicamente pertenece a la familia de los poliésteres, cuya principal característica es la presencia de enlaces tipo éster ($-\text{CO}-\text{O}-$). El PET se constituye por grupos etileno y tereftalato, según se muestra en la figura 23 (Ávila Córdoba, Martínez Barrera, Barrera Díaz, Ureña Nuñez, & Loza Yáñez, 2015).

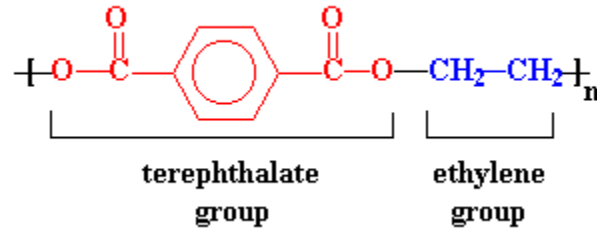


Figura 23. Representación química del PET. Fuente: Departamento de Ciencia de polímeros.

El polímero termoplástico se fabrica con derivados del petróleo, gas y aire (sus proporciones aproximadas son 64%, 23% y 13% respectivamente). Por un lado se extrae paraxileno del petróleo y se oxida con el aire para generar ácido tereftálico (PTA) y por otro lado el gas natural provee el etileno que después es oxidado con aire para formar etilenglicol (EG), posteriormente se produce la polimerización del etilenglicol con ácido tereftálico produciéndose de esta forma el Tereftalato de Polietileno (Sánchez, 2001).

El PET también puede obtenerse del dimetiltereftalato y el etilenglicol, los cuales al polimerizar en presencia de catalizadores y aditivos nos producen los distintos grados de PET.

El PET se comercializa en cuatro líneas de producción:

- a) PET textil como filamento continuo o fibra cortada, para la fabricación de prendas de vestir, telas tejidas, cuerdas, cinturones de seguridad, hilos de costura, refuerzos de llanta y mangueras. Su alta resistencia química permite fabricar cerdas de brocha y cepillos industriales.
- b) PET grado película: para medios magnéticos (películas fotográficas, de rayos X), eléctrico (audio, capacitores, contactos), industrial y artes gráficas (estampado en caliente).
- c) PET para envases, que ofrece características favorables en cuanto a resistencia contra agentes químicos, elevada transparencia, ligereza, menores costos de fabricación y comodidad en su manejo.
- d) PET para lámina, disponible en grado amorfo, espumado y cristalino. El amorfo provee claridad, alta pureza y resistencia tanto a bajas temperaturas como a hidrocarburos clorados y capacidad de esterilización por óxido de etileno; el espumado presenta resistencia a temperaturas simultáneas de horneado-congelación.

Otros grados de PET y que en la actualidad están cobrando relevancia, son los reciclados (denominados RPET), algunos de los cuales provienen de desperdicios industriales o post consumo que se regeneran por tratamientos fisicoquímicos (Ávila Córdoba, Martínez Barrera, Barrera Díaz, Ureña Nuñez, & Loza Yáñez, 2015).

De manera general, el Tereftalato de Polietileno es un material duro, fuerte y de dimensiones estables. Presenta buenas propiedades de barrera al oxígeno, dióxido de carbono y es la fundamental razón por la que es utilizado en botellas para agua mineral y gaseosas. El PET puede adquirir dos tipos diferentes de estructuras: el polímero amorfo (transparente – grado botella) y el semicristalino (opaco y blanco) (Ramírez, 2011).

El PET (amorfo-transparente), que se emplea en la elaboración de envases para bebidas, es transparente con una densidad de 1.33 g/cm^3 . Presenta menor rigidez y dureza que el polímero semicristalino, pero una mejor resistencia al impacto; el rango continuo va de $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ a $60 \text{ }^\circ\text{C}$, y en ausencia de aire alcanza $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Se cristaliza por encima de los $90 \text{ }^\circ\text{C}$ (con cierta turbidez). Es resistente a hidrocarburos y tiene buenas propiedades de barrera frente a gases no polares como O_2 y CO_2 (Ávila Córdoba, Martínez Barrera, Barrera Díaz, Ureña Nuñez, & Loza Yáñez, 2015).

Otras características del PET son (Quintero Blandón & Mahecha Rico, 2016):

- Es transparente y cristalino, aunque admite algunos colorantes.
- Es liviano, permite que una botella pese 20 veces menos que su contenido.
- Es impermeable.
- Es inerte (al contenido).
- Es resistente a esfuerzos permanentes y al desgaste, ya que presenta alta rigidez y dureza.
- Presenta una alta resistencia química y buenas propiedades térmicas: posee una indeformabilidad al calor.
- Su superficie puede ser barnizar.
- Buena estabilidad a la intemperie.



- Alta resistencia al plegado y baja absorción de humedad que lo hacen muy adecuado para la fabricación de fibras.
- Es un material que puede ser reciclado.
- Es un material particularmente resistente a la biodegradación debido a su alta cristalinidad y a la naturaleza aromática de sus moléculas, por lo cual se le considera no biodegradable.
- Puede ser degradado mediante un proceso químico por el cual se modifica su estructura molecular para reutilizar el material para un nuevo producto u obtención de combustibles.

3.3.3. Reciclaje del PET

La Ley General de Residuos Sólidos define el reciclaje como toda actividad que permite reaprovechar un residuo sólido mediante un proceso de transformación para cumplir su fin inicial u otros fines.

En términos técnicos el reciclaje consiste en la obtención de materiales a partir de desechos, mediante el empleo de procesos fisicoquímicos o mecánicos, donde se somete un producto ya utilizado a un tratamiento total o parcial, para obtener una materia prima o producto diferente, introduciéndolo de nuevo en el ciclo de vida útil (Ávila Córdoba, Martínez Barrera, Barrera Díaz, Ureña Nuñez, & Loza Yáñez, 2015).

En 1988 el Instituto de Botellas plásticas de la Sociedad de la Industria del plástico de Estados Unidos (SPI) propuso crear un sistema de codificación que tiene como finalidad auxiliar a empresas recicladoras en la selección de plásticos de acuerdo con el tipo de resina con que están fabricadas. El símbolo es un triángulo de flechas que en el centro muestra el dígito del código, debajo se incluyen las letras símbolo de la resina (Pardavé, 2004).

Los plásticos más comunes, que se identifican por SPI, son siete (figura 24), los cuales por sus características diferentes exigen generalmente un reciclaje por separado.



Figura 24. Clasificación de los plásticos según el SPI. Fuente: Expertos en reciclaje [En línea]. Como identificar los plásticos. Recuperado de <https://cruplas.cl/como-identificar-los-plasticos/>

A continuación, en la tabla 3, se presenta el significado de cada una de las categorías para clasificar a los plásticos:

Tabla 3. Códigos de la Sociedad de la Industria del Plástico.

Código	Siglas	Nombre
1	PET	Tereftalato de Polietileno
2	PEAD (HDPE)	Polietileno de alta densidad
3	PVC	Policloruro de vinilo
4	PEBD (LDPE)	Polietileno de baja densidad
5	PP	Polipropileno
6	PS	Poliestireno
7	Otros	Resinas epoxicas

Son muchas las experiencias de recuperación de plásticos que hace años se desarrollan tanto en México como en otros países del mundo. Por ejemplo, bolsas, mangueras, baldes, cerdas para cepillos y escobas, hilo para la industria textil, láminas, útiles escolares, muebles, piezas de máquinas y vehículos, relleno asfáltico y bancos (Santos Cortés, 2006).

En el caso del reciclaje del Tereftalato de Polietileno (PET) existen tres procesos para utilizar los envases de PET cuando su vida útil acaba: un reciclado mecánico, un reciclado químico o un reciclado energético (usándolos como fuente de energía).

El **reciclaje mecánico** es un proceso físico mediante el cual el plástico PET post-consumo o el industrial (scrap) es recuperado, lo que nos permite poder volver a utilizarlo. Esta técnica radica en la trituración, segregación y desinfección de los envases.

El producto resultante de este proceso es llamado escamas (flakes) y es destinado directamente a la elaboración de productos de inyección o extrusión.

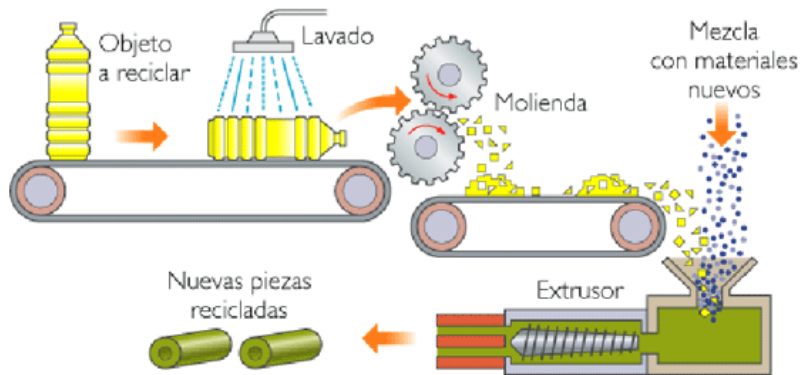


Figura 25. Proceso del Reciclaje Mecánico del PET. Fuente: Sitio web <https://recicla3dplabs.wordpress.com/tratamiento/>.

El **reciclaje químico** busca la descomposición del polímero (plásticos) para la obtención de monómeros, tras un nuevo proceso de polimerización y así obtener nuevos materiales poliméricos aptos para estar en contacto con alimentos.

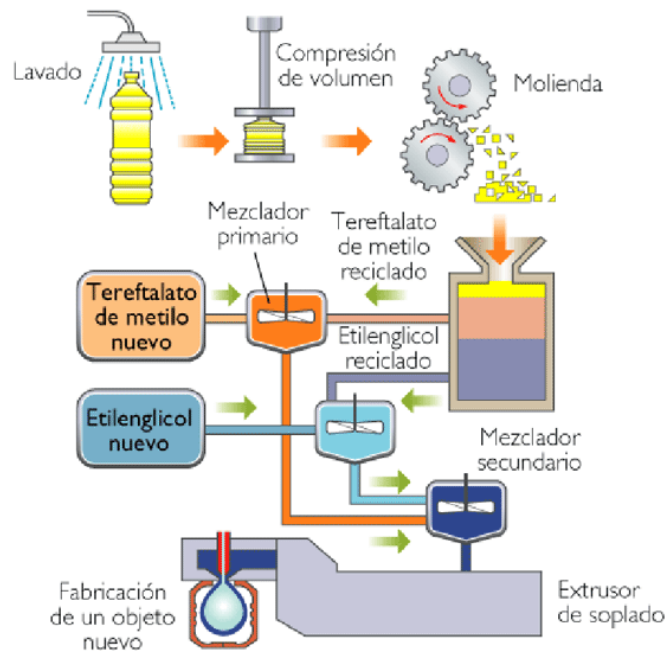


Figura 26. Proceso del reciclaje químico. Fuente: Sitio web <https://recicla3dplabs.wordpress.com/tratamiento/>.

El **método energético** implica quemar los materiales para usar ese calor en otros procesos o incluso para producir electricidad. El residuo plástico se traslada hacia una incineradora para ser quemado, produciendo energía calorífica la cual puede ser utilizada en las casas o en fábricas, o también para producir electricidad.

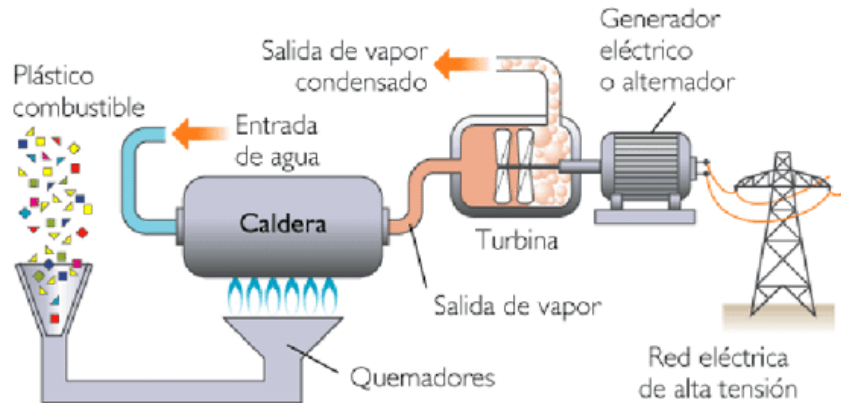


Figura 27. Proceso del reciclaje energético del PET. Fuente: Sitio web: <https://recicla3dplabs.wordpress.com/tratamiento/>.

Por otro lado, México ocupa el primer lugar de reciclaje de botellas de PET en el continente americano y desde hace más de una década, la industria de la recuperación de envases y botellas trabaja en programas de “educación ambiental” para que la sociedad tome consciencia sobre el destino de los desechos de aquello que consume. En el caso del PET, países como Estado Unidos solo recuperan 30% de ese material, eso es 3 de cada 10 botellas. México está en los niveles de recuperación de la Unión Europea, es decir, recupera 6 de cada 10 botellas (figura 28).

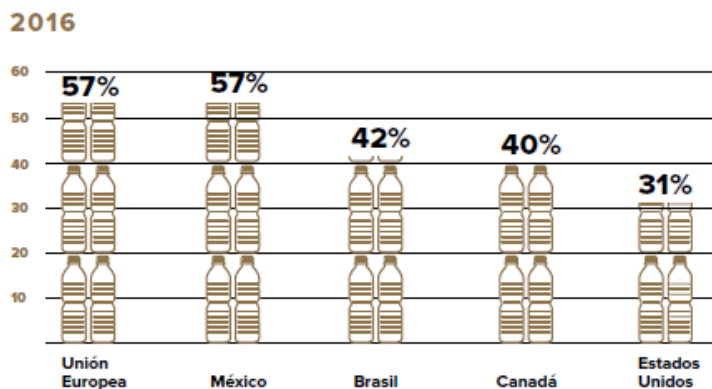


Figura 28. Acopio y reciclaje de PET en México, 2016. Fuente: ECOCE, 2017.

La asociación encargada del reciclaje en México es conocida como ECOCE, la cual es una asociación civil ambiental creada y auspiciada por la industria de productos de consumo, líder en sustentabilidad ambiental y encargada de la recuperación y manejo adecuado de los residuos de envases y empaques.

El sitio de ECOCE explica que reciclaje es transformar materiales recuperados de residuos post-industriales, post-comerciales y post-consumo, en materias primas con las propiedades físico-químicas muy similares a las originales a través de distintos procesos para fabricar nuevos materiales o productos.

Los usos más habituales a los que se destina la fibra reciclada mecánicamente de PET son los mostrados en la siguiente figura.

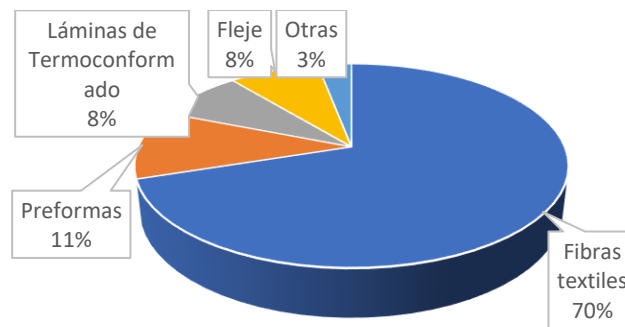


Figura 29. Usos de la fibra de PET reciclado. Fuente: Reciclaje de residuos industriales. Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora (Elías, 2009).

En comparación con el PET virgen, cuando el PET es reciclado en forma mecánica se modifican sus propiedades, como la disminución de la masa molecular y el incremento del ácido carboxílico y del acetaldehído. Sus propiedades mecánicas cambian, el RPET presenta elevada resistencia al impacto, mayor elongación a la rotura, pero menor módulo de Young y es más dúctil como resultado de las diferencias en la cristalinidad. En la tabla 4 se presentan las propiedades de los dos tipos de PET (Awaja & Pavel, 2005).

Tabla 4. Propiedades físicas del PET virgen y del PET reciclado.

PROPIEDAD (unidad)	PET virgen	PET reciclado
Módulo de Young (MPa)	1890	1630
Resistencia a la rotura (MPa)	47	24



Resistencia al impacto (Jm-1)	12	20
Viscosidad intrínseca (dlg-1)	0.72 - 0.84	0.46 - 0.76
Temperatura de fusión (°C)	244 - 254	247 - 253
Masa molecular (g mol-1)	81600	58400

El reciclaje, además de eliminar los residuos de plástico, utiliza hasta sólo 30% de la energía necesaria para la producción de la resina virgen (Baldenebro López, 2015).

3.3.4. Fibras de PET

A la par con el desarrollo en la industria de los plásticos, se han fabricado una gran cantidad de fibras de polietileno, polivinilo, nylon, polipropileno, etc., que al incorporarse al concreto se consigue mejorar sus propiedades al igual que sucedía con las de acero, y además presentan ventajas como un menor peso que las fibras de acero y sobre todo la ausencia de corrosión en este tipo de fibras.

De lo anterior, queda entonces establecido que al no existir riesgo de corrosión en fibras de polímeros y al presentar una mejora sobre la resistencia a la tracción que representa la adición de fibras al concreto, se obtendrán buenos resultados sobre la retracción y una mejora en la durabilidad de concretos reforzados con este tipo de fibras.

Estudios en mezclas y compuestos han utilizado productos comerciales como el polietileno y el poliestireno, los cuales se originan del PET reciclado. También, los materiales compuestos reforzados con fibra de polímeros han sido muy atractivos debido a su facilidad de fabricación, economía y a sus propiedades mecánicas satisfactorias.

Con la adición de fibras de refuerzo a base de polímeros en una matriz de concreto se obtiene una disminución de la fisuración y un mayor control que se puede ejercer sobre la misma, conlleva así a una mejora en el comportamiento a flexión de los elementos de concreto estructural. Esta mejora experimentada se manifiesta a través de una mayor rigidez a flexión debido a la menor fisuración y, consecuentemente, a una menor deformación por flexión (flecha). Otras mejoras sobre el comportamiento a flexión es la mayor ductilidad de las estructuras de concreto reforzado con este tipo de fibras (Quintero Blandón & Mahecha Rico, 2016).



3.4. Adiciones minerales en el concreto

Dentro del grupo de las adiciones minerales en el concreto se considerará las puzolanas, las cenizas, las escorias de alto horno finamente molidas y las microsílices (Gomero Cervantes, 2006). Todas ellas, cuando son usadas junto con el cemento portland contribuyen para la mejoría de las propiedades del concreto endurecido, debido a sus propiedades hidráulicas o puzolánicas o ambas.

La puzolana es una ceniza volcánica producida por erupción, entre 1600 y 1500 AC, y está compuesta por cerca de 80% de vidrios volcánicos.

La Recomendación ACI 116R define a las puzolanas como "Un material silicio o silicio y aluminoso, el cual en sí mismo posee pequeño o ningún valor cementante pero que cuando está finamente dividido y en la presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura normal para formar compuestos que poseen propiedades cementantes".

La puzolana reacciona químicamente con el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del cemento portland para formar silicato de calcio hidratado y otros compuestos cementantes.

La mayoría de los materiales cementantes o adiciones minerales son subproductos de procesos industriales, cuyo empleo sensato no es sólo desde el punto de vista de ayudar al medio ambiente y conservar la energía, sino también por los beneficios que ofrecen al concreto. Las adiciones minerales se adicionan a la mezcla de concreto como parte del sistema cementante y se pueden utilizar como adición o como sustitución parcial del cemento portland, dependiendo de las propiedades de los materiales y de los efectos esperados en el concreto. Se usan para mejorar una propiedad particular del concreto, tal como la resistencia a la reactividad álcali-agregado (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004).

Las propiedades que el concreto pueda adquirir en estado fresco y endurecido con la incorporación de las adiciones minerales, dependerá totalmente de la cantidad y tipo de adición mineral con la que se trabaje, sin embargo, se ha encontrado en una gran cantidad de



estudios que las adiciones minerales ayudan a que el concreto presenta una mejoraría en su durabilidad en comparación con concretos sin materiales cementantes.

El concreto que contiene adiciones minerales puede presentar un acabado de manera igual o más fácil que el concreto sin cementantes adicionados. De igual forma, las adiciones ayudan a la bombeabilidad del concreto.

Respecto a la resistencia del concreto, las adiciones minerales contribuyen al aumento o disminución de éste en comparación con la resistencia del concreto que contenga sólo cemento portland. La resistencia a tracción, a flexión, a torsión y de adherencia se afectan de la misma manera que la resistencia a compresión (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004).

Respecto a la permeabilidad y absorción del concreto, en general las adiciones minerales las reduce. Las pruebas demuestran que la permeabilidad de los concretos disminuye a medida que la cantidad de material cementante hidratado aumenta y a medida que la relación agua-material cementante disminuye.

De manera general, las adiciones minerales pueden ser empleada para:

- a) Aumentar el cementante y corregir una deficiencia en el concreto en mezclas pobres de partículas muy finas, al influir en el comportamiento de la pasta fresca de la misma manera que el cemento, evitando problemas de trabajabilidad y acabado.
- b) Evitar el empleo de cemento adicional al requerido para obtener una resistencia determinada.
- c) Contribuir al desarrollo de la resistencia del concreto, permitiendo utilizar menos cemento para alcanzar una resistencia determinada.
- d) Modificar las propiedades de la pasta fresca y las del concreto endurecido y, al mismo tiempo, reducir el costo de la unidad cúbica de concreto.
- e) Mejorar las deficiencias del concreto por la incorporación de un aditivo mineral sin alterar las proporciones relativas de los otros ingredientes.
- f) Mejorar la calidad final del concreto, con incremento en sus propiedades en los estados fresco y endurecido, sin incrementos en los requisitos de cemento y agua.



En el caso de la cantidad requerida de las adiciones minerales en la mezcla de concreto, generalmente, el volumen de adición empleado puede ser alto si el concreto es diseñado para optimas propiedades y máxima economía. Las adiciones deben ser consideradas como parte del material cementante y no como un reemplazo del cemento.

Las adiciones se emplean en rangos que varían del 7% al 35% en peso del medio cementante total del concreto, dependiendo del uso y especificaciones, sin embargo, siempre deben prepararse mezclas de prueba y ensayarse para verificar la validez de las proporciones del concreto seleccionadas que contienen aditivo (Gomero Cervantes, 2006).

3.4.1. Cenizas

Adiciones minerales como lo son las cenizas, empleadas en esta investigación, son definidas por el ACI 116R como: el residuo finamente dividido resultante de la combustión del carbón, ya sea este en polvo o en trozos, el cual es transportado desde su almacenamiento por los gases de combustión.

Las cenizas poseen grado variable de valor cementante y, cuando el concreto que contiene cenizas es adecuadamente curado, los productos de la reacción química de las cenizas llenan los espacios entre las partículas de cemento hidratadas, disminuyendo la permeabilidad del concreto al agua y los agresivos químicos.

La lenta reacción de las cenizas limita la cantidad de generación de calor inicial y disminuye la elevación de temperatura en estructuras masivas. En la actualidad las cenizas son empleadas en el concreto por muchas razones, incluyendo reducción en los costos, mejoras en la trabajabilidad, reducción en la elevación de temperatura, mejora en la resistencia a los sulfatos, reducción en la expansión debida a la reacción álcali-agregado, y contribución a la durabilidad y resistencia del concreto endurecido (Gomero Cervantes, 2006).

3.4.2. Ceniza de Bagazo de Caña (CBC)

Dentro de los materiales puzolánicos o adiciones minerales, existen aquellos materiales que son subproducto de alguna actividad agroindustrial en la cual se lleva a cabo el quemado de algún material orgánico para la obtención de energía calorífica. Uno de los subproductos obtenidos es la ceniza de bagazo de caña (CBC), a partir del proceso de elaboración de azúcar.

El proceso de producción del endulzante involucra primeramente la cosecha de la caña; posteriormente, se trasladan los tallos a los ingenios donde pasan por un molido para la extracción del jugo. Al residuo de los tallos exprimidos (fibra) se le conoce como “bagazo” y se emplea como combustible para proveer de energía eléctrica y calorífica a las fábricas (figura 30).

Una vez obtenido el néctar, se traslada por procesos de clarificación, evaporación, cocción, centrifugado y refinado, logrando con ello, el azúcar de caña que se conoce comúnmente (Pesquera, 2018).



Figura 30. Obtención del bagazo de caña en el proceso de obtención de azúcar. Fuente: propia.

La ceniza de bagazo de caña se obtiene en el fondo de las calderas y es considerado un material puzolánico o mineral, por algunos autores, por presentar en su composición gran cantidad de sílice (SiO_2), generalmente en cantidades superiores al 60% en masa (Cordeiro, Toledo, Tavares, & Fairbairn, 2008). Entre sus características principales se destacan las partículas ultrafinas las cuales se obtienen por procesos de molienda. Entre las aplicaciones de la CBC, se encuentran la obtención de materiales vitrocerámicos, como material adsorbente para la eliminación de iones cromo (III), como material de cama para la crianza de pollos de engorde en piso y como adición al cemento Portland, entre otros (Vidal, Torres, & González, 2014).

4. Desarrollo experimental

4.1. Planificación del estudio experimental

Con el objetivo de evaluar mezclas de concreto modificadas con PET reciclado y ceniza de bagazo de caña (CBC); su influencia en el módulo de ruptura y en la durabilidad de pavimentos rígidos, se planteó un estudio experimental desarrollado en el laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana, el cual consistió de tres etapas:

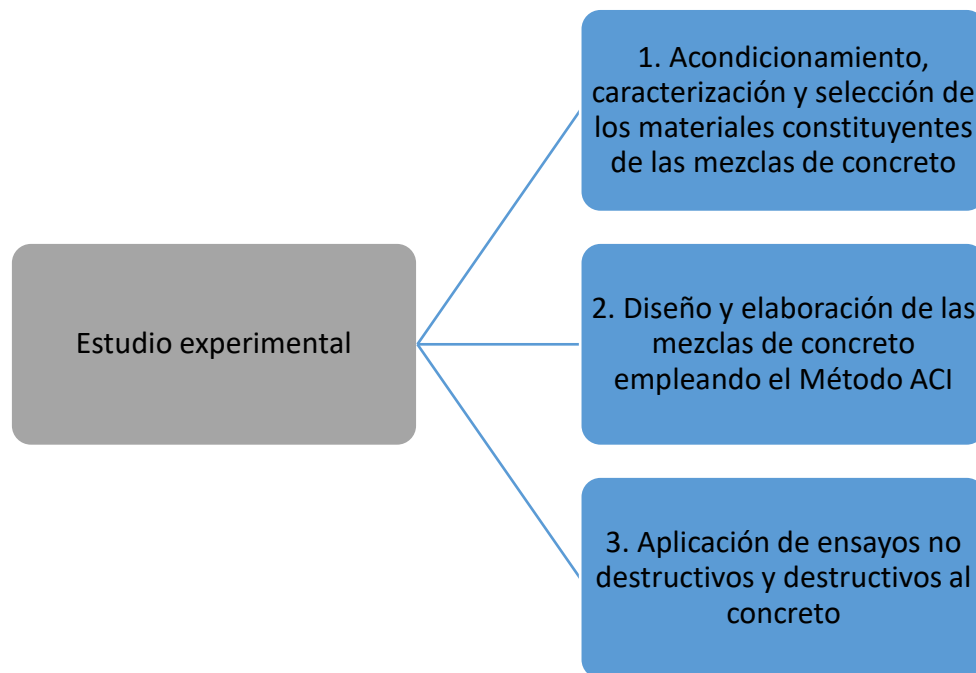


Figura 31. Etapas experimentales de la investigación.

En el interior de las tres etapas experimentales, existe la aplicación de métodos de ensayos los cuales cumplieron con las especificaciones y metodologías marcadas por las normativas ASTM y NMX vigentes.

Para llevar a cabo el estudio experimental se definieron las variables de los materiales que serán adicionados a las mezclas de concreto, de acuerdo con lo investigado en la bibliografía y en estudios previos. De este modo, se determinaron los porcentajes a emplear de PET reciclado y de la adición mineral.

En la tabla 5 se relacionan las variables referentes al concreto, al material de PET reciclado y a la adición mineral, para cada una de las mezclas de concreto a elaborar.

Tabla 5. Variables de las mezclas de concreto.

CONCEPTO	Mezcla de concreto				
	M-C	PR-0.8	PM-0.8	PR0.8+CBC15	PM0.8+CBC15
Tipo de PET reciclado	-	Fibra de PET	PET molido	Fibra de PET	PET molido
Tipo de adición mineral	-	-	-	Ceniza de Bagazo de Caña (CBC)	Ceniza de Bagazo de Caña (CBC)
Cantidad de PET reciclado	-	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%
Cantidad de adición mineral	-	-	-	15%	15%

No se consideran como variables los materiales constituyentes de un concreto convencional (cemento, agregados pétreos y agua) puesto que los tipos y cantidades de material son las mismas para todas las mezclas de concreto.

Por cada una de las mezclas de concreto, ya definidas anteriormente, se elaboraron especímenes con procesos de mezclado y de curado como lo marca la normativa vigente y en diferentes tamaños sobre la base de los requisitos de prueba; para someterlos a ensayos de calidad a la edad de 7, 28, 90 y 180 días.

4.2. Acondicionamiento, caracterización y selección de los materiales constituyentes de las mezclas de concreto en estudio

4.2.1. Caracterización del Cemento

Por la calidad del cemento se entiende el grupo de propiedades que caracterizan el cemento en su uso final como aglomerante hidráulico en concretos, utilizados para actividades de construcción. Dichas propiedades son importantes para la fabricación, la ejecución y la vida útil de los productos de concreto para los cuales el cemento es utilizado (Propiedades de los cementos, 2017).

El cemento que se utilizó en esta investigación fue un cemento clasificado por la norma NMX-C-414-ONNCCE-2017 (NMX-C-414-ONNCCE, 2017) como un cemento CPC 30R

RS (figura 32) de la marca Tolteca, es decir, un Cemento Portland Compuesto de clase 30, con resistencia especificada a 3 días de 30 MPa y resistente a los sulfatos.



Figura 32. Saco de cemento CPC 30R RS marca TOLTECA. Fuente: Cementos CEMEX.

El cemento Portland resistente a los sulfatos, es aquel que presenta un bajo contenido de Aluminato tricálcico (C_3A). En los Estados Unidos de Norteamérica, el cemento resistente a los sulfatos se conoce como tipo V y está incluido en la norma ASTM C 150, 2019.

En el caso de la presente investigación, se empleó este tipo de cemento por la facilidad de obtención de los sacos dentro de la ciudad de Morelia. Para el caso específico del cemento CPC 30R RS, se desarrolló únicamente el método de ensayo que describe la norma mexicana (NMX-C-152-ONNCCE, 2015), para la determinación de la densidad del cemento.

4.2.1.1. Densidad del cemento.

El peso específico del cemento (densidad, peso volumétrico, peso unitario, masa unitaria) se define como el peso de cemento por unidad de volumen de los sólidos o partículas, excluyéndose el aire entre las partículas. La masa específica se presenta en megagramos por metro cúbico o gramos por centímetro cúbico (el valor numérico es el mismo en las dos unidades). El peso específico del cemento varía de 3.10 hasta 3.25, con promedio de 3.15 Mg/m^3 (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004).

El peso específico del cemento no es una indicación de la calidad del cemento, su principal uso es en los cálculos de las proporciones y diseño de las mezclas de concreto (Notas de Concreto, 2017).

El análisis de la densidad del cemento se realizó en una muestra representativa tal y como se obtiene después de la fabricación y comercialización del cemento.



Equipo empleado:

- Muestra representativa de cemento
- Matraz de Le Chatelier
- Balanza con aproximación a los 0.1 gramos
- Queroseno libre de agua o nafta con una gravedad específica mayor de 0.73 g/ml a $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ o petróleo
- Un recipiente con agua
- Un termómetro

Procedimiento:

Para conocer la densidad del cemento se realizó la prueba de laboratorio, la cual consiste en que, conocido un peso de cemento, se calcula su volumen por medio de desplazamientos de líquido. Los pasos a seguir durante la prueba fueron los siguientes:

1. Se vertió el líquido (petróleo) no mezclable con agua en el frasco de Le Chatelier hasta un nivel entre 0 y 1 ml. Como resultado del ingreso de tales líquidos se formaron burbujas de aire y se presentó adherencia de estos líquidos a las paredes del frasco.
2. Se giró el frasco, sobre un círculo horizontal, sumergiendo la parte inferior del frasco en un baño de agua a la temperatura del líquido con la finalidad que se establezca un nivel líquido.
3. Se tomó la lectura en la parte inferior del menisco y se anotó como una lectura inicial del líquido.
4. Se pesaron alrededor de 64 gramos de cemento, con la finalidad de que, al verterlo en el frasco, el líquido alcance a sobre pasar las lecturas superiores a la esfera intermedia del frasco.
5. Se sujetó el frasco en forma vertical, se agregó el cemento muy lentamente de manera que el cemento fuera pasando al interior sin obstruirse.
6. Se colocó el tapón del frasco, se inclinó y se rodó horizontalmente de manera de lograr que saliera el aire atrapado en el cemento y que baje el que haya quedado en las paredes interiores.

7. Se sumergió nuevamente el frasco en el baño de agua, repitiendo el paso No. 2, para lograr que se estableciera nuevamente el nivel del líquido hasta lograr que fuera rápidamente la misma lectura.
8. Se tomó la lectura de la parte inferior del menisco, como una lectura final para los cálculos.

Cálculos de la prueba:

Partiendo de la masa del cemento de alrededor de 64 gramos y considerando como volumen del líquido desplazado a la diferencia de lectura final y lectura inicial, se tiene que el cálculo de la densidad del cemento es:

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa del cemento}}{\text{volumen del líquido desplazado}} = \frac{\text{alrededor de 64 gramos}}{L_f - L_i}$$

El valor resultante del cálculo queda representado en unidades de g/cm³.

Resultados:

El valor de la densidad del cemento obtenido en esta investigación se encuentra dentro del rango de valores investigados en la bibliografía.

Tabla 6. Valor de la densidad del cemento empleado en la investigación.

Cemento utilizado	Densidad obtenida (g/cm ³)
CPC 30R RS	3.10

4.2.2. Caracterización de los agregados pétreos (arena y grava)

Como ya se mencionó en el apartado 3.2.2., referente a los componentes del concreto, se entiende como agregados pétreos, al material conocido comúnmente como grava (agregado grueso) y arena (agregado fino), cuyas características físicas de estos, son de gran importancia en las propiedades que un concreto pueda adquirir, pues representan entre el 60% y el 75%, del volumen absoluto de todos los componentes de este.

El disponer de agregados pétreos de buena calidad, es siempre un beneficio para el diseño de mezclas de concreto, sin embargo, no siempre se tiene la disponibilidad de estos, ya que las

opciones para obtenerlos no siempre son las mejores y muchas veces hay que hacer uso de agregados provenientes de bancos de material cercanos a la zona de elaboración de las mezclas, de tal forma que, no causen un incremento del costo real del concreto.

En el caso de esta investigación, los agregados pétreos llevados al laboratorio para su caracterización, fueron obtenidos de tres distintos bancos de material ubicados cerca del municipio de Morelia; en donde en cada uno de ellos, se realizó un muestreo como lo marca la normativa (NMX-C-030-ONNCCE, 2004), se llevaron en sacos de rafia al laboratorio y se extendieron para secarlos ante los rayos del sol.

Los ensayos a desarrollarse, para caracterizar o conocer las propiedades físicas de los agregados pétreos, fueron llevados a cabo bajo una serie de normas tanto mexicanas como extranjeras, las cuales se relacionan en la siguiente tabla.

Tabla 7. Características, ensayos y normativa correspondiente a los agregados.

CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO	ENSAYO DE LABORATORIO	NORMA NMX	NORMA ASTM
Obtención de la muestra	Práctica estándar para el muestreo de agregados	NMX-C-030-ONNCCE-2004	ASTM D75-14
Cuarteo	Reducción de las muestras de agregados a tamaños requeridos de prueba	NMX-C-170-ONNCCE-2019	ASTM C702-18
Humedad actual	Contenido de agua por secado	NMX-C-166-ONNCCE-2018	ASTM C566-13
Masas volumétricas (MVSS y MVSV)	Método de prueba para la determinación de la masa volumétrica de los agregados	NMX-C-073-ONNCCE-2004	ASTM C29-17

Densidad y Absorción de la arena	Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado fino	NMX-C-165-ONNCCE-2014	ASTM C128-15
Densidad y absorción de la grava	Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado grueso	NMX-C-164-ONNCCE-2014	ASTM C127-15
No. de Colorimetría (agregado fino)	Determinación de impurezas orgánicas en el agregado fino	NMX-C-088-ONNCCE-1997	ASTM C40-16
Análisis granulométrico	Método de prueba para el análisis granulométrico de agregados para concreto	NMX-C-077-ONNCCE-1997	ASTM C136-14
Sedimentación (agregado fino)	Método de prueba para determinar el exceso de finos en el agregado fino	-	-
Abrasión (desgaste del agregado grueso)	Determinación de la resistencia a la degradación por abrasión de agregados gruesos usando la máquina de los Ángeles	M-MMP-2-02-032/18	ASTM C535-16

4.2.2.1. Agregado fino

El agregado fino es el material comúnmente conocido como arena que pasa por la criba con abertura de 4.75 mm (malla No. 4) y se retiene en la criba con abertura de 0.075 mm (malla No. 200) (NMX-C-111-ONNCCE, 2014).

El material inerte utilizado para la elaboración de concreto hidráulico fue una arena blanca de río de origen sedimentario, elegida a partir de un *estudio empírico* desarrollado en mezclas de mortero dentro del laboratorio.

Las arenas estudiadas en esta investigación fueron las siguientes:

1. Arena Negra (AN) proveniente del banco de material “San Bernabé”

El agregado fino caracterizado fue obtenido del banco de material llamado “San Bernabé” ubicado en la entrada a San Bernabé (figura 33) a 22.2 kilómetros, en dirección Oeste, de la localidad de Morelia. El tipo de propiedad es particular, el material obtenido es volcánico y el tratamiento que se le da a dicho material es trituración parcial y cribado; no requiere explosivos para la obtención del material y económicamente es un material aceptable.



Figura 33. Banco de material "San Bernabé". Fuente: Google Maps.

El agregado volcánico del banco “San Bernabé”, fue tomado de un depósito de material y llevado al sitio de estudio (figura 34) para realizarle los ensayos correspondientes de caracterización, identificándolo como una arena negra (AN).



Figura 34. Toma de muestra y secado en laboratorio de la arena negra del banco de material "San Bernabé". Fuente: propia.

2. Arena blanca (AB) y material de balastre (BL) provenientes del banco de material “El Coro”

El agregado fino caracterizado fue obtenido del banco de material llamado “El Coro” que está ubicado a un costado de la carretera Morelia – Zinapécuaro, justo antes de llegar a la localidad de José María Morelos (figura 35) perteneciente al municipio de Zinapécuaro del estado de Michoacán. El tipo de propiedad es particular, el material obtenido es de tipo sedimentario o de río y el tratamiento que se le da a dicho material es trituración parcial y cribado; no requiere explosivos para la obtención del material y económicamente es un material aceptable.

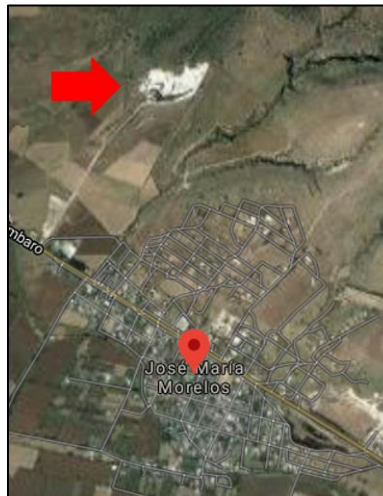


Figura 35. Banco de material "El Coro". Fuente: Google Maps.

Del banco de material “El Coro”, fueron muestreados dos distintos tipos de agregado fino: balastre y arena, ubicados dentro del banco en frentes de ataque distintos, se encostalaron, se identificaron como un material de balastre (BL) y como arena blanca (AB) y fueron llevados al laboratorio (figura 36) para realizarle los ensayos correspondientes de caracterización.

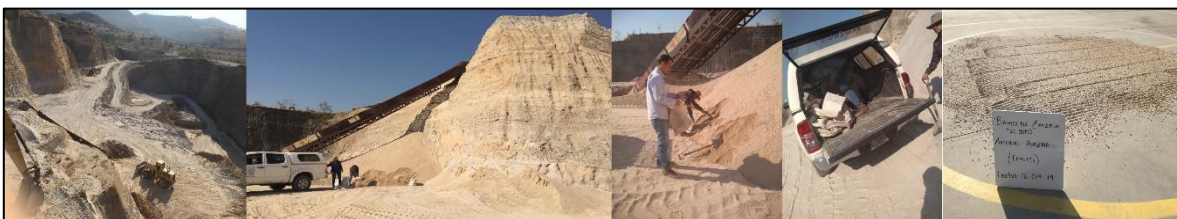


Figura 36. Toma de muestra y secado en laboratorio de la arena blanca y material de balastre del banco de material "El Coro". Fuente: propia.

3. Arena roja (AR) proveniente del banco de material “Janamuato”

El agregado fino caracterizado fue obtenido del banco de material de la localidad de Janamuato (figura 37), perteneciente al municipio de Puruándiro, Michoacán. El tipo de propiedad es particular, el material obtenido es volcánico de color rojo y el tratamiento que se le da a dicho material es trituración parcial y cribado.



Figura 37. Banco de material "Janamuato". Fuente: Google Maps.

El agregado volcánico del banco “Janamuato”, fue proporcionado por un particular, llevado al laboratorio encostalado y sellado (figura 38). A este material se le identifico como una arena roja (AR), para después realizarle los ensayos correspondientes de caracterización.

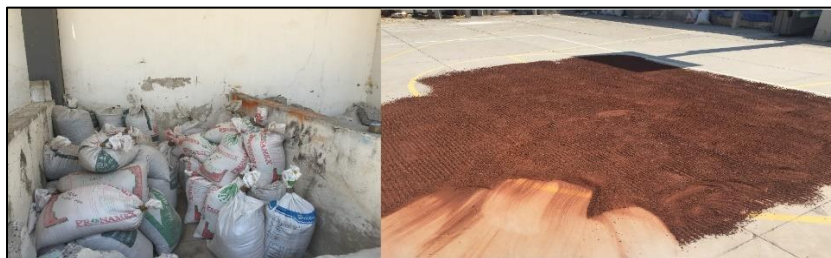


Figura 38. Arena del banco de material "Janamuato". Fuente: propia.

Una vez expuestas las diferentes arenas al sol, para quitarle la cantidad de agua que por naturaleza tienen los agregados, se realizaron todos los ensayos de caracterización que a continuación se presentaran, así como, la elaboración de mezclas de mortero para seleccionar



el agregado que presentara un mejor desempeño al agrietamiento por secado, tomando en cuenta las características físicas del material.

4.2.2.1.1. Cuarteo en las muestras de arena

Es primordial antes de realizar cualquier prueba, para conocer las diversas propiedades del agregado, obtener una muestra representativa del material a granel que se obtuvo directamente del banco de material. Para obtener esta muestra representativa se realiza el método de cuarteo.

“El cuarteo debe hacerse cuando el volumen es considerable y solo si se requiere una muestra más pequeña que sea representativa para su estudio” (NMX-C-030-ONNCCE, 2004).

Para realizar el cuarteo o reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo hasta el tamaño apropiado para cualquier prueba de caracterización, existen dos técnicas o métodos para minimizar las variaciones en características medibles entre la muestra probada y la muestra de campo (NMX-C-170-ONNCCE, 1997). Estos dos métodos se realizaron para las distintas arenas, como a continuación se describen.

Método “A” Cuarteo Mecánico

Equipo empleado:

- Cuarteador de muestras con 12 o más conductos
- Tres charolas grandes de lámina o receptáculos
- Una pala de boca recta
- Un Cucharón

Procedimiento:

1. Se tomó el material de dos cuartos opuestos de la muestra y se colocó en uno de los receptáculos, para después vaciar la arena sobre la parte superior del cuarteador mecánico (figura 39), procurando repartirla en toda la longitud del cuarteador, de tal forma que fluya por cada uno de los conductos cantidades aproximadamente iguales de material.



Figura 39. Cuarteo del agregado fino por el método “A”. Fuente: propia.

2. El material recibido en uno de los receptáculos se eliminó y se reintegró al saco de donde se extrajo.
3. Se volvió a introducir la porción de muestra, del receptáculo no eliminado, al cuarteador cuantas veces fue necesario, hasta reducir la muestra al tamaño requerido para las pruebas siguientes.

Método “B”, Cuarteo Manual

Equipo empleado:

- Una pala
- Un Cucharón de punta recta o cuchara de albañil
- Una Escoba

Procedimiento:

1. Se colocó la muestra original sobre un nivel de superficie limpio y duro (en el patio del laboratorio).
2. Se mezcló el material completamente, traspaleando toda la muestra en una pila cónica, depositando cada paleada sobre la anterior. Realizando este paso tres veces de un extremo a otro.
3. Se aplano la parte superior de la pila, ejerciendo presión sobre el vértice por medio de la pala.
4. Se dividió la masa aplanada en cuatro cuartos iguales, utilizando la pala, removiendo y eliminando dos de los cuartos diagonalmente opuestos, incluyendo todo el material fino recogido al barrer los espacios y dejando limpia la zona.



Figura 40. Cuarteo del agregado fino por el método "B". Fuente: propia.

Se emplearon los dos cuartos restantes para reducir más la muestra, por cualquiera de las dos técnicas de reducción de muestras, hasta el tamaño requerido para las siguientes pruebas de caracterización.

Resultados:

El cuarteo se realizó para las cuatro arenas en estudio, combinando los dos métodos: primeramente, realizando el método "B" (obteniendo dos cuartos de cada muestra) y después empleando el método "A" para reducir las muestras al tamaño deseado.

4.2.2.1.2. Masa Volumétrica seca y suelta (MVSS)

Se le considera masa volumétrica de los agregados, a la masa del material por unidad de volumen, siendo el volumen ocupado por el material de un recipiente especificado (NMX-C-073-ONNCCE, 2004).

El ensayo para la determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena consiste en conocer una masa por unidad de volumen del agregado cuando el acomodo de sus partículas es en forma libre y natural. Dicho ensayo se llevó a cabo siguiendo el procedimiento de la normativa correspondiente (NMX-C-073-ONNCCE-2004) y como a continuación se presenta.

Equipo empleado:

- Una muestra de arena completamente seca
- Un recipiente de masa y volumen conocido
- Una varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro
- Una báscula

- Una pala y un cucharón

Procedimiento:

1. Se vació la arena dentro del recipiente, dejándose caer a una altura de aproximadamente 5 centímetros, medida a partir de la arista superior del recipiente, distribuyendo uniformemente el material y llenando completamente el recipiente hasta colmarlo formando un cono.
2. Enseguida se enrasó el recipiente con la varilla y se limpió, asegurándose de retirar las partículas adheridas en las paredes exteriores procediendo a pesarlo (figura 41).



Figura 41. Enrase del agregado fino y determinación de la masa en el recipiente. Fuente: propia.

3. A la masa obtenida anteriormente se le restó la masa del recipiente para obtener la masa de la arena.

Cálculos de la prueba:

$$MVSS = \frac{M}{V}$$

Donde:

MVSS = Masa volumétrica seca y suelta (g/cm³).

M = Masa de la arena (gramos).

V = Volumen del recipiente (cm³).

Resultados:

El método de ensayo para determinar la masa volumétrica seca y suelta se realizó para cada una de las arenas, tomando dos muestras representativas de cada una de ellas mediante el cuarteo. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 8. Resultados de la Masa Volumétrica Seca y Suelta (MVSS) de las arenas.

Nombre de la arena	Muestra	Masa del recipiente (g)	Masa Total (g)	Masa de la arena (g)	Volumen del recipiente (cm ³)	MVSS (g/cm ³)
Arena Negra (AN)	1	1860	5580	3720	2785	1.336
	2	1860	5570	3710	2785	1.332
					PROMEDIO	1.334
Arena Blanca (AB)	1	1860	5320	3460	2785	1.242
	2	1860	5330	3470	2785	1.246
					PROMEDIO	1.244
Balastre (BL)	1	1860	5240	3380	2785	1.214
	2	1860	5240	3380	2785	1.214
					PROMEDIO	1.214
Arena Roja (AR)	1	1860	5070	3210	2785	1.153
	2	1860	5110	3250	2785	1.167
					PROMEDIO	1.160

4.2.2.1.3. Masa volumétrica seca y varillada (MVSV)

Como su nombre lo indica la determinación de la masa volumétrica seca y varillada se realiza una vez que exista un acomodo de las partículas, mediante la compactación (varillada) del agregado fino, dentro del mismo recipiente que se emplea para determinar la masa volumétrica seca y suelta.

El método de prueba que se siguió para determinar la MVSV se describe a continuación y se aplica a agregados que tengan un tamaño máximo nominal de 40 mm o menor (NMX-C-073-ONNCCE, 2004).

Equipo empleado:

- Una muestra de arena completamente seca
- Un recipiente de masa y volumen conocido
- Una varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro
- Una báscula
- Una pala y un cucharón

Procedimiento:

1. Se llenó el recipiente con arena a volteo, dejándola caer a una altura aproximada de 5 centímetros, en tres capas y dando a cada capa de arena 25 golpes con la varilla punta de bala distribuyéndolos en toda la superficie del material. Se tubo cuidado de que la varilla no penetrará en la capa anterior, al dar el número de golpes correspondientes a la siguiente capa.
2. Posterior al llenado y compactado de las capas, se enrasó el recipiente con la varilla punta de bala y se retiraron todas las partículas que hayan quedado adheridas a las paredes exteriores.
3. Después de haber realizado los pasos anteriores, se pesó el recipiente con el material y se le restó la masa del recipiente para así obtener la masa neta del material.

Cálculos de la prueba:

$$M.V.S.V. = \frac{M}{V}$$

Donde:

MVSV= Masa volumétrica seca y varillada (g/cm³)

M = Masa de la arena (gramos)

V = Volumen del recipiente (cm³)

Resultados:

El método de ensayo para determinar la masa volumétrica seca y varillada se realizó para cada una de las arenas, tomando dos muestras representativas de cada una de ellas mediante el cuarteo. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 9. Resultados de la Masa Volumétrica Seca y Varillada (MVSV) de las arenas.

Nombre de la arena	Muestra	Masa del recipiente (g)	Masa Total (g)	Masa de la arena (g)	Volumen del recipiente (cm ³)	MVSV (g/cm ³)
Arena Negra (AN)	1	1860	5890	4030	2785	1.447
	2	1860	5850	3990	2785	1.433



					PROMEDIO	1.440
Arena Blanca (AB)	1	1860	5640	3780	2785	1.357
	2	1860	5670	3810	2785	1.368
					PROMEDIO	1.363
Balastre (BL)	1	1860	5540	3680	2785	1.321
	2	1860	5550	3690	2785	1.325
					PROMEDIO	1.323
Arena Roja (AR)	1	1860	5450	3590	2785	1.289
	2	1860	5500	3640	2785	1.307
					PROMEDIO	1.298

4.2.2.1.4. Humedad de absorción

La normativa (NMX-C-165-ONNCCE, 2014) define la absorción como el incremento en la masa de un agregado seco, cuando es sumergido en agua durante 24 horas a temperatura ambiente; debido al agua que se introduce en los poros del material, sin incluir el agua adherida a la superficie de las partículas. Dicha absorción, se expresa como por ciento de la masa seca y es índice de la porosidad del material.

Para determinar la cantidad de agua que absorbe un agregado fino, expresada en porcentaje, se siguió la metodología descrita por la normativa correspondiente; la cual consistió de manera general, en encontrar la pérdida de masa de una muestra de agregado sometida a secado en una bandeja colocada sobre una fuente de calor, una vez que el agregado se encontraba saturado y superficialmente seco. A continuación, se describe la metodología del ensayo.

Equipo empleado:

- Una muestra representativa de aproximadamente 2 kilogramos
- Una báscula con aproximación al décimo de gramo
- Una parrilla eléctrica
- Charolas metálicas
- Un molde metálico de forma troncocónica
- Un pisón
- Una espátula



- Un vidrio reloj

Procedimiento:

1. La muestra de aproximadamente 2 kg de arena se colocó en una charola metálica y se puso a saturar con agua durante $24 \text{ h} \pm 4 \text{ h}$. Dicha muestra se obtiene mediante alguno de los métodos de cuarteo o reducción de muestras ya descritos anteriormente.
2. Al término del tiempo de saturación, se secó superficialmente la arena, por medio del molde troncocónico, de la siguiente manera:
 - Se colocó una cantidad de arena suficiente en una charola, para posteriormente ponerla en contacto con la parrilla eléctrica y así eliminar el exceso de agua que contiene la muestra, dicho esto de otra manera, es hacer el secado de la arena en forma superficial (figura 42).
 - El paso anterior se continuó hasta que se acercó la muestra a la condición de saturada y superficialmente seca (sss). Para saber cuándo se presenta dicha condición, se colocó el molde troncocónico dentro de la charola con el diámetro mayor hacia abajo, se llenó el molde con la arena en cuatro capas, distribuyendo 25 compactaciones con la masa propia del pisón y sin altura de caída; dando 10 a la primera, 10 a la segunda, 3 a la tercera y 2 a la cuarta capa. Después se retiró el cono y se observó lo siguiente: - si la arena trató de disgregarse, significa que se ha secado superficialmente y si, por el contrario, - si la arena mantenía la forma del cono significa que la arena conserva agua en exceso, por lo tanto, hay que continuar secando el material hasta que se obtenga la condición deseada.
 - Conforme fue perdiendo agua la muestra, se realizó más continuamente el procedimiento con el cono para evitar que se seque en exceso.



Figura 42. Secado superficial del agregado fino. Fuente: propia.

3. Una vez que la arena se encontró en la condición saturada y superficialmente seca, se pesaron aproximadamente 300 gramos, registrando esta masa, como masa saturada y superficialmente seca (M_{sss}).
4. La muestra de aproximadamente 300 gramos, se colocó en una charola para secarla hasta masa constante, o sea, hasta eliminar completamente el agua.
5. Para saber cuándo el material está seco completamente, se colocó el cristal sobre el material hasta observar que dicho cristal no se empañara; en ese momento, se retiró el material de la fuente de calor y se dejó enfriar a temperatura ambiente, procediendo a pesarlo y registrándolo como masa de la muestra seca (M_s).

Cálculos de la prueba:

$$A = \frac{M_{sss} - M_s}{M_s} * 100$$

Donde:

A = Es la humedad de absorción, en %

M_{sss} = Masa de la muestra saturada y superficialmente seca (gramos)

M_s = Masa de la muestra seca (gramos)

Resultados:

El método de ensayo para determinar el porcentaje de humedad de absorción, se realizó para cada una de las arenas, tomando muestras representativas de cada una de ellas mediante el cuarteo. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 10. Resultados de la humedad de absorción de las arenas.

Nombre de la arena	Muestra	Msss (g)	Ms (g)	A (%)
Arena Negra (AN)	1	309.6	294.4	5.16
	2	296.6	295.6	3.85
	3	303.0	288.6	4.99
			PROMEDIO	4.67
Arena Blanca (AB)	1	262.6	244.2	7.53
	2	288.2	268.0	7.54
	3	309.2	287.8	7.44
			PROMEDIO	7.50
Balastre (BL)	1	304.0	276.0	10.14
	2	260.0	235.6	10.36
	3	312.6	285.2	9.61
			PROMEDIO	10.04
Arena Roja (AR)	1	265.2	253.6	4.57
	2	311.6	298.0	4.56
	3	308.4	294.2	4.83
			PROMEDIO	4.65

4.2.2.1.5. Densidad

La densidad absoluta, se refiere al volumen de las partículas individuales solamente, y naturalmente, no es posible acomodar estas partículas para que no haya huecos entre ellas. Cuando el agregado se va a dosificar realmente por volumen, es necesario saber la masa de agregado que llenaría un recipiente de volumen unitario. Ésta se conoce como la densidad aparente del agregado y se usa generalmente, para convertir cantidades por masa a cantidades por volumen (Neville A. , 2013).

El método de ensayo para conocer la densidad de una arena, ayuda en la obtención del volumen efectivo de las partículas de agregado fino, excluyendo los vacíos que se forman entre estas, cuando se acomodan una sobre la otra. El ensayo se desarrolló de la siguiente manera:

Equipo empleado:



- Una muestra representativa de arena de aproximadamente 1000 g
- Charolas metálicas
- Una espátula
- Una parrilla eléctrica
- Un molde metálico de forma troncocónica
- Un pisón
- Una probeta
- Un Frasco de Chapman
- Un vidrio reloj
- Una báscula con aproximación al décimo de gramo.

Procedimiento:

1. Se puso a saturar la arena en una charola durante 24 ± 4 horas, al término de este tiempo se seca superficialmente la muestra, utilizando el procedimiento descrito en la prueba de humedad de absorción con el molde troncocónico (apartado 4.2.2.1.4.).
2. Una vez que la arena se encontró en la condición saturada y superficialmente seca, se pesaron aproximadamente 300 gramos, registrando esta masa, como masa saturada y superficialmente seca (M_{ss}).
3. Se procedió a pesar el frasco de Chapman, registrando tal masa como masa del frasco (M_f) en gramos.
4. Enseguida se colocó agua en el frasco de Chapman hasta la primera marca del frasco (200 ml), para después colocar la muestra saturada y superficialmente seca dentro del frasco.
5. El frasco se inclinó aproximadamente a 45° y se giró en una línea horizontal imaginaria para eliminar todas las burbujas de aire contenidas en el frasco.
6. Después se llenó con agua hasta el nivel de aforo (450 ml) y se eliminaron las burbujas de aire contenidas en el frasco (figura 43).



Figura 43. Llenado del frasco Chapman hasta nivel de aforo. Fuente: propia.

- Se pesó el frasco que contenía el agua y la arena, registrando esta masa como masa total del frasco, muestra y agua hasta nivel de aforo (M_{fma}).

Cálculos de la prueba:

$$D = \frac{M_{sss}}{V_f - (M_{fma} - M_f - M_{sss})}$$

Donde:

D = densidad de la arena (g/cm^3)

M_{sss} = masa de la arena saturada y superficialmente seca (gramos)

V_f = Volumen del frasco al nivel de aforo (450 ml)

M_{fma} = masa total del frasco, muestra y agua hasta nivel de aforo (gramos)

M_f = masa del frasco (gramos)

Resultados:

Los resultados de densidad de cada una de las arenas, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 11. Resultados de la densidad de las arenas.

Nombre de la arena	Muestra	M_{sss} (g)	M_f (g)	M_{fma} (g)	D (g/cm^3)
Arena Negra (AN)	1	324.6	323.8	962.0	2.38
	2	307.8	324.6	952.6	2.37
	3	344.0	300.2	949.6	2.38
				PROMEDIO	2.38
Arena Blanca (AB)	1	306.2	325.0	934.7	2.09
	2	301.6	324.4	932.0	2.09

	3	304.6	323.2	932.8	2.10
				PROMEDIO	2.10
Balastre (BL)	1	293.8	325.0	923.8	2.03
	2	286.4	324.4	921.6	2.06
	3	288.4	323.2	921.0	2.05
				PROMEDIO	2.04
Arena Roja (AR)	1	290.8	323.6	941.8	2.37
	2	304.0	324.4	950.2	2.37
	3	301.6	323.4	947.4	2.36
				PROMEDIO	2.37

4.2.2.1.6. Análisis granulométrico y módulo de finura

La granulometría es la distribución del tamaño de las partículas de un agregado, que se determina a través del análisis o división de porciones del material por medio de tamices (cedazos, cribas) de malla de alambre con aberturas cuadradas.

La granulometría más deseable para el agregado fino depende del tipo de obra, si la mezcla es rica y del tamaño máximo del agregado grueso. En mezclas más pobres, o cuando se usan agregados gruesos de pequeñas dimensiones, es conveniente, para que se logre una buena trabajabilidad, que la granulometría se aproxime al porcentaje máximo recomendado que pasa por cada tamiz (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004).

En el diseño de mezclas de concreto, existen dos características del agregado fino que deben ser consideradas incondicionalmente: el módulo de finura (MF) y la continuidad de los tamaños. Mientras que el módulo de finura debe ser mayor que 2.3 y menor que 3.1 (NMX-C-111-ONNCCE, 2014); el agregado fino, no debe contener más del 45% de material retenido entre dos tamices normalizados consecutivos ni carecer de algún tamaño granulométrico.

El MF es un índice de finura del agregado, es decir, cuanto mayor sea su valor, más grueso es el agregado (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004).

La norma NMX-C-11-ONNCCE-2014 menciona que el agregado fino, para mezclas de concreto hidráulico, deberá estar dentro de los límites establecidos en la tabla 12 y contenida su curva granulométrica dentro de los límites representados en la figura 44. De no cumplir

con lo anterior, se podrá realizar un ajuste en los tamaños del material para compensar las deficiencias en la granulometría, siempre y cuando se haga un ajuste apropiado para utilizarlo en una mezcla de concreto.

Tabla 12. Límites de granulometría para agregado fino.

Criba mm (malla No.)	% que Pasa
9.5 (3/8")	100
4.75 (No. 4)	95 – 100
2.36 (No. 8)	80 – 100
1.18 (No. 16)	50 – 85
0.60 (No. 30)	25 – 60
0.30 (No. 50)	10 – 30
0.15 (No. 100)	2 - 10

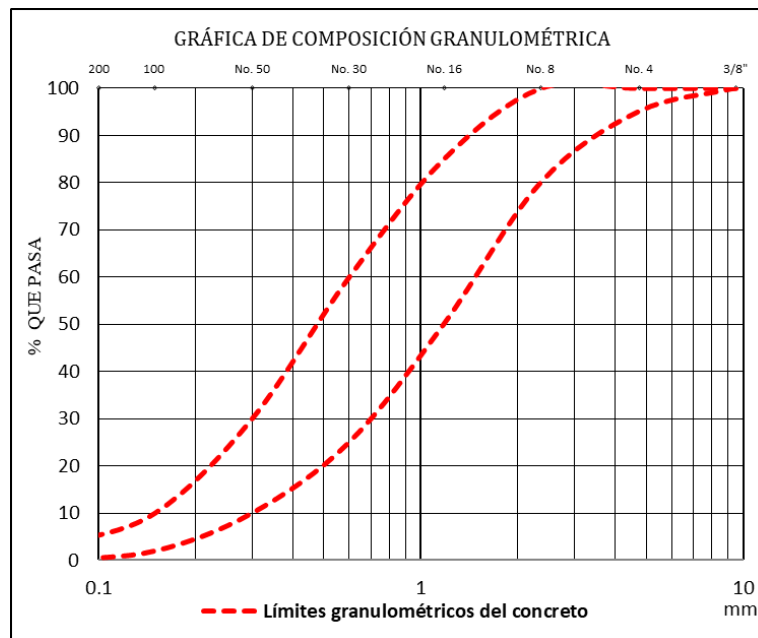


Figura 44. Límites de granulometría del agregado fino para mezclas de concreto. Fuente: propia.



A continuación, se presenta una metodología práctica del ensayo para la determinación de la granulometría en el agregado fino, basada en la norma NMX-C-077-ONNCCE (NMX-C-077-ONNCCE, 1997).

Equipo empleado:

- Una muestra representativa de arena de aproximadamente 600 gramos
- Un juego de mallas o cribas con abertura cuadrada del No. 4 (4.75 mm), No. 8 (2.36 mm), No. 16 (1.18 mm), No. 30 (0.60 mm), No. 50 (0.30 mm), No. 100 (0.15 mm), No. 200 (0.075 mm) y una charola con su respectiva tapa
- Una máquina agitadora para el cribado
- Una báscula con capacidad de 2160 gramos y aproximación al décimo de gramo
- Charolas metálicas y espátulas
- Una parrilla eléctrica
- Cepillos de cerdas suaves y de alambre
- Siete hojas de papel

Procedimiento:

1. Se tomó una muestra representativa de arena de aproximadamente 600 gramos. Dicha muestra fue obtenida de la reducción por cuarteo anteriormente mencionada.
2. Se secó la muestra hasta masa constante, a una temperatura de $383\text{ K} \pm 5\text{ K}$ ($110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$).
3. Cuando el material ya se encontraba seco y frío, se tomaron aproximadamente 500 gramos, pesados al décimo de gramo.
4. Se colocaron los tamices (juego de mallas) en orden decreciente (No. 4, 8, 16, 30, 50, 100, 200 y charola) y se vació la muestra de aproximadamente 500 gramos en la parte superior, para posteriormente tapar la malla de mayor abertura.
5. Una vez tapado el juego de mallas, con ayuda de la máquina agitadora (Raf-tap), se agitó la muestra (figura 45) durante un tiempo aproximado de 10 ± 5 minutos.



Figura 45. Cribado de la arena por medio de la maquina agitadora (Raf-tap) para la división de los tamaños. Fuente: propia.

6. Se procedió a extraer el material retenido en cada una de las mallas, colocando el material en la báscula para pesarlo. Para retirar el material de las cribas, se invirtieron estas y con ayuda de un cepillo de alambre se desalojó el material que se encontraba entre los espacios de las mallas del No. 4, 8, 16 y 30, mientras que las mallas del No. 50, 100 y 200 se limpiaron con cepillo de cerdas suaves.
7. Una vez pesado el material, en una superficie horizontal y limpia se colocaron siete hojas de papel y sobre ellas el material retenido (figura 46), esto para observar la distribución de tamaños sin realizar ningún calculo.



Figura 46. Distribución de tamaños producto del material retenido en los tamices. Fuente: propia.

8. Se registraron las masas retenidas del agregado fino en una tabla como la que a continuación se presenta y calculando como resultado:

- El porcentaje del material retenido entre dos cribas consecutivas,
- El porcentaje del material retenido acumulado en cada criba y
- El porcentaje total del material que pasa cada criba.

Tabla 13. Tabla para el registro de la masa retenida en los tamices requeridos para el análisis granulométrico en arenas.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Malla	Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que Pasa (%)
4				
8				
16				
30				
50				
100				
200				
Charola				
Masa Total			Módulo de Finura (MF)	



Cálculos de la prueba:

1. Teniendo como referencia, la numeración de las columnas de la tabla 13, se anotaron las masas retenidas de cada una de las mallas en la columna (2).
2. El porcentaje retenido (columna 3) se calculó de la siguiente manera:

$$\% \text{ Retenido} = \frac{\text{Masa Retenida}}{\text{Masa Total Retenida}} * 100$$

3. El Porcentaje Retenido Acumulado (columna 4) se calculó a partir de los datos de la columna (3) como sigue:

$$\begin{aligned} & \% \text{ Retenido Acumulado} \\ &= \% \text{ Retenido de la malla} \\ &+ \% \text{ Retenido Acumulado de la malla anterior} \end{aligned}$$

4. El Porcentaje que Pasa (%) se calculó de la siguiente manera:

$$\% \text{ que pasa} = 100 - \% \text{ Retenido Acumulado de la malla}$$

5. El Módulo de Finura se calculó de la siguiente manera:

$$M. F. = \frac{\text{suma del \% Retenido Acumulado de la malla No. 4 a la malla No. 100}}{100}$$

Resultados:

El análisis granulométrico de las diferentes arenas en estudio, fue estudiado en 2 muestras representativas, obteniendo una distribución de tamaños y un MF promedio.

Las curvas granulométricas que representan la distribución de tamaños de cada una de las muestras, por agregado fino estudiado, se presentan en una sola gráfica, junto con los límites inferior y superior establecidos por la norma mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2014.

Los resultados fueron los siguientes:

- Arena Negra (AN)
 - Muestra No. 1

Tabla 14. Análisis granulométrico de la AN - muestra No. 1.

Malla	Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que Pasa (%)
4	0.0	0.00	0	100
8	44.6	7.90	8	92
16	142.0	25.17	33	67
30	211.0	37.40	70	30
50	95.4	16.91	87	13
100	20.2	3.58	91	9
200	16	2.84	94	6
Charola	35	6.20	100	0
Masa Total	564.2		Módulo de Finura (MF)	2.90

○ Muestra No. 2

Tabla 15. Análisis granulométrico de la AN - muestra No. 2.

Malla	Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que Pasa (%)
4	0.0	0.00	0	100
8	43.8	7.79	8	92
16	136.8	24.32	32	68
30	202.8	36.06	68	32
50	97.6	17.35	86	14
100	24.2	4.30	90	10
200	19.6	3.49	93	7
Charola	37.6	6.69	100	0
Masa Total	562.4		Módulo de Finura (MF)	2.83

○ Distribución granulométrica

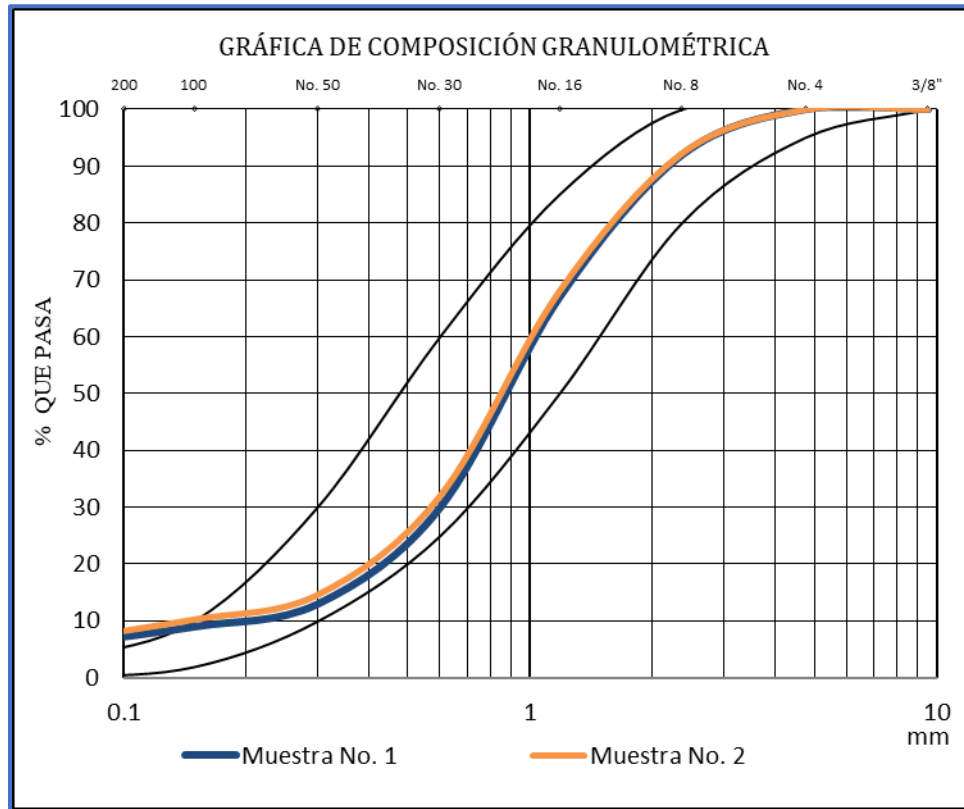


Figura 47. Curvas granulométricas de las muestras de AN. Fuente: propia.

▪ Arena Blanca (AB)

○ Muestra 1

Tabla 16. Análisis granulométrico de la AB - muestra No. 1.

Malla	Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que Pasa (%)
4	12.6	2.06	2	98
8	57.4	9.37	11	89
16	85.4	13.94	25	75
30	163.4	26.67	52	48
50	152.4	24.88	77	23
100	58.8	9.60	87	13
200	46.4	7.57	94	6
Charola	36.2	5.91	100	0
Masa Total	612.6		Módulo de Finura (MF)	2.54

○ Muestra 2

Tabla 17. Análisis granulométrico de la AB - muestra No. 2.

Malla	Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que Pasa (%)
4	9.8	1.55	2	98
8	72.4	11.47	13	87
16	84.8	13.43	26	74
30	158.6	25.13	52	48
50	157.8	25.00	77	23
100	63.6	10.08	87	13
200	48.4	7.67	94	6
Charola	35.8	5.67	100	0
Masa Total	631.2		Módulo de Finura (MF)	2.56

○ Distribución granulométrica

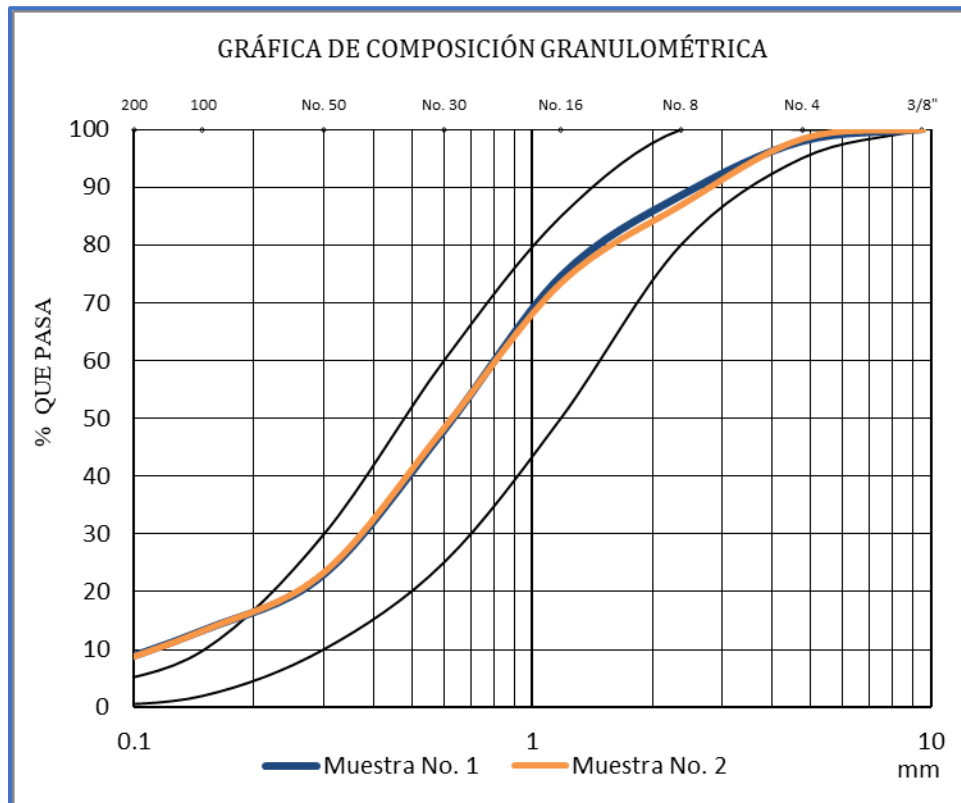


Figura 48. Curvas granulométricas de las muestras de AB. Fuente: propia.



- Balastre (BL)
 - Muestra 1

Tabla 18. Análisis granulométrico de la BL - muestra No. 1.

Malla	Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que Pasa (%)
4	0.0	0.00	0	100
8	45.0	7.25	7	93
16	77.6	12.50	20	80
30	160.4	25.84	46	54
50	156.4	25.19	71	29
100	63.0	10.15	81	19
200	55.2	8.89	90	10
Charola	63.2	10.18	100	0
Masa Total	620.8		Módulo de Finura (MF)	2.24

- Muestra 2

Tabla 19. Análisis granulométrico de la BL - muestra No. 2.

Malla	Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que Pasa (%)
4	0.0	0.00	0	100
8	50.8	8.10	8	92
16	80.6	12.85	21	79
30	166.4	26.54	47	53
50	154.2	24.59	72	28
100	62.2	9.92	82	18
200	52.6	8.39	90	10
Charola	60.2	9.60	100	0
Masa Total	627.0		Módulo de Finura (MF)	2.31

○ Distribución granulométrica

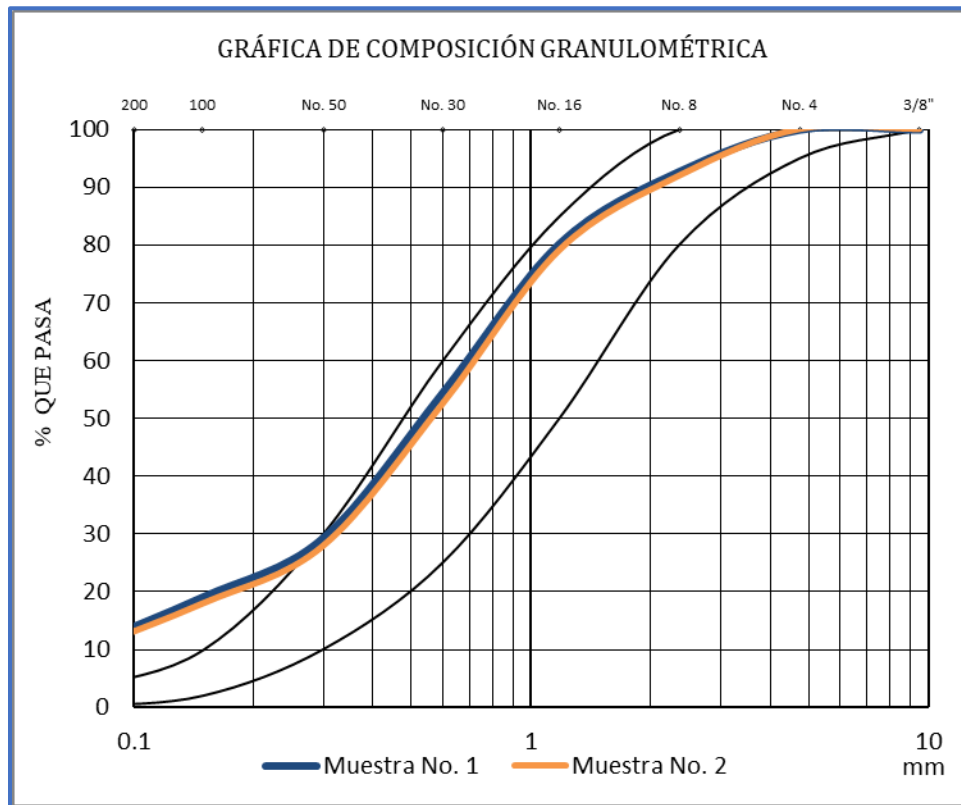


Figura 49. Curvas granulométricas de las muestras de BL. Fuente: propia.

- Arena Roja (AR)
 - Muestra 1

Tabla 20. Análisis granulométrico de la AR - muestra No. 1.

Malla	Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que Pasa (%)
4	1.8	0.29	0	100
8	85.0	13.93	14	86
16	145.6	23.85	38	62
30	105.0	17.20	55	45
50	98.2	16.09	71	29
100	56.8	9.31	81	19
200	79.0	12.94	94	6
Charola	39.0	6.39	100	0
Masa Total	610.4		Módulo de Finura (MF)	2.60

○ Muestra 2

Tabla 21. Análisis granulométrico de la AR - muestra No. 2.

Malla	Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que Pasa (%)
4	1.6	0.25	0	100
8	102.2	15.95	16	84
16	175.4	27.38	44	56
30	116.2	18.14	62	38
50	95.4	14.89	77	23
100	51.2	7.99	85	15
200	54.6	8.52	93	7
Charola	44.0	6.87	100	0
Masa Total	640.6		Módulo de Finura (MF)	2.83

○ Distribución granulométrica

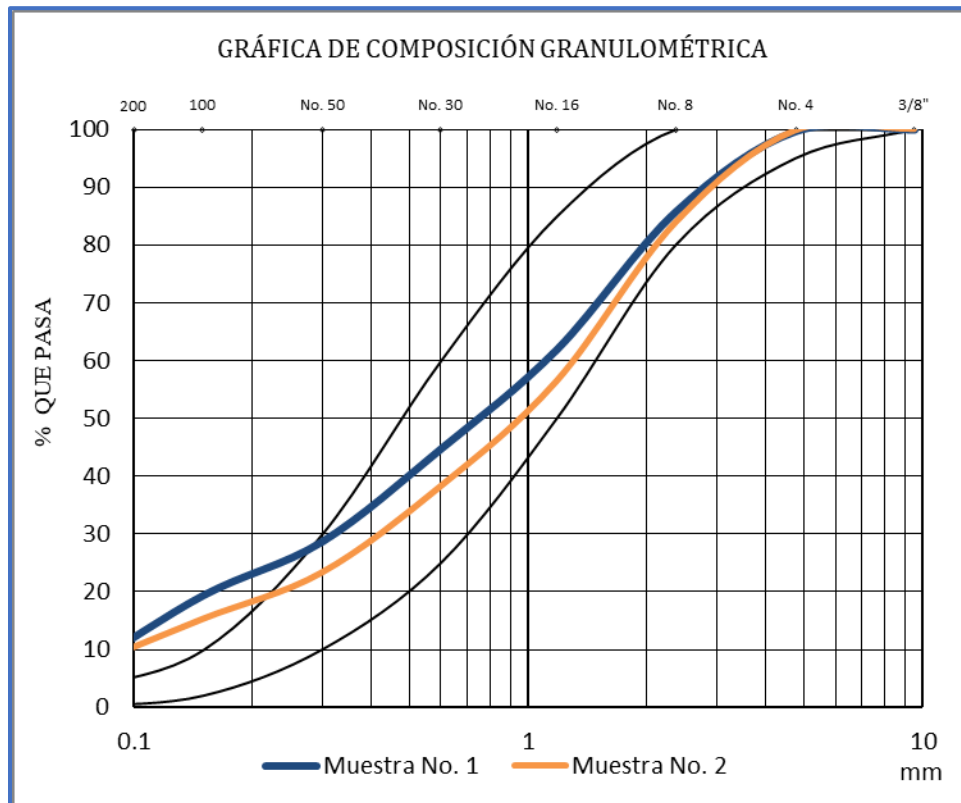


Figura 50. Curvas granulométricas de las muestras de AR. Fuente: propia.

4.2.2.1.7. Determinación del contenido de material orgánico (No. de Colorimetría)

Existen tres amplias categorías de sustancias perjudiciales que pueden encontrarse en los agregados: *impurezas orgánicas*, que interfieren en el proceso de hidratación del cemento; *recubrimientos*, que impiden el desarrollo de una buena adherencia entre el agregado y la pasta del cemento, y *algunas partículas individuales* que son en sí mismas débiles o inestables.

En relación con las impurezas orgánicas, no todas son perjudiciales y lo mejor es verificar sus efectos haciendo especímenes de prueba de compresión. Sin embargo, por lo general se ahorra tiempo si se determina primero la cantidad de compuestos orgánicos, de una manera visual, por medio de la llamada prueba colorimétrica, incluida en la norma ASTM C 40-16.

El ensayo de colorimetría consiste en determinar el contenido de material orgánico dañino en una arena, juzgado por el color (comparado con una tabla colorimétrica) que presenta la muestra al combinarla con una solución de NaOH al tres por ciento y al dejarla reposar durante 24 horas. mientras más oscuro sea el color, mayor será el contenido de materia orgánica (Neville A. , 2013).

La norma NMX-C-111-ONNCCE (NMX-C-111-ONNCCE, 2014) menciona que, una vez efectuado el ensayo, la solución que presente un color más oscuro que la coloración No. 3 de la tabla colorimétrica, deben rechazarse, excepto, si se demuestra que la coloración es debida a la presencia de pequeñas cantidades de carbón, lignito o partículas semejantes, especificadas en la tabla 22, o bien, si se demuestra que el efecto de las impurezas orgánicas en morteros ensayados a la edad de 7 días, dan resistencias calculadas no menores que el 95% conforme al método que establece la norma NMX-C-076-ONNCCE.

Tabla 22. Límites máximos de carbón y lignito en el agregado fino.

Concepto	Material máximo permisible en la masa total de la muestra, en %
Carbón y lignito:	
En concreto aparente	0.5
En otros concretos	1.0

La metodología para determinar la cantidad de materia orgánica, se presenta a continuación, basada en lo descrito por la norma NMX-C-088-ONNCCE (NMX-C-088-ONNCCE, 1997).

Equipo empleado:

- Tres botellas transparentes e incoloras de vidrio, con marcas de graduación a 130 y 200 cm³
- Charolas metálicas
- Una parrilla eléctrica
- Espátulas
- Una báscula con aproximación al décimo de gramo
- Material para las soluciones y tabla colorimétrica
- Solución de sosa cáustica 30 gramos por litro de solución normal en agua destilada

Procedimiento:

1. Se tomó una muestra representativa de arena de aproximadamente 500 gramos y se secó hasta adquirir masa constante a una temperatura de $383\text{ K} \pm 5\text{ K}$ ($110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$).
2. Se colocó la arena seca y fría en el frasco de biberón hasta 130 cm³, adicionándole solución de sosa cáustica hasta los 200 cm³ (figura 51).

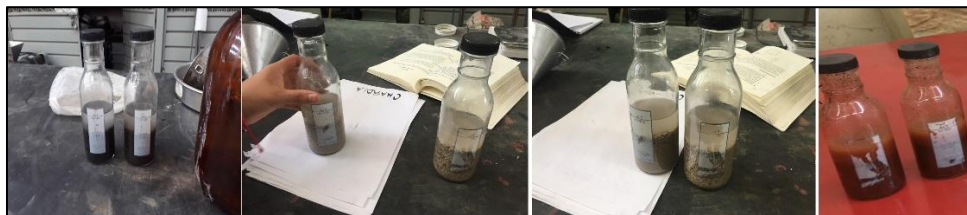


Figura 51. Preparación del agregado fino y la solución dentro del frasco. Fuente: propia.

3. Se tapó el frasco de biberón, se agitó vigorosamente durante aproximadamente dos minutos y se dejó reposar durante 24 horas.
4. Al cabo de este tiempo de reposo, se comparó el color del líquido de la botella con la tabla colorimétrica.

Resultados:

Para obtener los resultados de la cantidad de materia orgánica o No. de colorimetría de cada arena en estudio, se tomaron tres muestras representativas y los resultados fueron los siguientes:

Tabla 23. Resultados del ensayo de colorimetría.

Nombre de la arena	Muestra	No. de Tabla Colorimétrica
Arena Negra (AN)	1 – 3	2
Arena Blanca (AB)	1 – 3	1
Balastre (BL)	1 – 3	1
Arena Roja (AR)	1 – 3	1



Figura 52. Comparación del color de las muestras con la tabla colorimétrica. Fuente: propia.

El color observado en todas las muestras de arena, es inferior al color asignado con el No. 3 de la tabla colorimétrica, por lo que se puede concluir en este ensayo, que los agregados finos estudiados no contienen exceso de materia orgánica que pueda ser perjudicial a las mezclas de concreto elaboradas con estas arenas.

4.2.2.1.8. Sedimentación

La metodología para realizar el ensayo de sedimentación en el agregado fino, no se encuentra normada, sin embargo, fue desarrollada a partir de la metodología descrita en el Manual de Prácticas del Laboratorio de Resistencia de Materiales (Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011).

El objetivo de este ensayo es determinar si el contenido de material fino que contiene una arena es aceptable o no en la elaboración de concreto, al observar una ausencia o exceso de finos en el material.

Equipo empleado:

- Dos frascos de vidrio graduados con tres marcas cada uno: la primera a los 414 cm³, la segunda a los 444 cm³ y la tercera a los 828 cm³.
- Una muestra de arena seca de aproximadamente 2 kilogramos.
- Un litro de agua de preferencia destilada.

Procedimiento:

1. Se colocó arena seca dentro del frasco hasta la marca de 414 cm³ (ml), para enseguida llenar de agua el frasco hasta la marca de 828 cm³ (figura 53).



Figura 53. Llenado de frascos con agregado fino y agua.

2. Enseguida, se tapó el frasco y se procedió a agitarlo, durante un tiempo de aproximadamente 2 minutos, hasta lograr que todo el material fino quede suspendido en el agua.
3. Se dejó reposar el material en el frasco, durante 24 horas para determinar el nivel del material fino. Esto se logra observando si el material fino rebasa o no el nivel de 444 cm³.

Interpretación de resultados:

- Si el nivel del material fino rebasa la marca de 444 cm³ se reporta el material con exceso de finos.
- Si el material fino no rebasa la marca de 444 cm³, se reporta que el contenido de material fino es aceptable.

Resultados:

La prueba se realizó en dos muestras representativas por cada tipo de arena estudiada, con dos frascos iguales y en el mismo lapso de tiempo, esto con la intención de obtener resultados confiables. De acuerdo a lo observado, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 24. Resultados del ensayo de sedimentación.

Nombre de la arena	Muestra	Diagnóstico de la prueba
Arena Negra (AN)	1 – 3	Exceso de finos
Arena Blanca (AB)	1 – 3	Aceptable
Balastre (BL)	1 – 3	Exceso de finos
Arena Roja (AR)	1 – 3	Aceptable



Figura 54. Agregados finos en reposo una vez pasado el tiempo de 24 h. Fuente: propia.



Como se observa en la tabla 24 y en la figura 55, la prueba de sedimentación muestra que la AB y la AR no se encuentran al borde de la marca de 444 cm³ de los frascos, es decir, no presentan un exceso de finos y es aceptable para la elaboración de mezclas de concreto; mientras que el BL y la AN presentaron un exceso de finos en las dos muestras sometidas a la prueba de sedimentación.

4.2.2.1.9. Elaboración de mezclas de mortero con arenas en estudio

En la presente investigación, se realizó un *estudio empírico* en el laboratorio para seleccionar el agregado fino adecuado para la elaboración de las mezclas de concreto hidráulico.

El estudio empírico consto de realizar mezclas de mortero, constituidas por las arenas en estudio, en forma de cubos de 5 mm de arista y pastas de mortero con un espesor de 1 cm apoyadas en una losa de concreto convencional de 1 m². Dichos morteros, una vez elaborados y en un estado endurecido, fueron sometidos a pruebas de compresión, en el caso de los cubos y a una revisión detallada de la superficie de las pastas, de tal manera que se observara las grietas presentes en su superficie a causa del secado (fraguado) de estas.

El mortero puede definirse como la mezcla de un material aglutinante (cemento Portland y/o otros materiales cementantes), el agregado fino o arena, agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse presenta propiedades químicas, físicas y mecánicas similares a las de un concreto (Blancas Herrera, 2017).

Para determinar las proporciones de los materiales constituyentes de las mezclas de mortero a realizar, la investigación se basó en la norma NMX-C-061-ONNCCE (NMX-C-061-ONNCCE, 2015), la cual menciona que “la proporción en peso de los materiales secos para elaborar el mortero estándar debe consistir de una parte de cemento y 2.75 de arena graduada” y basándonos en investigaciones anteriores se utilizó una relación agua – cemento de 0.6, con el objetivo de que la cantidad de agua utilizada le diera trabajabilidad a las mezclas de mortero.

Las mezclas que se realizaron a partir de la relación cemento – arena 1:2.75 fueron cuatro, elaboradas en las mismas condiciones de laboratorio y con la única diferencia del agregado

fino empleado. La tabla 25 indica las cantidades de cemento, arena y agua empleados para las mezclas.

Tabla 25. Dosificación de las mezclas de mortero.

MATERIALES	CANTIDAD POR MEZCLA			
	AN	AB	BL	AR
Cemento (CPC 30 R-RS)	740 g	740 g	740 g	740 g
Arena	1035 g	1035 g	1035 g	1035 g
Agua	444 ml	444 ml	444 ml	444 ml
Relación cemento : arena	1 : 2.75	1 : 2.75	1 : 2.75	1 : 2.75
Relación agua /cemento	0.60	0.60	0.60	0.60

Las proporciones de las mezclas, que se observan en la tabla, se utilizaron en duplicado ya que la primera proporción sirvió para elaborar 9 especímenes cúbicos por arena, que se ensayaron a compresión a la edad de 3, 7 y 28 días; y una segunda proporción, que sirvió para colocar las pastas de mortero sobre la losa de concreto.

La metodología para realizar las mezclas de mortero fue basada en la norma NMX-C-085-ONNCCE (NMX-C-085-ONNCCE, 2015) y cuyo procedimiento es el siguiente:

1. Una vez que la arena seleccionada ya se encontraba seca, se pesó el cemento y la arena (figura 55) y se vertieron en una cubeta de 19 litros en donde se realizaron las mezclas.

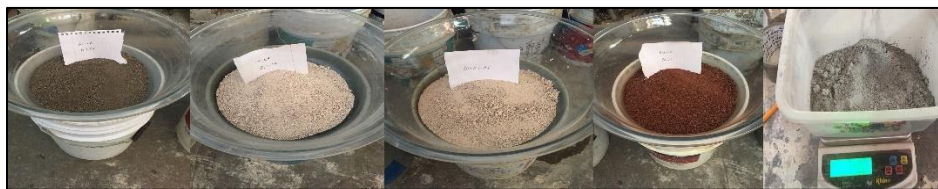


Figura 55. Pesado del agregado fino y el cemento para la elaboración de mortero. Fuente: propia.

2. Se procedió a homogenizar manualmente el cemento con la arena utilizando un guante de látex que ayude a no perder la cantidad exacta dosificada de material.
3. Se incorporó el agua necesaria y se ejecutó el mezclado con ayuda de un taladro marca Bosch con potencia de 750w y 3500 RPM, usando como aditamento un aspa mezcladora, en un tiempo de 60 segundos. Dicho tiempo, se dividió en dos periodos

de 30 segundos cada uno: el primer periodo consistió en mezclar con las aspas a una velocidad baja, con el objetivo de emparar todas las partículas con agua y un segundo periodo con una velocidad alta del taladro, para así tener lista la mezcla de mortero. Si después de este tiempo, aún se notaban partículas sin mezclarse, con ayuda de una espátula se desprendió rápidamente hacia abajo toda la pasta que se haya adherido a las paredes y al fondo de la cubeta y se puso en marcha el aspa mezcladora durante otros 30 segundos para terminar con el mezclado del mortero.

4. Se vació la mezcla de mortero a los moldes correspondientes según la prueba de calidad a realizar.

Para la **fabricación de los especímenes cúbicos**, se emplearon moldes de acero inoxidable y bronce con dimensiones estándar de 5 cm de arista, fijados a la placa de base con soldadura y unidas las cuatro caras del cubo con una bisagra ubicada en una de las aristas del cubo y realizando el cerramiento con un clavo o tachuela para no permitir la salida de la mezcla al realizar el colado del mortero (figura 56).



Figura 56. Moldes de acero inoxidable y bronce para la elaboración de cubos de mortero. Fuente: propia.

Procedimiento:

1. Se limpiaron los moldes con una estopa para tener una superficie libre de polvo.
2. Se cubrió la superficie de todo el molde, con una grasa delgada como lo es el aceite para transmisión mezclado con diésel, esto con la finalidad de reducir la adherencia entre el mortero y las paredes del molde, y así facilitar el desmolde al día siguiente del espécimen de una manera más sencilla sin deteriorar las aristas.

3. Se elaboró la mezcla correspondiente con las cantidades y el procedimiento ya citado anteriormente.
4. Se realizó el llenado de los moldes (figura 57), apegado a lo que menciona la norma correspondiente (NMX-C-061-ONNCCE, 2015), en dos capas de igual espesor aproximadamente. Cada capa se compactó con un pisón (de sección rectangular de aprox. 2.5 cm por 2.5 cm en su base y hecho de un material de hule sintético no absorbente), 32 veces en 10 segundos, en 4 vueltas.



Figura 57. Llenado de los moldes. Fuente: propia.

Cada vuelta se efectuó a 90° con respecto a la anterior y consistió en 8 golpes adyacentes repartidos sobre la superficie como lo muestra la siguiente figura.

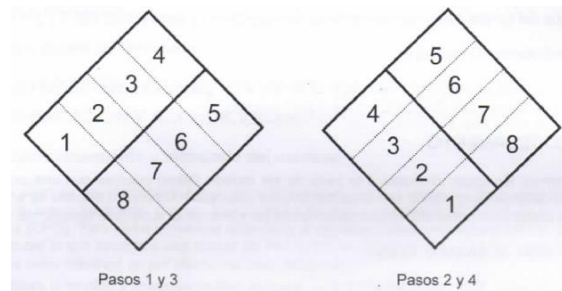


Figura 58. Apisonamiento en el molde. Fuente: NMX-C-061-ONNCCE-2015.

5. Después del llenado de la segunda capa, se tuvo el cuidado de dejar un exceso de mezcla en la parte superior del molde, esto para posteriormente enrazar el cubo (figura 59) con la ayuda de una espátula y así tener un acabado uniforme liso en la cara de colado.

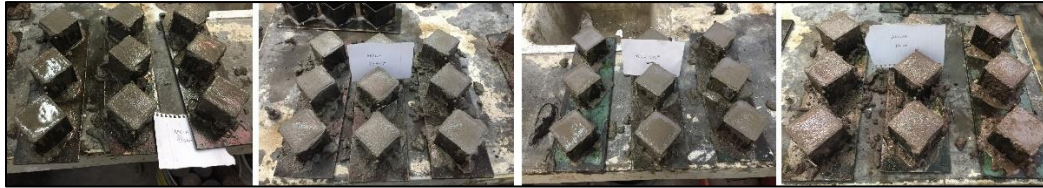


Figura 59. Enrase de cubos de las diferentes mezclas de mortero. Fuente: propia.

6. Una vez elaborados el total de cubos por mezcla (9 cubos), se dejaron fraguar en sus moldes en un tiempo de 24 horas, para después realizar el desmolde.
7. Se etiquetó cada espécimen, en la cara de curado, colocando con ayuda de un marcador indeleble su nomenclatura correspondiente.
8. Se sometieron los especímenes a curado (figura 60). El curado al que fueron sometidos fue por inmersión en agua hasta el día de la prueba según lo especificado en la norma NMX-C-148-ONNCCE (NMX-C-148-ONNCCE, 2010).



Figura 60. Curado de los cubos de mortero. Fuente: propia.

Para la **fabricación de las pastas de mortero**, se empleó el mismo volumen de mezcla que para la elaboración de los cubos, considerando las mismas condiciones de relación agua - cemento y cemento – arena.

La colocación de las 4 pastas de mortero en estudio fue sobre una losa de concreto convencional de 1 m² de superficie, fabricada para pruebas de adherencia en morteros, la cual se seccionó en cuatros cuadrantes en su cara superior; quedando cada cuadrante con una superficie aproximada de 0.25 m² y dentro de cada uno de ellos un volumen de mortero de 0.0025 m³.

Una vez elaborados los morteros, se realizaron pruebas de calidad para seleccionar el agregado fino que mejor desempeño mecánico (en el caso de aplicarle un esfuerzo a



compresión) y físico (al presentar o no agrietamiento al secarse las pastas) presentará. Las pruebas de calidad fueron las siguientes:

1. Resistencia a la compresión en cubos

La prueba de compresión en cubos de mortero de 5 cm de arista, corresponde a una prueba destructiva, cuyo valor arrojado puede ser considerado como una de las propiedades más importantes y necesarias para establecer una evaluación general del material, tanto desde el punto de vista de durabilidad como de la capacidad de resistencia mecánica.

Para el análisis de la resistencia a compresión de los morteros se siguió el procedimiento de las normas vigentes ASTM C109/C109M-2016 (C109/C109M, 2016) y NMX-C-061-ONNCCE (NMX-C-061-ONNCCE, 2015), las cuales especifican la elaboración de cubos de mortero de 5cm por lado constituidos por una parte del cementante y 2.75 de agregado fino.

En la prueba se utilizaron 3 especímenes por cada edad de prueba, es decir 9 cubos en total para las edades de 3, 7 y 28 días; y para cada una de las mezclas elaboradas con los diferentes tipos de arenas en estudio como lo son: mortero de arena negra (AN), mortero de arena blanca (AB), mortero de balastre (BL) y mortero de arena roja (AR).

Equipo empleado:

- Tres especímenes cúbicos por edad y mezcla en estudio
- Una máquina universal de pruebas marca Forney
- Una Franela

Procedimiento:

1. Se extrajeron del recipiente de curado los especímenes, teniendo el cuidado de mantenerse a una temperatura húmeda, pero sin escurrimiento de agua superficial.
2. Con ayuda de una franela se secaron superficialmente los especímenes, para lograr que no se observara presencia de agua superficial en los cubos.
3. Se midieron las dimensiones reales de una de las caras de cada cubo, que será sometida a la aplicación de la carga y se marcó con una “x” para identificarla a la

hora de posicionar cada cubo en la máquina de pruebas, como se muestra en la siguiente figura.



Figura 61. Marcado en la cara de aplicación de carga del cubo. Fuente: propia.

4. Se llevó cada cubo a la máquina universal de pruebas, colocándolo cada uno por encima de la base de la máquina universal, procurando que el espécimen quede en el centro de la platina móvil para así lograr que la carga se distribuya sobre toda el área del cubo.
5. Se procedió a la aplicación de la carga a una velocidad constante e igual para toda la prueba en el rango de 15000 kg con aproximación de 1 kg, hasta lograr la falla del cubo (figura 62).

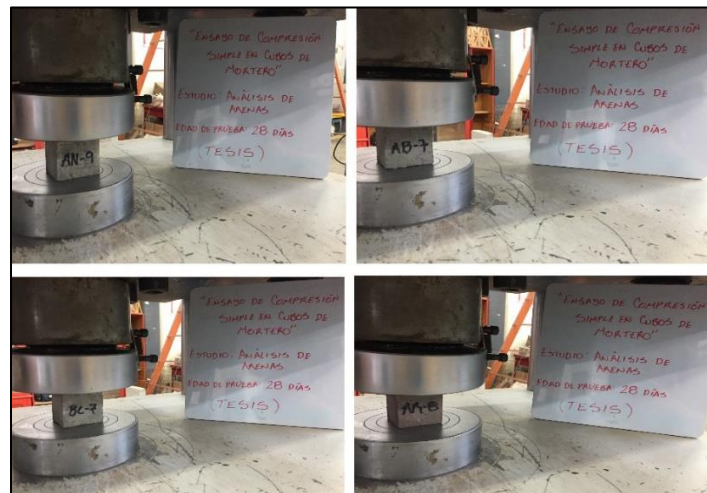


Figura 62. Aplicación de la carga axial sobre el cubo de mortero. Fuente: propia.

6. Se registró la carga máxima que soportó la muestra, esto con ayuda del sistema acoplado a dicha máquina y se observó el comportamiento de falla (figura 63).



Figura 63. Falla del espécimen al registrar la carga máxima. Fuente: propia.

Cálculos de la prueba:

La resistencia a compresión de los cubos se calculó de la siguiente manera, obteniendo así un promedio final por cada edad y mezcla en estudio.

$$R = \frac{W}{A}$$

Donde:

R = Resistencia a la compresión, en kgf/cm²

W = Carga de ruptura de la muestra, en kgf

A = Área de la cara sometida a la carga axial de la muestra, en cm²

Resultados:

Tabla 26. Resultados de la prueba de resistencia a la compresión en especímenes cúbicos.

Mortero	Edad de Prueba (días)	No. de espécimen	Dimensiones (cm)	A (cm ²)	W (kgf)	R (kgf/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
AN	3	1	5.04 x 5.24	26.4	4751.0	179.9	174.5
		2	5.02 x 5.15	25.9	4025.0	155.7	
		3	5.00 x 5.09	25.5	4779.0	187.8	
	7	4	5.19 x 5.13	26.6	7322.0	275.0	250.4
		5	5.23 x 5.19	27.1	6499.0	239.4	
		6	5.32 x 5.21	27.7	6561.0	236.7	
	28	7	5.26 x 5.05	26.6	8583.3	323.1	324.1
		8	5.19 x 5.05	26.6	8449.0	322.4	
		9	5.25 x 5.04	26.5	8650.9	326.9	
	3	1	5.08 x 5.22	26.5	3275.0	123.5	137.2



AB	7	2	5.07 x 5.18	26.3	3637.0	138.5	163.4	
		3	5.06 x 5.18	26.2	3921.0	149.6		
		4	5.24 x 5.18	27.1	4015.0	147.9		
	28	5	5.23 x 5.03	26.3	4752.0	180.6		238.1
		6	5.19 x 5.23	27.1	4384.0	161.5		
		7	5.11 x 5.20	26.6	6548.9	246.5		
	28	8	5.26 x 5.04	26.5	6908.4	260.6		238.1
		9	5.24 x 5.04	26.4	5470.2	207.1		
BL	3	1	5.00 x 5.06	25.3	3475.0	137.4	151.4	
		2	5.13 x 5.12	26.3	3689.0	140.4		
		3	5.07 x 5.26	26.7	4703.0	176.4		
	7	4	5.11 x 5.17	26.4	4895.0	185.3		197.0
		5	5.05 x 5.17	26.1	5217.0	199.8		
		6	5.26 x 5.10	26.8	5525.0	206.0		
	28	7	5.17 x 5.15	26.6	6814.3	255.9		206.2
		8	5.22 x 5.18	27.0	5112.5	189.1		
		9	5.19 x 5.12	26.6	4613.9	173.6		
AR	3	1	5.09 x 5.12	26.1	4371.0	167.7	176.1	
		2	5.25 x 5.22	27.4	4720.0	172.2		
		3	5.21 x 5.12	26.7	5022.0	188.3		
	7	4	5.08 x 5.14	26.1	4531.0	173.5		186.8
		5	5.19 x 5.30	27.5	5807.0	211.1		
		6	5.13 x 5.04	25.9	4541.0	175.6		
	28	7	5.07 x 5.09	25.8	6113.6	236.9		210.2
		8	5.15 x 5.22	26.9	5053.0	188.0		
		9	5.17 x 5.15	26.6	5473.8	205.6		

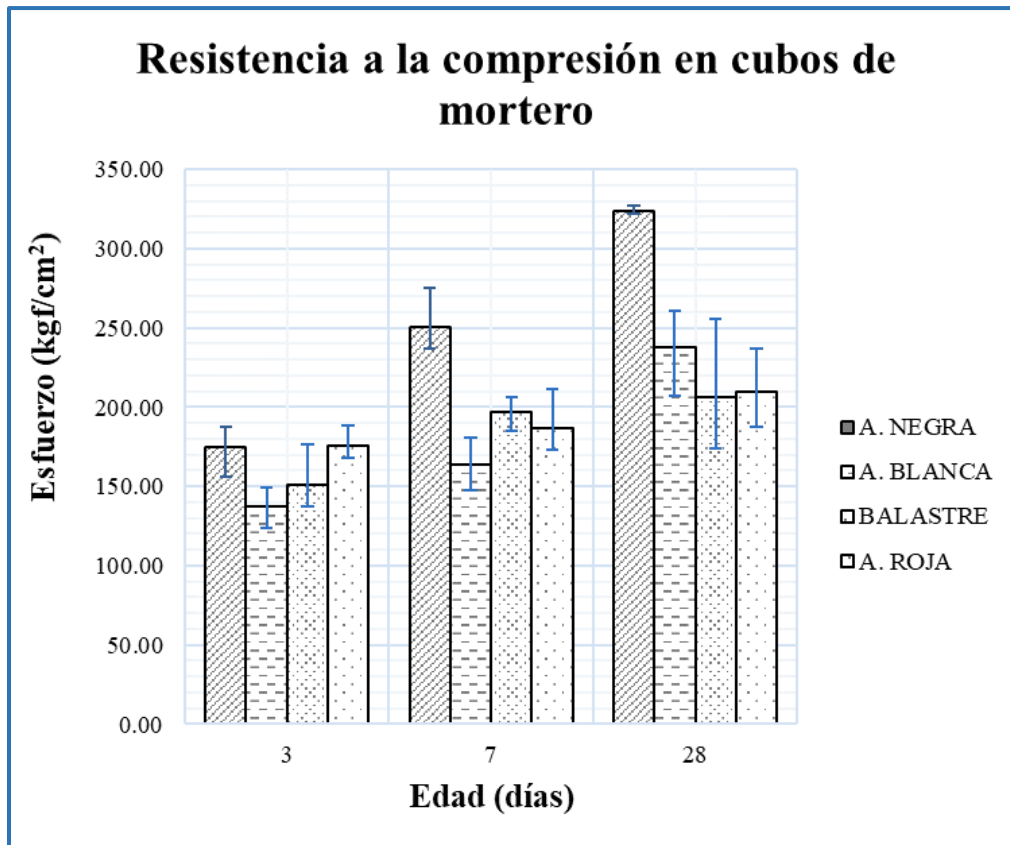


Figura 64. Gráfica de resultados de la prueba de resistencia a compresión en especímenes cúbicos. Fuente: propia.

Observaciones de la prueba:

Los especímenes del mortero elaborado con la arena roja (AR) de Janamuato, presentan una falla frágil al momento de llegar a la carga ultima de ruptura en comparación con los demás morteros en estudio.

2. Revisión detallada de la superficie en las pastas

La revisión detallada de la superficie en las pastas de mortero, corresponde a una prueba física realizada en el laboratorio, la cual tiene sus bases en la prueba de adherencia en morteros (ASTM C 1583, 2013) y cuyos resultados se ven afectados por los agrietamientos que las pastas, una vez colocadas en la superficie, exponen a simple vista en las horas subsiguientes al fraguado final y cuyo efecto depende en gran medida del agregado fino que contienen.

Para el análisis de las pastas se elaboraron los cuatros tipos de mortero, con volúmenes idénticos de material a los cubos y una vez colocadas sobre la superficie de concreto todas las mezclas, en las mismas condiciones de elaboración y curado, se efectuó la revisión de la superficie de cada una de las pastas a la edad de 1, 3 y 7 días.

Equipo empleado:

- Una losa de concreto de 1 m² de superficie
- Hilo para construcción
- Cimbra
- Cuchara de albañil
- Mezclas de mortero
- Clavos para concreto

Procedimiento:

1. Se humedeció superficialmente la losa de concreto con la intención de que, al vaciar el mortero sobre cada cuadrante, el concreto no absorbiera parte del agua contenida en las mezclas (figura 65).



Figura 65. Humedecimiento de la losa de concreto. Fuente: propia.

2. Se seccionó la losa de concreto, con ayuda del hilo y de los clavos, de tal forma que quedaron 4 cuadrantes iguales y la referencia de la altura de 1 cm por encima de la superficie de la losa.
3. Se elaboraron las mezclas de mortero en un recipiente de 19 litros, tal y como se describió al principio de este apartado y se vaciaron cada una de las mezclas en su respectivo cuadrante.

4. Con ayuda de la cuchara de albañil, se dispersó la mezcla de mortero para cubrir la superficie del cuadrante correspondiente al tipo de mezcla y también para darle un espesor de 1 cm a la pasta (figura 66).



Figura 66. Colocación y acabo de las pastas de mortero en cada cuadrante. Fuente: propia.

5. Las pastas de morteros se dejaron fraguar en condiciones ambientales prevalecientes al laboratorio (figura 67), para después realizarle la revisión detallada respecto a las grietas superficiales que presentaba cada una de las pastas a la edad de análisis.



Figura 67. Fraguado de pastas de mortero para el análisis de desempeño de las arenas. Fuente: propia.

Resultados:



Figura 68. Resultados de la superficie de las pastas de mortero a la edad de 7 días. Fuente: propia.

Observaciones de la prueba:

Durante las primeras 6 horas de fraguado, se observó el agrietamiento en la mezcla elaborada con arena negra (AR) y presencia de poros de aire en la pasta con arena roja (AR); mientras que, para los días 1, 3 y 7 la revisión marcó que en las pastas con material de balastre (BL) y de arena blanca (AB), sus agrietamientos fueron prácticamente inapreciables.

4.2.2.1.10. Selección del agregado fino apto para la investigación

Como ya se mencionó anteriormente, la selección del agregado fino apto para la presente investigación, dependió del análisis en sus características físicas de acuerdo a los ensayos de caracterización, así como, en el comportamiento o desempeño que el agregado fino desarrollara dentro de mezclas de mortero.

Una vez hecho lo anterior, se seleccionó como agregado fino, la **arena blanca** proveniente del banco de material “El Coro” que, de acuerdo a los resultados presentados, fue la arena que notablemente no presentó el mejor comportamiento a la compresión (figura 64), quedando por debajo del esfuerzo presentado por el mortero elaborado con arena negra; pero si, sus características físicas fueron las mejores y cuyos resultados se vieron reflejados en la pasta de mortero.

A continuación, la tabla 27 muestra un resumen de los resultados obtenidos en las distintas pruebas para la caracterización de la arena blanca, así como cada una de las especificaciones marcadas por su norma correspondiente.

Tabla 27. Resumen de características físicas del agregado fino empleado en esta investigación.

CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL	VALOR	ESPECIFICACIÓN
MVSS (kg/m^3)	1244	-
MVSV (kg/m^3)	1363	-
Humedad de absorción (%)	7.5	-
Densidad (g/cm^3)	2.1	-
Módulo de Finura	2.55	2.3 – 3.1
No. De colorimetría	1	≤ 3 (Normal)
Sedimentación	Aceptable	-

4.2.2.2. Agregado grueso

El agregado grueso utilizado en las mezclas de concreto fue obtenido del banco de material “La Roka” que está ubicado a un costado de la carretera Morelia – Guadalajara, justo después de pasar la localidad de Cuto del Porvenir (figura 69) perteneciente al municipio de Tarímbaro del estado de Michoacán. El tipo de propiedad es particular, el material obtenido

es una roca basáltica y el tratamiento que se le da a dicho material es trituración parcial y cribado con un tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ " empleado para la elaboración de concreto hidráulico.



Figura 69. Banco de material "La Roka". Fuente: Google Maps.

La grava triturada, fue adquirida de un depósito de material, llevada al laboratorio para extenderla en una superficie limpia y exponerla al sol, con el objetivo de eliminar la cantidad total de agua absorbida de forma natural por el material (figura 70) y se le realizaron las pruebas correspondientes de caracterización que a continuación se presentan.



Figura 70. Toma de muestra y secado en laboratorio de la grava del banco de material "La Roka". Fuente: propia.

4.2.2.2.1. Cuarteo en la muestra de grava

Para realizar el cuarteo o reducción del agregado grueso, se aplicó el método "B" o cuarteo manual según lo especificado por la normativa NMX-C-170-ONNCCE (NMX-C-170-ONNCCE, 1997). La metodología corresponde a la misma que se aplicó en el agregado fino y la cual se describe a continuación.

Equipo empleado:



- Una pala
- Un Cucharón de punta recta o cuchara de albañil
- Una Escoba

Procedimiento:

1. Se colocó la muestra original sobre un nivel de superficie limpio y duro (en el patio del laboratorio).
2. Se mezcló el material completamente, traspaleando toda la muestra en una pila cónica, depositando cada paleada sobre la anterior. Realizando este paso tres veces de un extremo a otro.
3. Se aplano la parte superior de la pila, ejerciendo presión sobre el vértice por medio de la pala.
4. Se dividió la masa aplanada en cuatro cuartos iguales, utilizando la pala, removiendo y eliminando dos de los cuartos diagonalmente opuestos, incluyendo todo el material fino recogido al barrer los espacios y dejando limpia la zona.
5. De los dos cuartos restantes, se realizó el mismo procedimiento desde el paso 2 al paso 4, hasta alcanzar el tamaño requerido para las siguientes pruebas de caracterización.

4.2.2.2.2. Masa volumétrica seca y suelta (MVSS)

La masa volumétrica de los agregados, como ya se mencionó anteriormente, es la masa del material por unidad de volumen, siendo el volumen ocupado por el material de un recipiente especificado (NMX-C-073-ONNCCE, 2004).

El ensayo para la determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una grava consiste en conocer una masa por unidad de volumen del agregado cuando el acomodo de sus partículas es en forma libre y natural. Dicho ensayo se llevó a cabo siguiendo el procedimiento de la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004 y como a continuación se presenta.

Equipo empleado:

- Una muestra de grava completamente seca
- Un recipiente de masa y volumen conocido

- Una varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro
- Una báscula
- Una pala y un cucharón

Procedimiento:

1. Se vació la grava dentro del recipiente, dejándose caer a una altura de aproximadamente 5 centímetros, medida a partir de la arista superior del recipiente, distribuyendo uniformemente el material y llenando completamente el recipiente hasta colmarlo formando un cono.
2. Enseguida se enrasó el recipiente con la varilla y se limpió, asegurándose de retirar las partículas adheridas en las paredes exteriores procediendo a pesarlo (figura 71).



Figura 71. Determinación de la masa suelta de la grava dentro del recipiente. Fuente: propia.

3. A la masa obtenida anteriormente se le restó la masa del recipiente para obtener la masa suelta de la grava.

Cálculos de la prueba:

$$MVSS = \frac{M}{V}$$

Donde:

MVSS = Masa volumétrica seca y suelta (g/cm³)

M = Masa de la arena (gramos)

V = Volumen del recipiente (cm³)

Resultados:

El método de ensayo para determinar la masa volumétrica seca y suelta, fue aplicado a dos muestras representativas de grava, obteniendo un valor promedio de estas. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 28. Resultados de la Masa Volumétrica Seca y Suelta (MVSS) de la grava.

Muestra	Masa del recipiente (g)	Masa Total (g)	Masa de la arena (g)	Volumen del recipiente (cm ³)	MVSS (g/cm ³)
1	2900	18150	15250	10600	1.439
2	2900	18205	15305	10600	1.443
				PROMEDIO	1.441

4.2.2.2.3. Masa volumétrica seca y varillada (MVSV)

El método de prueba que se siguió para determinar la MVSV de la grava, se describe a continuación, de acuerdo con lo descrito en la normativa correspondiente (NMX-C-073-ONNCCE, 2004).

Equipo empleado:

- Una muestra de grava completamente seca
- Un recipiente de masa y volumen conocido
- Una varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro
- Una báscula
- Una pala y un cucharón

Procedimiento:

1. Se llenó el recipiente a volteo, dejando caer la grava a una altura aproximada de 5 centímetros, en tres capas y dando a cada capa de grava 25 golpes con la varilla punta de bala distribuyéndolos en toda la superficie del material. Se tubo cuidado de que la varilla no penetrará en la capa anterior, al dar el número de golpes correspondientes a la siguiente capa.

2. Posterior al llenado y compactado de las capas, se enrasó el recipiente con la varilla punta de bala y se retiraron todas las partículas que hayan quedado adheridas a las paredes exteriores.
3. Después de haber realizado los pasos anteriores, se pesó el recipiente con el material y se le restó la masa del recipiente para así obtener la masa neta del material.

Cálculos a realizar:

$$M.V.S.V. = \frac{M}{V}$$

Donde:

MVSV= Masa volumétrica seca y varillada (g/cm³)

M = Masa de la arena (gramos)

V = Volumen del recipiente (cm³)

Resultados:

El método de ensayo para determinar la masa volumétrica seca y varillada, fue aplicado a dos muestras representativas de grava, obteniendo un valor promedio de estas. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 29. Resultados de la Masa Volumétrica Seca y Varillada (MVSV) de la grava.

Muestra	Masa del recipiente (g)	Masa Total (g)	Masa de la arena (g)	Volumen del recipiente (cm ³)	MVSS (g/cm ³)
1	2900	19870	16970	10600	1.601
2	2900	19870	16970	10600	1.601
				PROMEDIO	1.601

4.2.2.2.4. Humedad de absorción

La absorción es definida como el incremento en la masa de un agregado seco, cuando es sumergido en agua durante un tiempo determinado a temperatura ambiente; este aumento de masa es debido al agua que se introduce en los poros del material y no incluye el agua



adherida a la superficie de las partículas. Dicha absorción, se expresa como por ciento de la masa seca (y es índice de la porosidad del material) (NMX-C-164-ONNCCE, 2014).

Para obtener el porcentaje de agua que absorbe la grava en estudio, se siguió la metodología descrita por la norma NMX-C-164-ONNCCE (NMX-C-164-ONNCCE, 2014); la cual menciona que para encontrar la cantidad de agua que absorbe el agregado grueso, debe someterse el material a saturación de agua y posteriormente a un secado total. A continuación, se describe la metodología del ensayo.

Equipo empleado:

- Una muestra representativa de aproximadamente 3 kilogramos
- Una báscula con aproximación al décimo de gramo
- Una parrilla eléctrica
- Charolas metálicas
- Cribas de tamaño de 3/4" y 3/8"
- Una franela limpia y seca
- Una espátula
- Un vidrio reloj

Procedimiento:

1. La muestra de aproximadamente 3 kg de grava se mezcló perfectamente y se pasó por la criba de 3/4" y se retuvo en la criba de 3/8", colocando la porción del retenido en una charola metálica.
2. Se puso a saturar la grava con agua, durante $24 \text{ h} \pm 4 \text{ h}$. Dicha muestra se obtuvo mediante el método de cuarteo, de la muestra seca, descrito anteriormente.
3. Al término del tiempo de saturación, con ayuda de la espátula, se colocaron aproximadamente 400 gramos de material sobre la franela; de tal manera que, al cubrir el material con la tela absorbente, se pudo secar superficialmente la grava. Se verificó esto al dejar de percibir un brillo, provocado por el agua, en la superficie de cada una de las partículas.

- Una vez que la grava se encontró en la condición saturada y superficialmente seca, se pesó el material, registrando esta masa, como masa saturada y superficialmente seca (M_{ss}).
- Se colocaron las partículas de grava en una charola metálica, para posteriormente ponerla en contacto con la parrilla eléctrica y así eliminar el total de agua que contenía la muestra.



Figura 72. Grava sometida a saturación, secado superficial y secado total (paso 2 al 5). Fuente: propia.

- Para saber cuándo el material está seco completamente, se colocó el cristal sobre el material hasta observar que dicho cristal no se empañara; en ese momento, se retiró el material de la fuente de calor y se dejó enfriar a temperatura ambiente, procediendo a pesarlo y registrándolo como masa de la muestra seca (M_s).

Cálculos de la prueba:

$$A = \frac{M_{ss} - M_s}{M_s} * 100$$

Donde:

A = Es la humedad de absorción, en %

M_{ss} = Masa de la muestra saturada y superficialmente seca (gramos)

M_s = Masa de la muestra seca (gramos)

Resultados:

El método de ensayo para determinar el porcentaje de humedad de absorción, se realizó para tres muestras tomadas de la charola donde se encontraba el material saturado con agua. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 30. Resultados de humedad de absorción del agregado grueso.

Muestra	Mss (g)	Ms (g)	A (%)
1	414.6	406.5	1.99
2	418.6	410.4	2.00
3	418.4	410.2	2.00
		PROMEDIO	2.00

4.2.2.2.5. Densidad

La densidad del agregado grueso, de acuerdo con la norma NMX-C-164-ONNCCE (NMX-C-164-ONNCCE, 2014), es la relación de la densidad del agregado saturado y superficialmente seco a la densidad del agua, equivalente a la relación de la masa del agregado saturado superficialmente seco a la masa del volumen del agua desalojada, considerando la masa de las partículas saturadas de agua y superficialmente secas y la masa de las partículas de agua que se incluyen en los poros que se encuentran dentro de las mismas.

El método de ensayo para conocer la densidad de una grava, tiene como objetivo determinar el volumen absoluto de las partículas de grava en masa por unidad de volumen. El ensayo se desarrolló como a continuación se presenta.

Equipo empleado:

- Una muestra representativa de aproximadamente 3 kilogramos
- Una báscula con aproximación al décimo de gramo
- Charolas metálicas
- Cribas de tamaño de 3/4" y 3/8"
- Una franela limpia y seca
- Probeta graduada
- Un picnómetro

Procedimiento:



1. La muestra de aproximadamente 3 kg de grava se mezcló perfectamente y se pasó por la criba de 3/4" y se retuvo en la criba de 3/8", colocando la porción del retenido en una charola metálica.
2. Se puso a saturar la grava con agua, durante $24 \text{ h} \pm 4 \text{ h}$. Dicha muestra se obtuvo mediante el método de cuarteo, de la muestra seca, descrito anteriormente.
3. Al término del tiempo de saturación, con ayuda de la espátula, se colocaron aproximadamente 400 gramos de material sobre la franela; de tal manera que, al cubrir el material con la tela absorbente, se pudo secar superficialmente la grava. Se verificó esto al dejar de percibir un brillo, provocado por el agua, en la superficie de cada una de las partículas.
4. Una vez que la grava se encontró en la condición saturada y superficialmente seca, se pesó el material, registrando esta masa, como masa saturada y superficialmente seca (M_{ss}).
5. Se llenó el picnómetro de agua (hasta el nivel del orificio de salida), se colocó en una superficie plana y se procedió a colocar la muestra de grava dentro del picnómetro con agua, de tal manera que, al ingresar cada una de las partículas del agregado (en forma lenta), no saltaran partículas de agua fuera del picnómetro y recibiendo el agua desalojada por el material en la probeta graduada.
6. Una vez que se terminó de colocar toda la muestra dentro del picnómetro, se dejó que se escurriera en su totalidad el agua desalojada y se procedió a medir el volumen de agua contenido en la probeta.

Cálculos de la prueba:

$$D = \frac{M_{ss}}{V}$$

Donde:

D = densidad de la grava (g/cm^3)

M_{ss} = masa de la grava saturada y superficialmente seca (gramos)

V = Volumen desalojado por la grava (cm^3)

Resultados:

Los resultados de densidad de la grava, fueron los siguientes:

Tabla 31. Resultados de la densidad del agregado grueso.

Muestra	Msss (g)	V (cm ³)	D (g/cm ³)
1	402.4	150	2.68
2	392.4	145	2.71
3	300.4	110	2.73
		PROMEDIO	2.71

4.2.2.2.6. Análisis granulométrico y tamaño máximo del agregado grueso

La norma NMX-C-159-ONNCCE (NMX-C-159-ONNCCE, 2016) define al tamaño máximo nominal como la dimensión de la criba de menor abertura por la que pasa la totalidad de un agregado con tolerancias en cuanto al retenido en dicha criba de 10%.

El tamaño máximo del agregado grueso influye en la economía del concreto. Normalmente, se requiere más agua y cemento en concretos con agregados gruesos de tamaño máximo menor si comparado con agregados de tamaño máximo mayor, debido al aumento del área superficial total del agregado (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004).

La norma NMX-C-11-ONNCCE-2014 menciona que el agregado grueso, para mezclas de concreto hidráulico, deberá estar dentro de los límites establecidos en la tabla 32 (tabla resumida para un tamaño nominal de agregado de entre 3/4" a 3/8") y contenida su curva granulométrica dentro de los límites representados en la figura 73. De no cumplir con lo anterior, se podrá realizar un ajuste en los tamaños del material para compensar las deficiencias en la granulometría, siempre y cuando se haga un ajuste apropiado para utilizarlo en una mezcla de concreto.

Tabla 32. Límites de granulometría para agregado grueso de tamaño nominal de entre 3/4" a 3/8".

Criba mm (pulgadas)	% que Pasa
25 (1")	100
19 (3/4")	90 – 100
12.5 (1/2")	20 – 55
9.5 (3/8")	0 – 15
4.75 (No. 4)	0 – 5

2.36 (No. 8)	-
1.18 (No. 16)	-

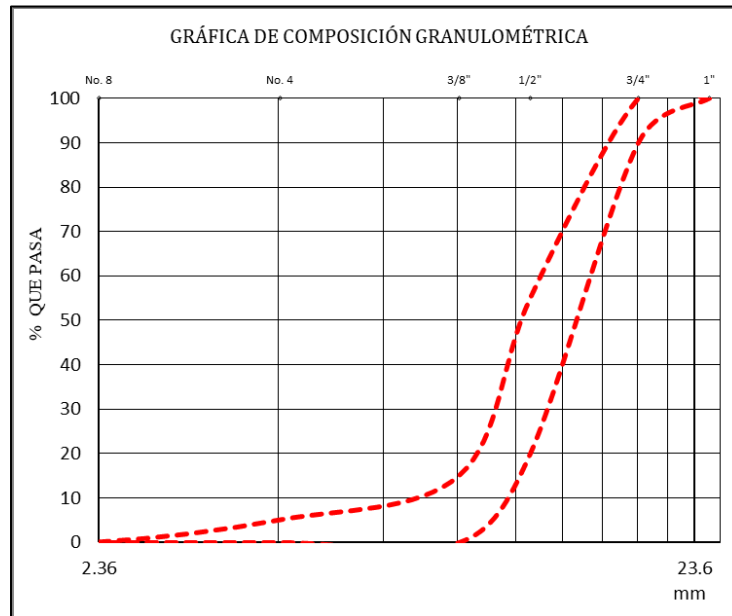


Figura 73. Límites de granulometría en grava para mezclas de concreto. Fuente: propia.

A continuación, se presenta una metodología práctica del ensayo para la determinación de la granulometría en el agregado grueso, basada en la norma NMX-C-077-ONNCCE (NMX-C-077-ONNCCE, 1997).

Equipo empleado:

- Una muestra representativa de grava de aproximadamente 15 kilogramos
- Un juego de mallas o cribas con abertura cuadrada de 37.5 mm (1 ½”), 25 mm (1”), 19 mm (3/4”), 12.5 mm (1/2”), 9.5 (3/8”) y 4.75 mm (No. 4)
- Un juego de charolas metálicas para recibir el material que se retiene en cada una de las mallas
- Una báscula con aproximación al décimo de gramo
- Un recipiente de 10 litros

Procedimiento:

1. Del agregado grueso llevado al laboratorio, se puso a secar una muestra de grava, enseguida se llenó el recipiente de 10 litros (empleando el método por cuarteo) y se pesó el material contenido, identificando dicha masa como masa de la muestra (Mm).
2. Enseguida se pasó la grava a través de las cribas (figura 74), colocándolas de menor a mayor abertura (dos cribas del mismo tamaño en cada charola metálica). Al hacer pasar el material por la primera malla, se agitó con la mano, de tal manera que las partículas de menor tamaño pasen por la abertura y las de mayor tamaño retenidas en la criba, se hagan pasar a la siguiente criba.



Figura 74. Cribado del agregado grueso por medio del método manual. Fuente: propia.

3. Cuando se terminó de vaciar toda la muestra, para su cribado, se procedió a extraer el material retenido en cada una de las charolas y se colocó el material en la báscula para conocer la masa retenida de cada una de las cribas.
4. Se registraron las masas, de las diferentes porciones de agregado grueso, en una tabla como la que a continuación se presenta y calculando como resultado:
 - El porcentaje del material retenido entre dos cribas consecutivas,
 - El porcentaje del material retenido acumulado en cada criba y
 - El porcentaje total del material que pasa cada criba.

Tabla 33. Tabla para el registro de la masa retenida en los tamices requeridos para el análisis granulométrico en gravas.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Malla	Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que Pasa (%)
1"				
¾"				



½"				
3/8"				
No. 4				
Pasa No. 4				
Total				

Cálculos de la prueba:

1. Teniendo como referencia, la numeración de las columnas de la tabla 33, se anotaron las masas retenidas de cada una de las mallas en la columna (2).
2. El porcentaje retenido (columna 3) se calculó de la siguiente manera:

$$\% \text{ Retenido} = \frac{\text{Masa Retenida}}{\text{Masa Total Retenida}} * 100$$

3. El Porcentaje Retenido Acumulado (columna 4) se calculó a partir de los datos de la columna (3) como sigue:

$$\begin{aligned} & \% \text{ Retenido Acumulado} \\ &= \% \text{ Retenido de la malla} \\ &+ \% \text{ Retenido Acumulado de la malla anterior} \end{aligned}$$

4. El Porcentaje que Pasa (%) se calculó de la siguiente manera:

$$\% \text{ que pasa} = 100 - \% \text{ Retenido Acumulado de la malla}$$

Resultados:

El análisis granulométrico de la grava se realizó en dos muestras representativas de grava y cuyos valores arrojaron un tamaño máximo nominal de ¾" y una curva granulométrica fuera de los límites para concreto hidráulico (figura 75 y 76), sin embargo, se empleó en el diseño de mezclas, tal cual se adquirió del banco de material puesto que, la normativa (NMX-C-111-ONNCCE, 2014) permite emplear el agregado grueso siempre y cuando se demuestre que el concreto presenta un comportamiento adecuado de trabajabilidad y resistencia

mecánica, como fue el caso de las mezclas de concreto elaboradas en la presente investigación.

La distribución de tamaños fue la siguiente:

- Muestra 1

Tabla 34. Análisis granulométrico de la grava - muestra No. 1.

Malla	Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que Pasa (%)
1"	0.00	0.00	0.00	100
¾"	7660.00	45.45	45.45	54.55
½"	7080.00	42.01	87.45	12.55
3/8"	1565.00	9.29	96.74	3.26
No. 4	470.00	2.79		0.47
Pasa No. 4	80.00	0.47	99.53	0.00
Total	16855.00	100.00	100.00	100.00

○ Distribución granulométrica

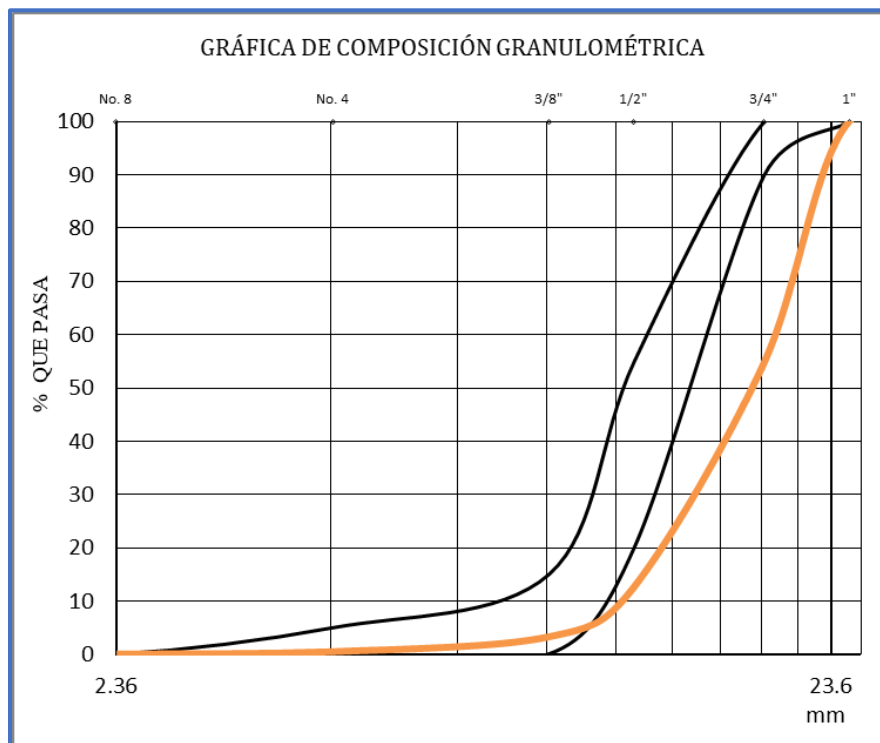


Figura 75. Curva granulométrica de la muestra 1 de grava. Fuente: propia.

▪ Muestra 2

Tabla 35. Análisis granulométrico de la grava - muestra No. 2.

Malla	Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que Pasa (%)
1"	60.00	0.35	0.35	99.65
¾"	7930.00	46.81	47.17	52.83
½"	6860.00	40.32	87.49	12.51
3/8"	1520.00	8.97	96.46	3.54
No. 4	420.00	2.48	98.46	1.06
Pasa No. 4	180.00	1.06	98.94	0.00
Total	16940.00	100.00	100.00	100.00

○ Distribución granulométrica

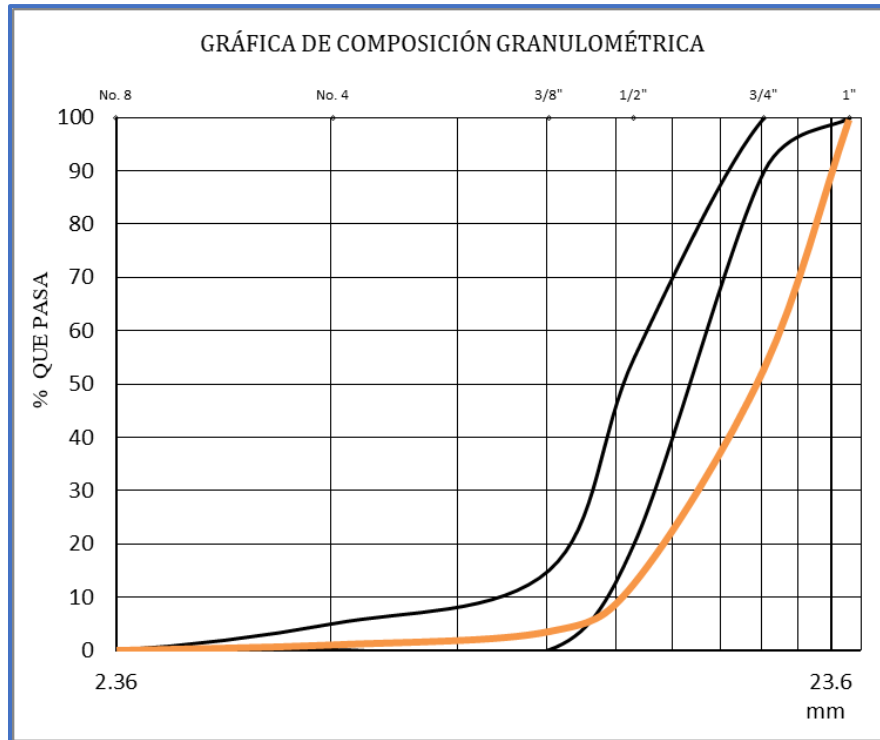


Figura 76. Curva granulométrica de la muestra 2 de grava. Fuente: propia.



4.2.2.2.7. Resistencia a la degradación del agregado grueso mediante la máquina de Los Ángeles

La resistencia a la abrasión (desgaste) de un agregado frecuentemente se usa como un índice general de su calidad. La resistencia a la abrasión es esencial cuando el agregado se usará en un concreto sujeto al desgaste, como en los pisos para servicio pesado o pavimentos. La baja resistencia al desgaste de un agregado puede aumentar la cantidad de finos en el concreto durante el mezclado y, consecuentemente, puede haber un aumento en la demanda de agua, requiriéndose ajustes de la relación agua-cemento (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004).

Según la norma mexicana establecida por la SCT (N-CMT-4-06-001, 2019), referente a la calidad de agregados para carpetas de concreto hidráulico, los agregados gruesos probados al desgaste tendrán una pérdida, en masa, del cuarenta (40) por ciento como máximo. Dicha pérdida se determinará en muestras de agregados cuyos tamaños nominales sean los que se van a emplear en la elaboración del concreto. El procedimiento de prueba que se siguió en esta investigación está basado en el Manual de la SCT (M-MMP-2-02-032, 2018) y el cual se describe a continuación.

Equipo empleado:

- Una muestra representativa de grava
- Máquina de Los Ángeles
- Un Juego de mallas o cribas
- Un horno de secado
- Una balanza con capacidad de 20 kg y aproximación al décimo de gramo
- Un cucharón
- Charolas metálicas
- Agua

Procedimiento:

1. Se obtuvo una muestra representativa de grava mediante el método de cuarteo, ya antes descrito, hasta obtener una muestra de aproximadamente 40 kg.
2. La muestra resultante se lavó mediante un chorro de agua para eliminar el polvo adherido y posteriormente se ingresó en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta masa constante.
3. Se extrajo el material limpio y seco del horno y se realizó la separación de tamaños de la muestra mediante el método de análisis granulométrico, mencionado en el apartado anterior, eliminando el material que pasa la malla No. 8 (2.36 mm).
4. Una vez separado y clasificado el material de la muestra, se eligió de la tabla 36, descrita en el manual de la SCT, el tipo de composición que se emplearía para integrar la muestra de prueba y que mejor se apegó a las características granulométricas de la muestra representativa.

Tabla 36. Composición de la muestra de prueba y cargas abrasivas (M-MMP-2-02-032, 2018).

Tipo de composición de la muestra de prueba	Rango de tamaños		Masa de la fracción g	Carga abrasiva	
	mm	Designación		Número de esferas	Masa total g
A	25 – 37.5	1 – 1 ½ in	1250 ± 25	12	5000 ± 25
	19 – 25	¾ in – 1 in	1250 ± 25		
	12.5 – 19	½ in – ¾ in	1250 ± 10		
	9.5 – 12.5	3/8 in – ½ in	1250 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5000 ± 10		
B	12.5 – 19	½ in – ¾ in	2500 ± 10	11	4584 ± 25
	9.5 – 12.5	3/8 in – ½ in	2500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5000 ± 10		
C	6.3 – 9.5	¼ in – 3/8 in	2500 ± 10	8	3330 ± 20
	4.75 – 6.3	No. 4 – ¼ in	2500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5000 ± 10		
D	2.36 – 4.75	No. 8 – No. 4	5000 ± 10	6	2500 ± 15
E	67 – 75	2 ½ in – 3 in	2500 ± 25	12	5000 ± 25
	50 – 63	2 in – 2 ½ in	2500 ± 25		
	37.5 – 50	1 ½ in – 2 in	5000 ± 25		

	Masa total de la muestra de prueba		10000 ± 10		
F	37.5 – 50	1 ½ in – 2 in	5000 ± 25	12	5000 ± 25
	25 – 37.5	1 in – 1 ½ in	5000 ± 25		
	Masa total de la muestra de prueba		10000 ± 10		
G	25 – 37.5	1 in – 1 ½ in	5000 ± 25	12	5000 ± 25
	19 – 25	¾ in – 1 in	5000 ± 25		
	Masa total de la muestra de prueba		10000 ± 50		

- Se integró la muestra de prueba con las proporciones correspondientes a cada rango de tamaños de la composición “B” de la tabla anterior y con ayuda de la balanza se obtuvo la masa de la muestra (figura 77. a), registrándola como P_i .
- Se ingresó el material a la máquina de Los Ángeles, se ingresaron las 11 esferas requeridas (figura 77. b), se selló la máquina con su tapa (figura 77. c) y se hizo funcionar a una velocidad angular de 30 a 33 rpm, durante 500 revoluciones.
- Una vez pasado este tiempo, se retiró el material del interior de la máquina depositándolo en una charola (figura 77. d) y se desechó la fracción de la muestra que pasa la malla No. 12 (1.7 mm).



Figura 77. Metodología del ensayo de desgaste del agregado grueso. Fuente: propia.

- Del material retenido en la malla No. 12, se llevó a lavado con un chorro de agua y se secó en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta masa constante.
- Finalmente se dejó enfriar la muestra a temperatura ambiente, para determinar su masa (figura 77. e), registrándola como P_f .

Cálculos de la prueba:

El porcentaje de pérdida de masa, por desgaste del agregado grueso, se calculó empleando la siguiente expresión:

$$P_a = \left(\frac{P_i - P_f}{P_i} \right) \times 100$$

Donde:

P_a = degradación por trituración mediante la máquina de Los Ángeles

P_i = masa inicial de la muestra de prueba (g)

P_f = masa final del material de la muestra de prueba mayor de 1.7 mm (g)

Resultados:

El ensayo para conocer el porcentaje de degradación de la grava en estudio se realizó en dos muestras representativas y cuyos resultados fueron los siguientes:

Tabla 37. Resultados del porcentaje de degradación por trituración mediante la máquina de Los Ángeles.

No. Muestra	P_i (g)	P_f (%)	P_a (%)
1	5000	4119	17.62
2	5000	4129	17.42
	PROMEDIO		17.52

4.2.3. Caracterización del Agua

Como ya se ha mencionado anteriormente, el agua es el componente que se utiliza para generar las reacciones químicas en los cementantes del concreto hidráulico. La incorporación de cualquier agua natural que sea potable; es decir, aquella que por sus características químicas y físicas es útil para el consumo humano, puede ser utilizada como agua de mezcla en la elaboración del concreto hidráulico. Sin embargo, también se pueden emplear en el concreto algunas aguas que no se consideren potables pero que cumplen con requisitos de calidad establecidos por normativas vigentes (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004), (N-CMT-2-02-003, 2002).

El agua que se utilizó en la presente investigación fue proveniente de la red de agua potable del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Universidad Michoacana de San

Nicolás de Hidalgo, la cual cuenta con un reporte de calidad, realizado en el año 2014, por el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, quienes expidieron los resultados conforme a la normativa mexicana NMX-C-122-ONNCCE (NMX-C-122-ONNCCE, 2004) y cuyos valores se representan en la siguiente tabla:

Tabla 38. Resultados del análisis de una muestra de agua potable emitido por el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil.

Estudio de una muestra de agua potable de la Red de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo				
Sitio de muestreo:	Laboratorio de Materiales			
Fecha de muestreo:	18 de mayo de 2014			
Norma de referencia:	Agua para Concreto – Especificaciones (NMX-C-122-ONNCCE-2004)			
Parámetro	Resultado	Límite Permissible	Unidades	Método Utilizado
pH	7.86	> 6	U pH	NMX-AA-008-SCFI-2000
Temperatura	29.8	-----	°C	NMX-AA-007-SCFI-2000
Conductividad eléctrica	456	-----	µs/cm	NMX-AA-093-SCFI-2000
Sólidos Disueltos Totales	352	3500	mg/L	NMX-AA-034-SCFI-2001
Oxígeno Disuelto	3.37	-----	mg/L	NMX-AA-012-SCFI-2001
Sulfatos	5	3000	mg/L	NMX-AA-074-1981
Cloruros	13.36	400	mg/L	NMX-AA-073-SCFI-2001
Dureza Cálctica	21	-----	mg/L CaCO ₃	Volumétrico
Sales de Magnesio	5	100	mg/L	Volumétrico

De acuerdo con los resultados que se observan en la tabla 38, el agua que se utilizó en la elaboración y curado de las mezclas de concreto hidráulico, cumplió con los límites permisibles de la normativa correspondiente.

4.2.4. Caracterización de los materiales empleados como adición en el concreto

4.2.4.1. Fibras de PET (PR)

Las fibras creadas y utilizadas en la presente investigación se clasifican dentro del grupo de las macrofibras, siendo de origen sintético, obtenidas del reciclaje mecánico de botellas de plástico de PET.

El objetivo principal de utilizar este tipo de fibras, está ligado a:

1. Crear un material sustentable a partir del reciclaje de botellas de PET post-consumo.
2. Mejorar la calidad del concreto hidráulico para uso en pavimentos rígidos y así:
 - ✚ Reducir la fisuración por asentamiento (revenimiento)
 - ✚ Reducir la fisuración por contracción plástica y por secado
 - ✚ Disminuir la permeabilidad
 - ✚ Incrementar la resistencia residual aportando tenacidad y ductilidad
 - ✚ Incrementar la resistencia a la abrasión y al impacto
3. Sustituir, en el mejor de los casos, el acero de refuerzo y/o la malla electrosoldada dentro de la matriz cementicia en elementos como losas y prefabricados.

4.2.4.1.1. Características de las fibras en estudio

En la presente investigación se creó una macrofibra de origen sintética, identificada como “PR”, que por sus características y geometría se denominó fibra o macrofibra de tereftalato de polietileno (PET). Presenta un color verde y transparente con un cuerpo en forma recta, una sección transversal rectangular y una superficie rayada para garantizar la adherencia con la matriz de concreto hidráulico.

En la tabla 39 se presentan las características específicas de las fibras creadas para adicionarlas a mezclas de concreto hidráulico. El análisis de las dimensiones, forma y textura de las fibras se llevó a cabo en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil – UMSNH. La figura 78, ilustra la apariencia de la fibra obtenida a partir del reciclaje de botella post-consumo.

Tabla 39. Características de las fibras.

Nombre de la fibra	L = Longitud promedio, mm	d = diámetro promedio, mm	Relación L/d	Peso, g/mm ³	Masa de fibras/botella reciclada, g/botella 2L
Fibra de PET Reciclado (PR)	38.1 (1 ½")	3.2	11.9	0.00138	18.27



Figura 78. Obtención de las fibras de PET Reciclado; a la izquierda hilos provenientes de botellas de PET post-consumo, a la derecha fibras de PET Reciclado (PR). Fuente: propia.

Las fibras de PET, creadas en esta investigación, presentan una serie de ventajas en su estructura, una vez que se fabrican para adicionarlas a la mezcla de concreto, las cuales se presentan a continuación:

- ✚ Es un material con larga vida útil; material no biodegradable
- ✚ Fácil de maniobrar (por su densidad característica del PET de 1.33 g/cm³)
- ✚ Fácil de colocar dentro de la mezcla de concreto hidráulico
- ✚ Refuerzan al concreto en tres dimensiones
- ✚ No presenta riesgo a la corrosión a diferencia de otras fibras metálicas
- ✚ Presenta una alta resistencia química y no se deforma en presencia de temperaturas altas.
- ✚ No presentan degradación con los compuestos producidos dentro de los poros del concreto (Flores Fernández, 2014).

4.2.4.1.2. Elaboración y/o acondicionamiento de las fibras de PET

Para el desarrollo de las fibras de PET, se utilizó una metodología basada en el reciclaje mecánico de plásticos, el cual consistió en destruir físicamente envases post-consumo de PET, provenientes de refrescos, hasta alcanzar hilos con un diámetro de 3.2 mm.

El tiempo necesario para obtener hilos continuos de PET de hasta 14 metros, por botella reciclada, osciló aproximadamente entre 3 y 5 minutos, y se pretende que el tiempo sea menor al llevar a cabo en trabajos futuros un prototipo más mecanizado.

La producción de fibras de PET se realizó en cinco etapas distintas, las cuales se detallan a continuación:

1. Recolección de botellas de PET post-consumo

La primera etapa para la obtención de las fibras de PET, se llevó a cabo mediante una campaña de recolección de botellas de PET, creada dentro del Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil-UMSNH. La campaña de recolección constó de solicitar a los alumnos, maestros y trabajadores, mediante anuncios publicitarios (figura 79), el no tirar a la basura todo tipo de botellas de PET que desocupaban, una vez que consumían las bebidas refrescantes y sí, por el contrario, las depositaran en contenedores de reciclaje.



Figura 79. Anuncio publicitario para el reciclaje de botellas de PET. Fuente: propia.

2. Selección y lavado de botellas de refresco de 2 litros de la marca Coca-Cola y Squirt®

Las botellas recolectadas se seleccionaron de acuerdo a la forma y textura homogénea del envase; siendo así, las de mejores características físicas las botellas de refresco de 2 litros de la marca Coca-Cola y Squirt®.

Posteriormente, a las botellas seleccionadas se les retiró las etiquetas y tapas, se lavaron con agua limpia de grifo y se dejaron secar hasta no presentar ningún líquido o material extraño dentro y fuera del envase.

3. Corte de las botellas de PET mediante una máquina de corte o fileteador

Para la fase de obtención de las fibras se fabricó, mediante un método económico y sustentable, una máquina de corte o fileteador práctico; construida con materiales reciclados (figura 80) y la cual producía hilos de PET con un diámetro (ancho) de 3.2 mm.



Figura 80. Fabricación de la máquina de corte a base de materiales reciclados. Fuente: propia.

Se utilizó en la producción de los hilos, sólo el 55% del total del plástico de las botellas recicladas, descartando los extremos, ya que, estas partes no podían ser cortadas por la máquina fileteadora puesto que su forma y textura no era homogénea con el centro de las botellas.

El proceso de producción, inicia al cortar la parte inferior de la botella con ayuda de una navaja (figura 81. a), para después ingresar el diámetro mayor del envase a una varilla delgada (posicionada de manera vertical) la cual servirá como eje para que la botella gire una vez que el extremo inicial del hilo de PET (elaborado manualmente con unas tijeras) se haga pasar por debajo de la navaja de la máquina de corte (figura 81. b) y así obtener los hilos de PET (figura 81. c).

El corte para la obtención de aproximadamente 14 metros de hilo de PET, termina cuando se llega al extremo superior de la botella como se muestra en la figura 81. d.



Figura 81. Proceso de producción del hilo de PET: a) corte del extremo inferior de la botella de PET, b) giro de la botella al accionar la máquina de corte, c) obtención de hilos de PET, d) extremo superior de la botella de PET. Fuente: propia.

4. Rayado en la superficie de los hilos de PET obtenidos

Con el objetivo de obtener una buena adherencia entre el concreto y las fibras de PET, se realizó un rayado a los hilos de PET figurando una textura rugosa en la superficie del material.

El rayado se llevó acabo de manera manual (figura 82. a), con ayuda de una lija de grado 50 marca FANDELI; haciendo pasar el hilo de PET por la lija (de 3 a 4 veces) hasta alcanzar el rayado deseado. La figura 82. b, muestra la textura final de los hilos de PET.



Figura 82. Rayado de la superficie del hilo de PET: a) método manual de rayado, b) textura final de la superficie del hilo de PET. Fuente: propia.

5. Obtención de las fibras de PET mediante el corte manual

Las fibras de PET que se emplearon como refuerzo en las mezclas de concreto de esta investigación, fueron cortadas con ayuda de tijeras (figura 83), en segmentos de 38.1 mm de longitud y se almacenaron en una bolsa de plástico hasta el día de elaboración del concreto.



Figura 83. Corte del hilo de PET para la obtención de las fibras de PET.

4.2.4.1.3. Descripción de la máquina de corte o fileteador.

La máquina de corte o fileteador creado en esta investigación, es capaz de transformar botellas de refresco post-consumo en hilos de PET, como ya se ha mencionado anteriormente.

El equipo hace pasar del extremo inferior de la botella, un hilo cortado manualmente, a través de un dispositivo filoso y así obtener hilos de longitudes de hasta 14 metros lineales, con solo imprimir un poco de fuerza al jalar el hilo una vez que este pase por el dispositivo de corte. A continuación, se muestra el diseño del equipo creado.

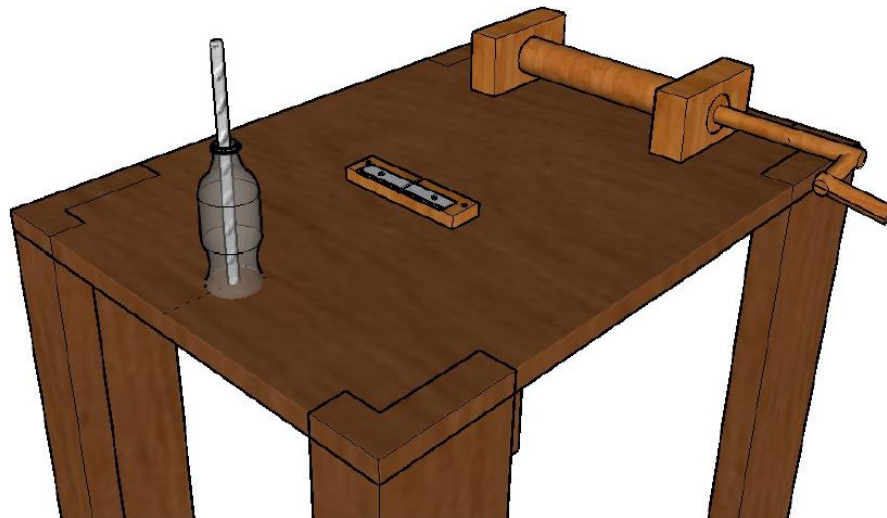


Figura 84. Máquina cortadora o fileteador. Fuente: propia.

Una vez elaborado el fileteador, se debió entender su mecanismo para la obtención del hilo de PET; de tal manera que, al girar la manivela de la máquina, el hilo se fuera enrollando en el rodillo giratorio hasta terminar con el material de la botella de PET.

4.2.4.1.4. Especificaciones del uso de las fibras en el concreto hidráulico

Las fibras de PET obtenidas en esta investigación, se caracterizaron por tener dimensiones de 3.2 mm de diámetro (ancho) por 38.1 mm de largo. El porcentaje que se empleó de fibras, para ser utilizadas como refuerzo en mezclas de concreto, fue de 0.8% de la masa del cemento.

Con el objetivo de obtener mezclas de concreto con fibras perfectamente distribuidas, el proceso de fabricación del concreto hidráulico y la colocación de las fibras de PET se hizo de la siguiente manera:

- 1) Mezclado del agregado grueso con un 60% del agua, durante un tiempo aproximado de 1 minuto.
- 2) Incorporación del cemento.
- 3) Incorporación del agregado fino.
- 4) Mezcla de todos los componentes e incorporación del resto del agua, durante un tiempo aproximado de 3 minutos.
- 5) Incorporación de las fibras de PET y un mezclado de todos los materiales, durante un tiempo aproximado de 3 minutos.



Figura 85. Vaciado de las fibras de PET a la mezcladora estacionaria. Fuente: propia.

4.2.4.2. PET molido (PM)

En la presente investigación, se utilizaron dos tipos de PET como adición a la mezcla de concreto convencional, como ya vimos anteriormente, el primero de ellos fueron las tiras o fibras de PET y un segundo material fueron partículas pequeñas de PET molido. El PET molido fue proporcionado por una “recicladora” ubicada en el Parque Industrial de la ciudad de Morelia y adquirido para esta investigación con la finalidad de:

1. Verificar y validar resultados respecto al desempeño mecánico de mezclas de concreto con adiciones de este material en investigaciones hechas en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil-UMSNH.
2. Mejorar la calidad del concreto hidráulico, ocupando el PET molido los espacios o vacíos que se crean al elaborar el concreto y así reducir las grietas por contracción plástica del concreto, pero sin asumir funciones estructurales.

4.2.4.2.1. Características del PET molido

El material de PET molido o triturado, identificado como “PM”, tiene un tamaño de partícula similar al que presentan los agregados finos, puesto que pasa en su totalidad por una criba con abertura cuadrada de 2.36 mm (No. 8). El material en conjunto presenta un color transparente (figura 86), cuya procedencia es del reciclaje mecánico de botellas de PET post-consumo, hasta el proceso de molienda.



Figura 86. PET molido (PM) empleado en la investigación. Fuente: propia.

El PET molido (PM) fue empleado en mezclas de concreto hidráulico como una adición respecto a la masa del cemento del 0.8% y su incorporación dentro de la mezcla fue

empleando la misma metodología de fabricación que en mezclas de concreto hidráulico con fibras de PET (apartado 4.2.4.1.4.).

4.2.4.3. Ceniza de Bagazo de Caña (CBC)

La ceniza de bagazo de caña (CBC) utilizada en esta investigación, es un polvo fino con residuos de caña, obtenido del Ingenio Azucarero Lázaro Cárdenas S.A. de C.V., ubicado en las afueras del poblado de Taretan, Michoacán, y llevado al Laboratorio de Resistencia de Materiales para ser almacenado hasta antes del proceso de molienda.

El proceso de molienda que se le realizó a la CBC fue con la finalidad de obtener un material tan fino que adquiriera tamaños de partícula tan finos que se asemejara a las partículas del cemento y así existiera una reacción química satisfactoria con la pasta contenida en el concreto hidráulico.

Para la obtención del producto final de CBC se realizó la siguiente metodología:

1. Se colocó el residuo tal cual fue adquirido del ingenio en charolas metálicas, procurando vaciar y dispersar el material en toda el área de la charola y hasta alcanzar un espesor del material de aproximadamente 2 cm.
2. Una vez colocado el material en las charolas metálicas, se ingresó a un horno de secado hasta que perdiera toda la cantidad de agua adquirida de forma natural. Para esto, la CBC fue sometida a una temperatura de 50 ± 5 °C y se registró su masa cada 24 horas hasta obtener masa constante.



Figura 87. Secado de la CBC en el horno a temperatura de 50 ± 5 °C. Fuente: propia.

3. Ya seca la ceniza, se ingresó a un tambor giratorio (máquina de Los Ángeles) en porciones de 6 kg para ser molida por 12 esferas de acero, las cuales al ser accionado

el tambor hicieron la molienda del material. Se accionó el tambor giratorio por un tiempo aproximado de 10 minutos para cada porción de CBC.



Figura 88. Molienda de la CBC en el tambor giratorio (máquina de Los Ángeles). Fuente: propia.

4. Se extrajo la porción de CBC y se guardó en una bolsa de plástico impermeable.
5. Se repitió el paso 3 y 4 hasta alcanzar un total de 38.7 kg de material seco y molido.
6. La CBC se resguardó en un sitio libre de humedad y hasta el día de elaboración de las mezclas de concreto.

4.2.4.3.1. Características de la CBC en estudio

La ceniza de bagazo de caña (CBC) presenta una apariencia de color negro con una distribución de tamaños en diferentes diámetros, obteniendo una cantidad mayor retenida en el tamaño de 0.075 mm (34% del material pasó la malla No. 200). La tabla 40 y figura 89 muestra la distribución de tamaños de partículas que adquirió la CBC después de la molienda.

Tabla 40. Análisis granulométrico de la CBC.

Malla (mm)	Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que Pasa (%)
16 (1.18)	0.00	0.00	0	100
50 (0.30)	43.6	14.31	14	86
100 (0.15)	70.6	23.18	37	63
200 (0.075)	86.6	28.43	66	34
Charola	103.8	34.08	100	0
Total	304.6	100.00		



Figura 89. Distribución de tamaños de la CBC. Fuente: propia.

Después de realizar el análisis granulométrico en la CBC, se llegó a la conclusión que se adicionaría la CBC en las mezclas de concreto hidráulico, tal cual salió de la molienda ya que querer adicionar CBC que pasara únicamente por la malla No. 200 (0.075 mm), sería muy costoso por la energía producida en el cribado y porque se necesitaría mucho material de residuo.

Dentro de las investigaciones llevadas a cabo por el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil (UMSNH), en el año 2013, Arreola Sánchez (Arreola Sánchez, 2013) llevó a cabo pruebas para la caracterización a nivel microestructura de la ceniza orgánica adquirida en el ingenio azucarero “Lázaro Cárdenas” y cuyas características fueron evaluadas únicamente del material que pasa la malla No. 200 (75 μm). Los resultados fueron los siguientes:

TAMAÑO DE PARTICULA

La CBC presenta una distribución uniforme de tamaños entre 10 μm y 100 μm , obtenida mediante una prueba de microscopía electrónica, y cuyos resultados se observa en las siguientes figuras:

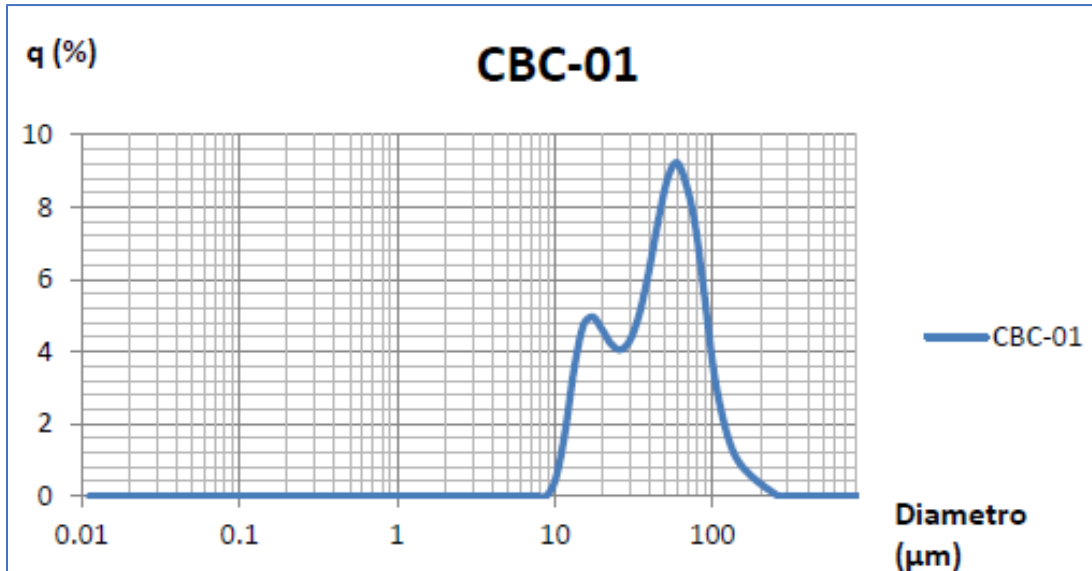


Figura 90. Tamaño de partícula de la CBC. Fuente: Arreola Sánchez, 2013.

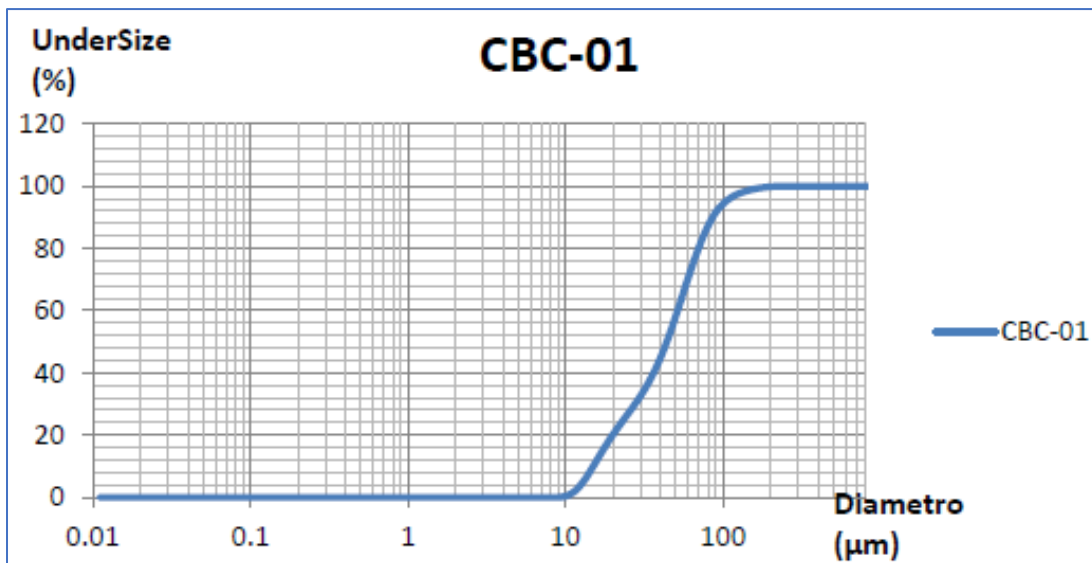


Figura 91. Distribución del tamaño de partícula de la CBC. Fuente: Arreola Sánchez, 2013.

DIFRACCIÓN DE RAYOS X

La estructura de la CBC, obtenida mediante el análisis de fases, es una estructura completamente amorfa (figura 92), lo cual la coloca como una ceniza con alto potencial puzolánico.

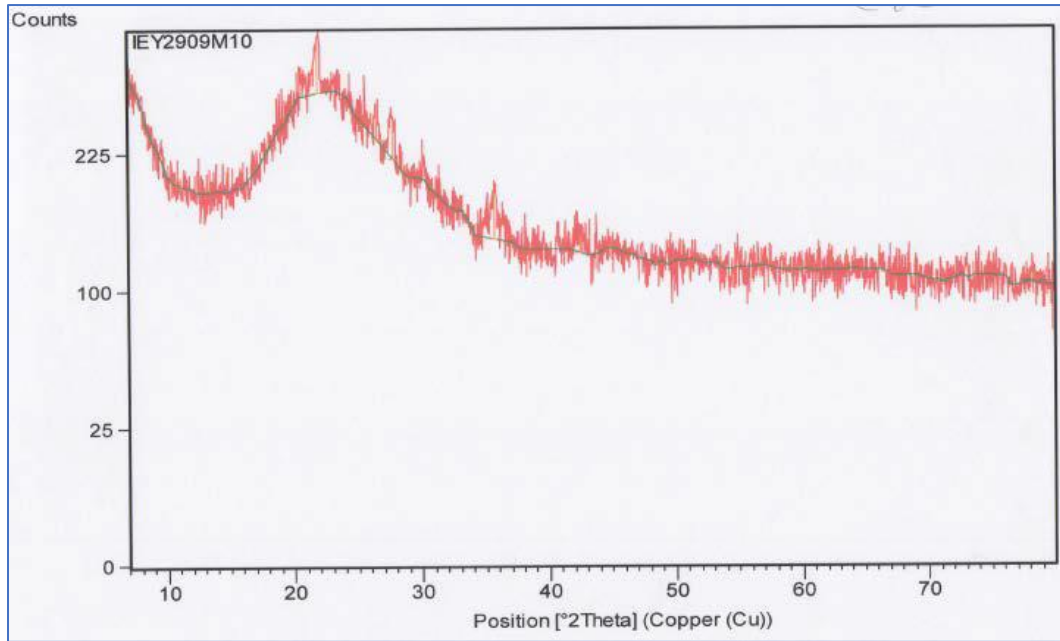


Figura 92. Difractograma de la CBC. Fuente: Arreola Sánchez, 2013.

FLUORESCENCIA DE RAYOS X

La composición química de la CBC, se muestra en la tabla 41, la cual presenta el contenido de óxidos deseados para la actividad puzolánica con un valor de 66.4%, clasificándola como una puzolana tipo C según la norma ASTM C618.

Tabla 41. Composición química de la CBC. Fuente: Arreola Sánchez, 2013.

CBC			
Componente	%	Componente	%
SiO ₂	56.62	SO ₃	0.244
Al ₂ O ₃	4.293	ZrO ₂	0
TiO ₂	0.422	Cl	0
Fe ₂ O ₃	5.488	Cr ₂ O ₃	0
MgO	1.573	SrO	0.057
MnO	0.227	ZnO	0
CaO	2.013	PXC/PPI	26.65
Na ₂ O	0.240	BaO	0
K ₂ O	2.178	P ₂ O ₅	0
Suma = 100.005			

FORMA DE LA PARTÍCULA

La forma de la partícula, como lo describe Arreola Sánchez es alargada en forma de fibras (figura 93), producto del origen de la ceniza (quema de las fibras molidas de caña de azúcar: bagazo).

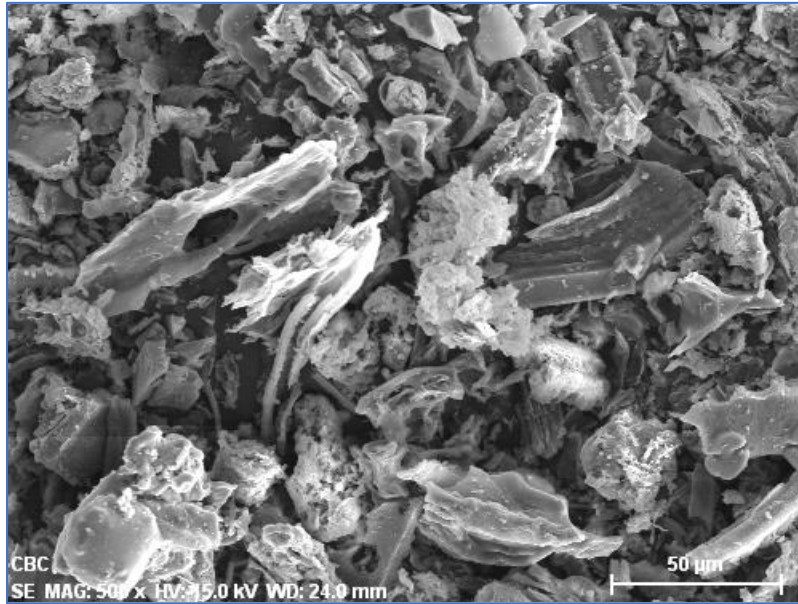


Figura 93. Forma y tamaño de partícula de la CBC. Fuente: Arreola Sánchez.

4.2.4.3.2. Especificaciones de la ceniza de bagazo de caña (CBC) para uso en el concreto

La ceniza de bagazo de caña (CBC) se adiciono a mezclas de concreto hidráulico en un porcentaje del 15% respecto a la masa del cemento y cuya colocación se hizo de la siguiente manera, al fabricar las mezclas de concreto en estudio:

- 1) Mezclado del agregado grueso con un 60% del agua, durante un tiempo aproximado de 1 minuto.
- 2) Incorporación del cemento.
- 3) Incorporación de la CBC con el cuidado necesario para no perder finos.



Figura 94. Vaciado de la CBC en la mezcladora estacionaria. Fuente: propia.

- 4) Incorporación del agregado fino.
- 5) Mezcla de todos los componentes e incorporación del resto del agua, durante un tiempo aproximado de 3 minutos.
- 6) Incorporación del PR o PM y un mezclado de todos los materiales, durante un tiempo aproximado de 3 minutos.

4.3. Diseño y elaboración de las mezclas de concreto en estudio

El diseño de una mezcla es el proceso de determinación y especificación de las características requeridas del concreto. Dentro de las características de un concreto se incluyen:

- ✚ Las propiedades del concreto fresco,
- ✚ Las propiedades mecánicas del concreto endurecido y
- ✚ La inclusión, exclusión o límites de ingredientes específicos.

Cualquier mezcla de concreto que se diseñe debe cumplir con los requisitos básicos de ser resistente y durable, que se logra a partir de una selección adecuada de los componentes del concreto, tanto por su calidad como por las proporciones en que estos se combinan.

Proporcionar una mezcla se refiere al proceso de determinación de las cantidades de los ingredientes del concreto, una vez que se tiene conocimiento de las características físicas de estos. Un concreto adecuadamente proporcionado debe ser:

- ✚ Trabajable al estar en estado fresco,

- ✚ Durable, resistente y de apariencia uniforme al estar en estado endurecido y
- ✚ Económico

El *American Concrete Institute* (ACI), detalla el método ACI 211.1 (211.1, 1994) “Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavy Weight, and Mass Concrete” para la selección de proporciones de una mezcla de concreto, el cual consiste en una secuencia de pasos lógicos y directos que toman en cuenta las características de los materiales que se emplearan para la fabricación del concreto hidráulico (figura 95).

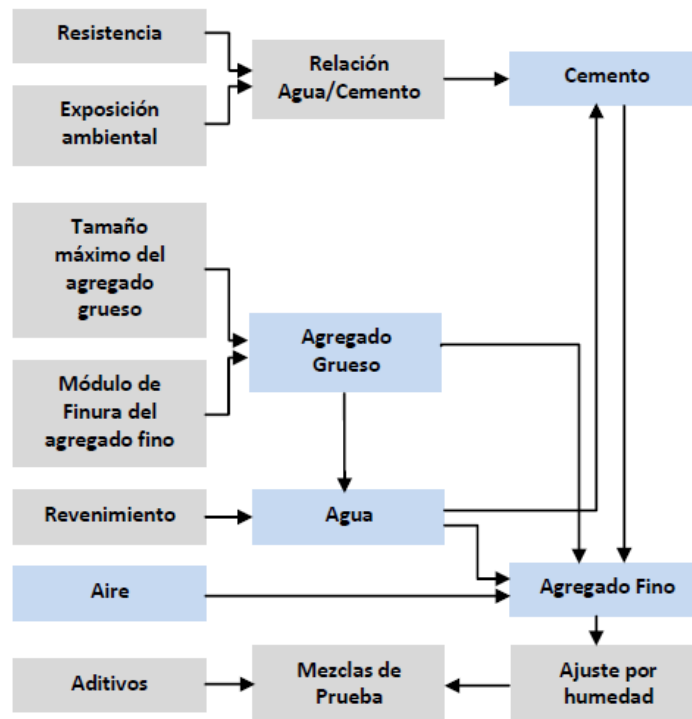


Figura 95. Proceso para la selección de proporciones de una mezcla de concreto mediante el método ACI-211.1. Fuente: López Roman, 2015 (López Roman, 2015).

El ACI emplea el método del volumen absoluto para la obtención de las cantidades necesarias de los componentes por unidad de volumen para un concreto de peso normal. Para la presente investigación se utilizó este método de diseño, siguiendo con los criterios establecidos por el ACI.

En el caso de las mezclas de concreto con fibra PET, PET molido y CBC, se utilizó el mismo diseño de la mezcla control, testigo o de referencia, y no se realizó ninguna modificación en sus proporciones, más que agregarle sus correspondientes porcentajes de fibra de PET, de

PET molido y de CBC, respecto a la masa del cemento. Las mezclas de concreto hidráulico, diseñadas en esta investigación fueron las siguientes:

1. Mezcla Control (M-C),
2. Mezcla con 0.8% de Fibra de PET (PR-0.8),
3. Mezcla con 0.8% de PET molido (PM-0.8),
4. Mezcla con 0.8% de Fibra de PET + 15% de CBC (PR0.8 + CBC15) y
5. Mezcla con 0.8% de PET molido + 15% de CBC (PM0.8 + CBC15)

Antes de iniciar con el cálculo del proporcionamiento, se establecieron dos características del concreto hidráulico: la primera de ellas era lograr mezclas trabajables o de consistencia adecuada para aplicarlas en pavimentos, por lo que se estableció un revenimiento de 7.5 cm, y una segunda característica, que era alcanzar una resistencia a la flexión a los 28 días de edad de 42 kg/cm^2 (4.2 MPa).

4.3.1. Cálculo del proporcionamiento de la mezcla control (M-C) mediante el Método ACI

Para la mezcla control (M-C) se tienen las características físicas de los materiales que serán empleados para la fabricación del concreto hidráulico, que de acuerdo con lo establecido en el apartado 4.2 son las siguientes:

Tabla 42. Características físicas de los materiales constituyentes del concreto hidráulico.

MATERIAL	MVSS (kg/m ³)	MVSV (kg/m ³)	DENSIDAD (g/cm ³)	% ABSORCIÓN	MÓDULO DE FINURA	TAMAÑO MÁX. (pulg.)
Arena	1244	1363	2.10	7.5	2.55	-
Grava	1441	1601	2.71	2.0	-	¾
Cemento	1490	-	3.10	-	-	-

Los agregados pétreos presentaron una humedad actual igual a cero, teniendo en cuenta que pasaron por un proceso de secado total hasta la hora de fabricar cada una de las mezclas de concreto.

Una vez conocidas las características de los materiales, se llevó a cabo el procedimiento para encontrar las proporciones adecuadas de la mezcla control, incluyendo un cálculo del valor

de la resistencia a la compresión ($f'c$) a partir del valor de la resistencia a la flexión o módulo de ruptura (MR) y el ajuste por humedad de los agregados. Los pasos para el proporcionamiento fueron los siguientes:

1. El primer paso contempló el cálculo del valor de $f'c$ (resistencia a compresión) del concreto a partir de la resistencia a la flexión o MR, que en esta investigación fue definida con un valor de 42 kg/cm^2 . La resistencia a compresión, la cual es más fácil de ser medida que la resistencia a la flexión, es una propiedad principalmente física y frecuentemente es usada en los cálculos para el diseño de puentes, edificios y otras estructuras.

Partiendo de los anterior, existe una relación empírica entre estas dos resistencias, la cual menciona que la resistencia a la flexión de concretos de peso normal es normalmente de 1.99 a 2.65 veces la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión en kg/cm^2 (0.7 a 0.8 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en Megapascuales) (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004).

A continuación, se presenta el cálculo:

$$MR = 1.99 \text{ a } 2.65 \sqrt{f'c}$$

$$MR = 2.32 \sqrt{f'c}$$

Si se despeja el $f'c$ de la ecuación anterior, tenemos:

$$f'c = \left(\frac{MR}{2.32} \right)^2$$

Sustituyendo el valor de $MR = 42 \text{ kg/cm}^2$ en la ecuación anterior, resulta un valor de $f'c = 327.73 \text{ kg/cm}^2$; sin embargo, por practicidad y seguridad del cálculo se utilizará un valor de $f'c = 330 \text{ kg/cm}^2$ para el diseño de la mezcla.

2. Se calculó la cantidad de agua que debe contener un metro cubico de mezcla y el contenido de aire que queda atrapado accidentalmente a la hora de fabricar el concreto. En función del revenimiento igual a 7.5 cm y del tamaño máximo del agregado igual a $\frac{3}{4}$ " (19 mm), se obtuvo de la tabla 43 la cantidad de agua y el aire atrapado, como a continuación se presenta:

Tabla 43. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado.

Revenimiento, cm	Agua, kg/m ³ concreto para TMG, mm							
	9.5	12.5	19	25	38	50	75	150
Concreto sin aire incluido								
De 2.5 a 5.0	207	199	190	179	166	154	130	113
De 7.5 a 10	228	216	205	193	181	169	145	124
De 15 a 17.5	243	228	216	202	190	178	160	-
Cantidad aprox. aire atrapado en %	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incluido								
De 2.5 a 5.0	181	175	168	160	150	142	122	107
De 7.5 a 10	202	193	184	175	165	157	133	119
De 15 a 17.5	216	205	197	174	174	166	154	-
Promedio recomendado de aire pro incluir por exposición								
Exposición ligera	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Exposición mejorada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Exposición severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

El concreto en estudio fue sin aire incluido, con un revenimiento de 7.5 cm y un tamaño máximo de la grava de 19 mm, por lo tanto, se eligió una cantidad de agua de 205 L/m³ de agua y 2 % de aire atrapado en la mezcla.

2% de aire atrapado en la mezcla representó calcular el volumen de aire atrapado por accidente en la mezcla:

$$\text{Volumen de aire atrapado} = 0.02 \times 1000 \text{ L/m}^3$$

$$\text{Volumen de aire atrapado} = 20 \text{ L/m}^3$$

- Se calculó la relación agua/cemento por peso y la cantidad de cemento que se requiere por metro cúbico de mezcla, ingresando a la tabla 44 recomendada por el ACI-211. Se ingresó con la resistencia a compresión a los 28 días, ya calculada en el paso 1, y tomando en cuenta que es un concreto sin aire incluido, el valor de la relación agua/cemento fue el siguiente:

Tabla 44. Correspondencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión del concreto.

Resistencia a la compresión a los 28 días kg/cm ²	Relación agua/cemento por peso	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
420	0.41	-
350	0.48	0.40



280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Para la obtención de la relación agua/cemento, en un concreto sin aire incluido y para una resistencia a la compresión a los 28 igual a 330 kg/cm², se interpolaron los valores relacionados con la resistencia a la compresión de 280 kg/cm² y 350 kg/cm² de la tabla anterior, resultando lo siguiente:

$$Rel. a/c \text{ peso} = \frac{(0.48-0.57)(330-280)}{(350-280)} + 0.57$$

$$Rel. a/c \text{ peso} = 0.51$$

Con la relación agua/cemento de 0.51, se determinó el contenido de cemento:

$$Cantidad \text{ de cemento en peso} = \frac{\text{litros de agua, kg/m}^3}{Relación \text{ agua/cemento}}$$

$$Cantidad \text{ de cemento en peso} = \frac{205 \text{ kg/m}^3}{0.51}$$

$$Cantidad \text{ de cemento en peso} = 401.96 \text{ kg/m}^3$$

Adicionalmente se calculó el volumen de cemento requerido para la mezcla:

$$Volumen \text{ de cemento} = \frac{Cantidad \text{ de cemento en peso}}{Densidad \text{ del cemento}}$$

$$Volumen \text{ de cemento} = \frac{401.96 \text{ kg/m}^3}{3.1}$$

$$Volumen \text{ de cemento} = 129.66 \text{ L/m}^3$$

4. En el siguiente paso se determinó el contenido de agregado grueso por volumen unitario de concreto hidráulico, para esto se debió ingresar a la tabla 45 recomendada por el ACI-211 con el tamaño máximo nominal de la grava igual a 3/4" (19 mm) y con el módulo de finura de la arena igual a 2.55.

El volumen de agregado se muestra en metros cúbicos con base en varillado en seco para un metro cúbico de concreto, el volumen se convierte a peso seco del agregado grueso requerido en un metro cúbico de concreto multiplicándolo por el peso volumétrico de varillado en seco.

Tabla 45. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.

Tamaño máximo de agregado, mm	Volumen de agregado grueso varillado en seco, por volumen unitario de concreto para distintos módulos de finura de la arena			
	2.40	2.60	2.80	3.0
9.5 (3/8")	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5 (1/2")	0.59	0.57	0.55	0.53
19 (3/4")	0.66	0.64	0.62	0.60
25 (1")	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5 (1 1/2")	0.75	0.73	0.71	0.69
50 (2")	0.78	0.76	0.74	0.72
75 (3")	0.82	0.80	0.78	0.76
150 (6")	0.87	0.85	0.83	0.81

Para el cálculo del volumen de la grava varillada en seco, se interpolaron los valores relacionados con módulos de finura de la arena de 2.40 y 2.60 de la tabla anterior, resultando lo siguiente:

$$\text{Volumen de agregado grueso varillado en seco} = \frac{(0.64-0.66)(2.55-2.4)}{(2.6-2.4)} + 0.66$$

$$\text{Volumen de agregado grueso varillado en seco} = 0.645$$

Del valor de volumen de agregado grueso varillado en seco, se calculó la grava en peso por metro cubico de concreto:

$$\text{Masa de la grava} = \text{Volumen del agregado grueso} \times \text{MVSV}$$

$$\text{Masa de la grava} = 0.645 \times 1601 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Masa de la grava} = 1032.65 \text{ kg/m}^3$$

Para obtener el valor del volumen de grava por metro cubico de mezcla, se debió dividir la masa de la grava entre la densidad del material:

$$\text{Volumen de la grava} = \frac{1032.65 \text{ kg/m}^3}{2.71}$$

$$\text{Volumen de la grava} = 381.05 \text{ L/m}^3$$

5. El agregado fino, cuyo valor faltante de proporción por metro cubico de concreto, se calculó por diferencia de volúmenes de los materiales:

$$\text{Volumen de la arena} = 1000 \text{ L/m}^3 - (V_{\text{cimento}} + V_{\text{agua}} + V_{\text{aire}} + V_{\text{grava}})$$

$$\text{Volumen de la arena} = 1000 - (129.66 + 205 + 20 + 381.05)$$

$$\text{Volumen de la arena} = 264.29 \text{ L/m}^3$$

$$\text{Masa de la arena} = \text{Volumen de la arena} \times \text{Densidad de arena}$$

$$\text{Masa de la arena} = 264.29 \text{ L/m}^3 \times 2.1$$

$$\text{Masa de la arena} = 555.01 \text{ kg/m}^3$$

A continuación, se presenta un resumen de las proporciones de mezcla de acuerdo al diseño inicial:

Tabla 46. Resumen de las cantidades necesarias de material para un m³ de mezcla de concreto.

MATERIALES	Volumen (L/m ³)	Masa total (kg/m ³)
Cemento	129.66	401.96
Arena	264.29	555.01
Grava	381.05	1032.65
Agua	205.00	205.00
Aire	20.00	-
Suma	1000.00	2194.62

6. El sexto paso, consistió en ajustar la mezcla por humedad de absorción de los agregados, recordando que su humedad actual de los agregados fue nula. El agua que se añade a la mezcla debió aumentarse en cantidad igual al porcentaje de absorción de agua de los agregados, como a continuación se presenta:

$$\text{Masa corregida del agregado} = \text{Masa del agregado} \times (1 - \% \text{ Absorción})$$

$$\text{Masa corregida de la arena} = 555.01 \text{ kg/m}^3 \times (1 - 0.075)$$

$$\text{Masa corregida de la arena} = 513.38 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Masa corregida de la grava} = 1032.65 \text{ kg/m}^3 \times (1 - 0.02)$$

$$\text{Masa corregida de la grava} = 1012.00 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Masa corregida del agua} = \text{Masa total de agua} + \sum (\text{Masa del agregado} \times \% \text{ Absorción})$$

$$\text{Masa corregida del agua} = 205 \text{ kg/m}^3 + [(555.01 \text{ kg/m}^3 \times 0.075) + (1032.65 \text{ kg/m}^3 \times 0.02)]$$

$$\text{Masa corregida del agua} = 267.28 \text{ kg/m}^3$$

Por lo tanto, las cantidades reales en masa, para la dosificación de un m^3 de la mezcla control (M-C), a partir de una relación agua/cemento igual a 0.51, quedaron como a continuación se presentan:

Tabla 47. Resumen de las cantidades corregidas de material para un m^3 de mezcla control (M-C).

MATERIALES	Masa corregida (kg/m^3)
Cemento	401.96
Arena	513.38
Grava	1012.00
Agua	267.28
Aire	-
Suma	2194.62

7. Como último paso, se realizó el cálculo de la cantidad de material necesario para elaborar los especímenes de concreto, de acuerdo con las pruebas mecánicas y de durabilidad a realizar. La población total de especímenes consta de:

- Cilindros de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, para pruebas de compresión y de durabilidad

- ✚ Cilindros de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura, para pruebas de tensión indirecta
- ✚ Vigas de 15 cm de ancho por 15 cm de altura por 60 cm de longitud, para pruebas de flexión

La cantidad de especímenes a elaborar para la mezcla control (M-C), será la misma que para las demás mezclas en estudio. La tabla 48 muestra el total de especímenes por mezcla.

Tabla 48. Cantidad total de especímenes elaborados por mezcla y para la investigación.

Espécimen	Ensayos a compresión	Ensayos a tensión	Ensayos a flexión	Ensayos de durabilidad	No. de especímenes por mezcla	Total de especímenes a colar
Cilindros 10 cm ϕ x 20 cm h	12	0	0	12	24	60
Cilindros 15 cm ϕ x 30 cm h	0	12	0	0	12	120
Vigas 15 cm x 15 cm x 60 cm	0	0	12	0	12	60
Total de especímenes en la investigación						240

Una vez que se determinó la forma de los especímenes a elaborar y la cantidad total de especímenes por mezcla, se calculó el volumen de los dos cilindros en sus distintos tamaños y de una viga:

$$\text{Volumen Cilindro } 10 \times 20 = \text{Área del cilindro} \times \text{Altura del cilindro}$$

$$\text{Área del cilindro} = \frac{\pi \times (10 \text{ cm})^2}{4}$$

$$\text{Área del cilindro} = 78.54 \text{ cm}^2$$

$$\text{Volumen Cilindro } 10 \times 20 = 78.54 \text{ cm}^2 \times 20 \text{ cm}$$

$$\text{Volumen Cilindro } 10 \times 20 = 1570.80 \text{ cm}^3$$



$$\text{Volumen Cilindro } 15 \times 30 = \text{Área del cilindro} \times \text{Altura del cilindro}$$

$$\text{Área del cilindro} = \frac{\pi \times (15 \text{ cm})^2}{4}$$

$$\text{Área del cilindro} = 176.71 \text{ cm}^2$$

$$\text{Volumen Cilindro } 15 \times 30 = 176.71 \text{ cm}^2 \times 20 \text{ cm}$$

$$\text{Volumen Cilindro } 15 \times 30 = 5301.30 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen Viga } 15 \times 15 \times 60 = \text{Área de sección de viga} \times \text{Longitud de viga}$$

$$\text{Área de sección de viga} = 15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$$

$$\text{Área de sección de viga} = 225 \text{ cm}^2$$

$$\text{Volumen Viga } 15 \times 15 \times 60 = 225 \text{ cm}^2 \times 60 \text{ cm}$$

$$\text{Volumen Viga } 15 \times 15 \times 60 = 13500 \text{ cm}^3$$

El volumen de cada espécimen se multiplico por el número total de especímenes a colar y se realizó la sumatoria para conocer el volumen necesario de mezcla para la población total de especímenes:

$$\text{Volumen total de mezcla} = (V_{\text{cilindro } 10 \times 20} \times 24) + (V_{\text{cilindro } 15 \times 30} \times 12) + (V_{\text{viga}} \times 12)$$

$$\text{Volumen total de mezcla} = (1570.8 \text{ cm}^3 \times 24) + (5301.3 \text{ cm}^3 \times 12) + (13500 \text{ cm}^3 \times 12)$$

$$\text{Volumen total de mezcla} = 263,314.8 \text{ cm}^3$$

El volumen total requerido de mezcla de concreto se afectó por un factor de desperdicio, que en este caso fue de 15%, por lo que el volumen total requerido de mezcla quedó como:

$$\text{Volumen total requerido de mezcla} = \text{Volumen total de mezcla} \times 1.15$$

$$\text{Volumen total requerido de mezcla} = 263,314.8 \text{ cm}^3 \times 1.15$$

$$\text{Volumen total requerido de mezcla} = 302,281.02 \text{ cm}^3$$

$$= 0.3022102 \text{ m}^3$$



Del volumen requerido de mezcla para elaborar el concreto control (M-C), se calcularon las proporciones de cada material de acuerdo con lo establecido en la tabla 46 para un m³ de mezcla:

Masa requerida de cemento

$$= \text{Volumen total requerido de mezcla} \times \text{Masa del cemento por m}^3$$

$$\text{Masa requerida de cemento} = 0.3022102 \text{ m}^3 \times 401.96 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Masa requerida de cemento} = \mathbf{121.50 \text{ kg}}$$

Masa requerida de arena

$$= \text{Volumen total requerido de mezcla} \times \text{Masa de la arena por m}^3$$

$$\text{Masa requerida de arena} = 0.3022102 \text{ m}^3 \times 513.38 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Masa requerida de arena} = \mathbf{155.15 \text{ kg}}$$

Masa requerida de grava

$$= \text{Volumen total requerido de mezcla} \times \text{Masa de la grava por m}^3$$

$$\text{Masa requerida de grava} = 0.3022102 \text{ m}^3 \times 1012.00 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Masa requerida de grava} = \mathbf{305.84 \text{ kg}}$$

$$\text{Masa requerida de agua} = \text{Volumen total requerido de mezcla} \times \text{Masa del agua por m}^3$$

$$\text{Masa requerida de agua} = 0.3022102 \text{ m}^3 \times 267.28 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Masa requerida de agua} = \mathbf{80.77 \text{ kg}}$$

Por lo tanto, las cantidades en masa de los materiales, para la dosificación del total de especímenes de la mezcla control (M-C), a partir de una relación agua/cemento igual a 0.51, quedaron como a continuación se presentan:

Tabla 49. Resumen de las cantidades requeridas de material para la cantidad total de especímenes de la mezcla control (M-C).

MATERIALES	Masa requerida (kg)
Cemento	121.50

Arena	155.15
Grava	305.84
Agua	80.77
Aire	-
Relación agua/cemento = 0.51	

4.3.2. Dosificación de las fibras de PET (PR), del PET molido (PM) y de la Ceniza de Bagazo de Caña (CBC).

Como ya se mencionó anteriormente, se realizó el diseño de una mezcla control y se agregaron los porcentajes de los materiales adicionados al proporcionamiento original. En la tabla 50 se muestra las cantidades requeridas de material de las diferentes mezclas con adición de PR, PM y CBC.

Tabla 50. Cantidades requeridas de material de las diferentes mezclas con adición de PR, PM y CBC.

MATERIALES	Masa requerida (kg)			
	PR-0.8	PM-0.8	PR0.8 + CBC15	PM0.8 + CBC15
Cemento	121.50	121.50	121.50	121.50
Arena	155.15	155.15	155.15	155.15
Grava	305.84	305.84	305.84	305.84
Agua	80.77	80.77	80.77	80.77
PR	0.972	-	0.972	-
PM	-	0.972	-	0.972
CBC	-	-	18.23	18.23
Relación agua/cemento = 0.51				

4.3.3. Elaboración de las mezclas en estudio y fabricación de los especímenes

Para la elaboración de las mezclas de concreto, una vez que se determinaron las cantidades exactas de los materiales a emplear, se tomó como referencia la metodología para llevar a cabo la elaboración de un concreto convencional en una mezcladora estacionaria con capacidad de revoltura de 1 saco de cemento.



Se realizaron un total de 5 mezclas de concreto, cada una por separado y en tres tandas por mezcla (dividiendo las cantidades de material en tres partes), debido a la capacidad de la mezcladora, donde se mantuvieron las mismas condiciones de manipulación y dosificación de los materiales, preparación y vaciado de las mezclas.

Para las mezclas con las adiciones correspondientes de PR, PM y CBC, el procedimiento de mezclado se describe en el apartado 4.2.4. correspondiente a las especificaciones de uso de estos materiales.

El procedimiento detallado de la fabricación del concreto en cada tanda y para cada mezcla se describe a continuación:

- 1) Una vez secos los agregados pétreos, se pesaron por separado en sacos de rafia; así como la cantidad de agua necesaria para cada tanda de mezclado.
- 2) Se ingresó aproximadamente un 10% de agua dentro de la mezcladora y la cantidad correspondiente de grava.
- 3) Se ingresó aproximadamente un 50% más de agua y se dejó homogenizar con la grava durante un tiempo aproximado de 1 minuto, hasta observar que la grava se encontrara en la condición de superficialmente húmeda.
- 4) Incorporación del cemento y en su caso, de la CBC (ver apartado 4.2.4.3.2).
- 5) Incorporación de la arena y revoltura de todos los componentes con la adición del resto de agua, durante un tiempo aproximado de 3 minutos (difiere al incorporar el PR o PM) y hasta vaciar la mezcla a una carretilla.
- 6) Una vez obtenida la mezcla de concreto, se midió su trabajabilidad con el cono de Abrams (revenimiento del concreto) para garantizar el revenimiento de diseño.
- 7) Se hizo el llenado de los especímenes ya cuantificados en el diseño de la mezcla.

La elaboración de los especímenes de prueba se realizó de acuerdo con la norma NMX-C-159-ONNCCE (NMX-C-159-ONNCCE, 2016), la cual menciona que “los moldes y los accesorios para elaborar los especímenes de concreto deben ser de acero, fierro fundido, u otro material no absorbente y no reactivo con el concreto de cemento Portland u otros

cementantes hidráulicos”; además de especificar que, “la dimensión menor de los moldes debe ser como mínimo tres veces mayor que el tamaño máximo nominal del agregado”.

Por cada una de las mezclas fabricadas se acondicionaron un total de 48 moldes (figura 96) para elaborar 48 especímenes que fueron sometidos a diferentes pruebas de calidad. Se elaboraron 24 cilindros de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura para medir la resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y durabilidad; 12 especímenes cilíndricos de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura para determinar la resistencia a la tensión por compresión diametral; y 12 vigas prismáticas de 15 cm de base por 15 cm de altura por 60 cm de largo para ensayos de flexión.



Figura 96. Acondicionamiento de 48 moldes para la elaboración de especímenes de prueba. Fuente: propia.

A continuación, se detalla el procedimiento utilizado para la fabricación de los especímenes de prueba:

- 1) Antes de ingresar la mezcla de concreto, todos los moldes fueron cubiertos con un líquido desmoldante (aceite para transmisión mezclado con diésel) para facilitar el desmolde el día programado para ello.
- 2) La colocación de la mezcla dentro de los moldes, se realizó vaciando la mezcla contenida en la carretilla, con ayuda de un cucharón, hacia los moldes en varias capas de aproximadamente igual espesor, según el tipo y tamaño del espécimen, como se indica en la tabla siguiente:

Tabla 51. Número de capas requeridas para los especímenes.

Tipo y tamaño de espécimen	Número de capas de aproximadamente igual espesor
Cilindros de 10 cm x 20 cm	2
Cilindros de 15 cm x 30 cm	3
Vigas de 15 cm x 15 cm x 60 cm	2

Al vaciar la última capa de mezcla, se llenó el molde y se procuró dejar un excedente de material para después de compactarlo y vibrarlo se pudiera enrazar.

- 3) Por cada capa de mezcla especificada, se compacto el concreto (varillado y vibrado). Primeramente, con el extremo redondeado de una varilla se realizó un número especificado de penetraciones según el espécimen fabricado, como lo marca la tabla 52 y después con un mazo de goma se golpearon ligeramente las paredes del molde (figura 97) y así eliminar, hasta donde sea posible, las oquedades que dejaba la varilla. En el caso de los moldes prismáticos, después de cada capa varillada, se golpeó ligeramente cada extremo del molde contra el piso para lograr el cierre de las oquedades.

Tabla 52. Diámetro de la varilla y número de penetraciones por capa de mezcla.

Tipo y tamaño de espécimen	Diámetro de varilla, mm	Número de penetraciones/capa
Cilindros de 10 cm x 20 cm	10 ± 2	25
Cilindros de 15 cm x 30 cm	16 ± 2	25
Vigas de 15 cm x 15 cm x 60 cm	16 ± 2	Una por cada 14 cm ² de superficie (65)

Las penetraciones por capa, se distribuyeron uniformemente en toda la sección transversal del molde permitiendo que la varilla penetrara en todo el espesor de la primera capa y por cada capa subsecuente aproximadamente 2 cm dentro de la capa inmediata inferior.



Figura 97. Llenado y compactado de la mezcla de concreto. Fuente: propia.

- 4) Después de la compactación, hasta la última capa especificada, se enrasó la superficie del espécimen con un enrasador rígido de metal (figura 98), haciéndolo pasar por las orillas del molde hasta producir una superficie plana y uniforme.



Figura 98. Enrase de la superficie del espécimen. Fuente: propia.

4.3.4. Desmolde y curado de los especímenes

De acuerdo con lo especificado en la norma NMX-C-159-ONNCCE (NMX-C-159-ONNCCE, 2016), los especímenes de concreto deben ser desmoldados entre 20 h y 48 h después de su elaboración. En el caso de las mezclas en estudio, los especímenes con adición de CBC fueron desmoldados al transcurrir 48 horas, siendo que, en este tipo de mezclas con adiciones minerales su fraguado final es mayor a 24 horas; mientras que los especímenes identificados como M-C, PR-0.8 y PM-0.8 se pudieron desmoldar a las 24 horas después de su fabricación.

Los especímenes desmoldados fueron etiquetados, en su cara de colado, para su identificación una vez que alcancen su día de prueba (figura 99.a). Posteriormente, se

almacenaron en una pila de curado, sumergiéndolos en agua (figura 99.b.), hasta el momento de los ensayos de calidad, con un tirante mínimo de 2 cm superar a la superficie libre de los especímenes y a una temperatura igual a $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, como se observa en la siguiente imagen:



Figura 99. a) Etiquetado de los especímenes para su identificación, b) Curado de los especímenes. Fuente: propia.

El curado del concreto, es el proceso mediante el cual, en un ambiente especificado (humedad y temperatura) y en un tiempo determinado, se favorece la hidratación del cemento o de los materiales cementantes en la mezcla (NMX-C-159-ONNCCE, 2016).

Cabe señalar, que las vigas elaboradas, a diferencia de los cilindros, se retiraron de sus moldes y se curaron en la pila de curado hasta un máximo de 20 horas antes de someterlos a la prueba de flexión. Estos especímenes prismáticos, se retiraron de la pila de curado y se sumergieron en un tanque (200 L de capacidad) con agua saturada de hidróxido de calcio (CaOH_2 - cal hidratada) en proporción de 3 gramos por litro de agua (figura 100), para después extraerlos y someterlos al ensayo destructivo.



Figura 100. Tanque de curado con cal hidratada. Fuente: propia.

Todos los especímenes fueron cubiertos con franelas húmedas (figura 101), durante el tiempo de retiro de su curado y hasta el inicio de los ensayos, cuidando que no se secase su superficie y probándolos en la condición húmeda que resulta del tratamiento de curado, como lo marca la normativa antes mencionada.



Figura 101. Condición de humedad de curado de los especímenes hasta antes de los ensayos del concreto. Fuente: propia.

4.4. Ensayos aplicados a las mezclas de concreto elaboradas.

En el presente trabajo de investigación uno de los objetivos particulares es comparar el desempeño físico-mecánico y por durabilidad de las distintas mezclas de concreto elaboradas, por lo que se realizaron ensayos de laboratorio (apegados a normativa vigente), los cuales miden las propiedades del concreto en estado fresco y en estado endurecido (ensayos físico-mecánicos y ensayos de durabilidad).

Como ya se mencionó en el apartado 4.3, se elaboraron un total de cinco mezclas de concreto; una mezcla control (M-C), una mezcla con fibra de PET reciclado (PR-0.8), una mezcla con PET molido (PM-0.8), y dos mezclas más con adición de ceniza de bagazo de caña, en combinación una de ellas, con fibra de PET reciclado (PR0.8 + CBC15) y una segunda, con PET molido (PM0.8 + CBC15). A estas cinco mezclas se le realizaron pruebas en estado endurecido a la edad de: 7, 28, 90 y 180 días, en el caso de las pruebas físico-mecánicas y a 180 días, en el caso de las pruebas de durabilidad.



Las cantidades de cemento, agregados pétreos y agua se mantuvieron constantes variando únicamente la adición de material de PET y ceniza de bagazo de caña (CBC). El proporcionamiento base tuvo un consumo de cemento de 401.96 kg/m³, una relación agua/cemento de 0.51 y el porcentaje de volumen absoluto para los agregados fue de 35.5% en el caso de la arena blanca y de 64.5% en el caso de la grava triturada.

4.4.1. Ensayos realizados al concreto fresco

4.4.1.1. Revenimiento

El ensayo de revenimiento o asentamiento del cono de Abrams, es el método más ampliamente aceptable y utilizado para medir la consistencia del concreto (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004). La consistencia se califica dependiendo de la trabajabilidad o manejabilidad de la mezcla en los primeros 15 minutos, después de ser elaborada, midiendo el asentamiento que presenta al quitarle el cono en el que inicialmente se ha vertido dicha mezcla.

El valor de revenimiento se mide en centímetros y es una propiedad inicial del diseño de la mezcla, la cual determinara el contenido de agua en la mezcla. Entre mayor sea la medida de revenimiento, mayor será la cantidad de agua contenida en la mezcla de concreto.

El ensayo de revenimiento se realizó para cada una de las mezclas, siguiendo la metodología descrita por las normas ASTM C 143 y NMX-C-156-ONNCCE-2010.

Equipo empleado:

- Un cono de Abrams (molde troncocónico de dimensiones específicas)
- Un cucharón metálico
- Una carretilla
- Una varilla punta de bala de 5/8 (1.6 cm) de diámetro
- Una placa de acero, plana, rígida y no absorbente de 60 cm por 60 cm
- Una pala metálica
- Un flexómetro

Procedimiento:

1. Una vez elaborada la mezcla de concreto, se obtuvo una muestra representativa de la mezcladora estacionaria, vertiendo la mezcla en una carretilla. La mezcla se uniformizó con la ayuda de la pala, para obtener un valor de revenimiento válido.
2. Se humedeció el molde troncocónico y el cucharón, para posteriormente colocar el molde sobre la placa de acero humedecida, que estaría sobre una superficie horizontal. Para mantener fijo el molde sobre la placa, se colocó el operador sobre las orejas del molde troncocónico (figura 102) y cerca de donde se encuentra la carretilla con la mezcla.



Figura 102. Colocación del operador sobre el molde troncocónico. Fuente: propia.

3. Con ayuda del cucharón, se vertió la mezcla dentro del molde en tres capas de aproximadamente igual volumen:
 - La primera capa, corresponde a una altura aproximadamente de 7 cm, dándole 25 varilladas con la varilla punta de bala en una secuencia de tipo espiral hacia el centro del molde y sobre toda la sección de la capa.
 - La segunda capa, debe llegar a una altura del molde de aproximadamente 15 cm, dándole de igual manera 25 varilladas procurando que la varilla penetre aproximadamente 2 cm de la capa anterior.
 - Y la tercera capa, se llenará hasta el extremo del molde, colocando un ligero excedente de concreto por encima del borde superior del molde y varillando por 25 veces su sección, penetrando de igual forma por 2 cm la capa anterior.

4. Se enrazó la mezcla de concreto mediante un movimiento de rodamiento de la varilla posicionada horizontalmente.
5. Se limpió la superficie exterior de la base de asiento del molde e inmediatamente se levantó el molde con cuidado en dirección vertical. El tiempo para levantar el molde en sus 30 cm de altura se hizo en $5\text{ s} \pm 2\text{ s}$ y el tiempo del ensayo hasta este punto, fue en un tiempo menor a 2.5 minutos.
6. Se colocó el molde, cerca de la mezcla asentada, de forma contraria a como se utilizó anteriormente y se colocó la varilla punta de bala de forma horizontal sobre este.
7. Se midió el asentamiento del concreto, con ayuda del flexómetro, a partir del nivel original de la base inferior del molde y hasta la altura promedio del cono formado por la mezcla a la hora de quitar el molde.



Figura 103. Lectura del valor de revenimiento de la mezcla. Fuente: propia.

Especificaciones respecto a resultados del ensayo:

Del revenimiento obtenido del ensayo, se tienen tolerancias respecto al revenimiento real obtenido y el revenimiento nominal o de diseño del concreto. La tabla 53 muestra las tolerancias correspondientes.

Tabla 53. Valor nominal de revenimiento y tolerancias (NMX-C-156-ONNCCE, 2010).

Revenimiento nominal (mm)	Tolerancia (mm)
menor de 50	± 15
de 50 a 100	± 25
mayor de 100	± 35

4.4.1.2. Índice de pH

El ensayo para la obtención del “potencial de Hidrógeno” (pH) en las mezclas de concreto en estado fresco, se realizó con ayuda de tiras indicadoras de la marca CIVEQ, fabricada por la empresa Científica Vela Quin S.A. de C.V.

Al colocar una tira indicadora sobre la mezcla fresca, se pudo conocer el valor de pH del concreto y así verificar que la mezcla se encontrará en un estado alcalino, siendo este una característica de las mezclas de concreto hidráulico.

Procedimiento:

1. Se colocó una tira indicadora sobre la muestra representativa de concreto fresco, misma que la utilizada para el ensayo de revenimiento, haciendo que el lado que contiene los indicadores toque perfectamente al concreto (figura 104).



Figura 104. Indicador de pH puesto en contacto con la mezcla de concreto fresco. Fuente: propia.

2. Se dejó el papel durante un tiempo de aproximadamente un minuto, con el propósito de que la tira indicadora nos arrojará un valor más exacto del pH.
3. Al retirar la tira de papel de la mezcla, se comparó el color obtenido con los valores que vienen en la tabla de referencia (figura 105), haciendo coincidir los 4 colores de la tira indicadora y obteniendo un valor de pH.



Figura 105. Lectura del valor de pH sobre la tabla de referencia. Fuente: propia.

4.4.1.3. Lectura de la temperatura

Según la norma NMX-C-159-ONNCCE-2016 la temperatura de una mezcla en estado fresco debe aproximarse a la temperatura ambiente que se encuentra a la hora de realizar dicha mezcla. Para la obtención de datos precisos de la temperatura en cada una de las mezclas en estudio se realizaron lecturas por medio de un termómetro de vástago sumergido en la mezcla en estado fresco (figura 106), el cual arroja un valor de temperatura sin afectar la mezcla después de elaborarla.



Figura 106. Lectura de la temperatura del concreto con ayuda de un termómetro de vástago. Fuente: propia.

4.4.2. Ensayos realizados al concreto endurecido

4.4.2.1. Ensayos físico-mecánicos

Los ensayos físicos a los que se sometieron los especímenes de prueba, para cada una de las mezclas, son ensayos no destructivos que ayudan a conocer de forma indirecta la calidad de



la matriz de concreto, a partir de valores medidos de resistencia eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico transmitidos dentro del concreto.

Los ensayos mecánicos, son ensayos destructivos, que se realizan al concreto endurecido y tienen como objetivo cumplir con las especificaciones de resistencia de las normas vigentes. Dichas pruebas son aquellas que a partir del daño ocasionado por el ensayo no son aptas para realizar una segunda prueba de igual magnitud.

Ensayos de esta índole, son los que definirán de forma directa la resistencia mecánica del concreto en estudio, es decir, se refiere básicamente a la capacidad de soportar toda clase de esfuerzos, la cual depende de la resistencia que puedan lograr los agregados y la pasta del cemento hidratado, así como de la integración que se genere entre ellos.

Todas las pruebas mecánicas o destructivas se realizaron a los mismos especímenes requeridos para las pruebas no destructivas, pasando un tiempo pequeño después de realizar dichos ensayos y procurando que cada muestra de concreto se encontrara durante todo el tiempo de las pruebas de forma húmeda.

Tanto las pruebas físicas como mecánicas, requirieron un total de 3 especímenes por mezcla y para cada edad de prueba especificada, obteniendo así un valor promedio de cada ensayo. De forma ordenada, se realizaron primeramente los ensayos físicos y posteriormente, se realizaron los ensayos mecánicos.

Las pruebas destructivas que se le realizaron a las diferentes mezclas de concreto endurecido fueron: resistencia a la compresión simple, determinación del módulo de elasticidad estático del concreto en compresión, resistencia a la flexión y resistencia a la compresión diametral o tensión indirecta.

A continuación, se describe cada uno de los ensayos físico-mecánicos aplicados a las mezclas en estudio.

4.4.2.1.1. Resistividad eléctrica

La Resistividad Eléctrica se define como una propiedad de cada material y corresponde al recíproco de su conductividad, su unidad de medida es el ohm-cm u ohm-m. Depende en

gran proporción del grado de saturación de los poros del concreto y en menor grado de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa. Es función de variables tales como: el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otras (Red Iberoamericana XV.B. "DURAR", 1998).

El ensayo de resistividad eléctrica realizado a los especímenes de la investigación (cilindros y vigas), fue el primer ensayo después de extraerlos de la pila de curado para posteriormente mantenerlos húmedos y así realizar la siguiente metodología bajo lo estipulado por la norma (NMX-C-514-ONNCCE, 2019).

Equipo empleado:

- Equipo medidor de dimensiones (Vernier)
- Equipo “Resistómetro” marca Nilsson, capaz de medir resistividad eléctrica en suelos y materiales porosos (ASTM-G57, 2012)
- Placas metálicas
- Almohadillas absorbentes de agua

Procedimiento:

1. Considerando que ya se encuentran enumerados los 9 especímenes de prueba (6 cilindros y 3 vigas), se selecciona para cada espécimen la posición en la que se llevará a cabo la prueba. Para los especímenes cilíndricos el ensayo se realizó en los extremos de su longitud, mientras que, en las vigas fue aplicado tanto en los extremos de su longitud como de manera transversal.
2. Con ayuda del vernier se tomaron las dimensiones de cada espécimen, partiendo de las caras extremas donde se colocaron las placas metálicas (área de contacto) y posteriormente su parte longitudinal. Teniendo entonces:
 - En cilindros: diámetro y altura.
 - En vigas: base de colado, espesor y longitud.
3. Se humedecieron las almohadillas para colocarlas encima de las placas metálicas.
4. Se realizó la conexión de las placas metálicas al miliamperímetro y voltímetro del equipo.

5. Se colocó la muestra correspondiente dentro de las placas metálicas (figura 107), considerando que dicha muestra debe estar húmeda, por considerarse la resistividad en función de la humedad.

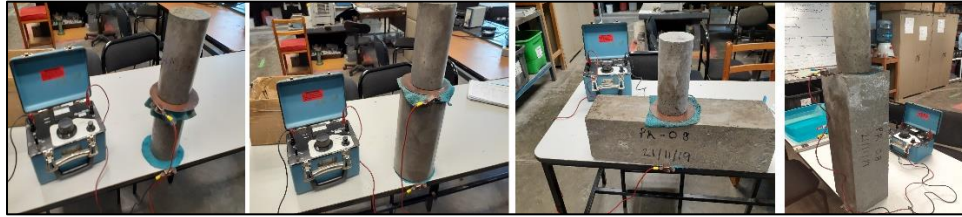


Figura 107. Colocación de especímenes dentro de las placas metálicas del equipo de prueba. Fuente: propia.

6. Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen, se sometió éste a una corriente dada (I) y registrando un voltaje (E), se obtuvo una resistencia eléctrica (Re). Realizando la operación de acuerdo a lo descrito en el manual de operación del “resistómetro”.
7. Se registró la resistencia eléctrica dada en $k\Omega$ y se procedió a aplicar la siguiente fórmula para conocer la resistividad eléctrica.

$$\rho = Re \left(\frac{A}{L} \right)$$

Donde:

ρ = Resistividad eléctrica, en $k\Omega$ -cm (ohm-m).

Re = resistencia eléctrica, en $k\Omega$.

A = área transversal del espécimen, en cm^2 .

L = longitud del espécimen, en cm.

Especificaciones respecto a resultados del ensayo:

Para tomar a consideración los resultados de este ensayo existen criterios de evaluación o especificaciones que definen el estado de corrosión que pudiera presentar el material en estudio, dichos criterios generales son sólo uno de los parámetros físicos para determinar la durabilidad del material a partir de identificar la porosidad interconectada del material y los cuales se presentan en la tabla 54:

Tabla 54. Criterio General de valores de resistividad eléctrica del concreto [NMX-C-514-ONNCCE-2019].

Resistividad	Probabilidad de corrosión
>100 - 200 k Ω -cm	El concreto es muy denso con porosidad interconectada extremadamente baja, al igual que el transporte de agentes agresivos, presentando velocidades muy bajas de corrosión del acero de refuerzo.
50 a 100 k Ω -cm	El concreto tiene una porosidad interconectada baja, dificultando el transporte de agentes agresivos y presentando velocidades bajas de corrosión del acero de refuerzo.
10 a 50 k Ω -cm	El concreto tiene una porosidad interconectada de consideración, permitiendo que el transporte de agentes agresivos sea rápido y las velocidades de corrosión del acero sean moderadas o altas en concretos carbonatados o con cloruros.
<10 k Ω -cm	El concreto tiene una porosidad interconectada excesiva, permitiendo que el transporte de agentes agresivos sea extremadamente rápido y las velocidades de corrosión del acero de refuerzo son muy altas en concretos carbonatados o con cloruros.

4.4.2.1.2. Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU)

La prueba de velocidad de pulso ultrasónico es una prueba conocida desde hace mucho tiempo y se considera como la relación que existe entre la distancia de viaje a través del concreto de una onda ultrasónica y el tiempo que tarda en recorrerla (Red Iberoamericana XV.B. "DURAR", 1998).

Este tipo de ensaye no destructivo que se lleva a cabo en las muestras de concreto, es aplicable para la verificación de la homogeneidad (uniformidad y calidad relativa); para detectar las fallas internas (presencia de vacíos) introducidas durante la fabricación, la profundidad de las fisuras y otras imperfecciones y para el monitoreo de las variaciones de las propiedades del concreto a lo largo del tiempo, debido a la agresividad del medio.

Existe una restricción adicional que surge del hecho de que la pulsación viaja más rápidamente a través de un hueco lleno de agua que a través de uno lleno de aire. En consecuencia, la condición de humedad del concreto afecta la velocidad de pulsación mientras que la resistencia en *in situ* no es afectada (Neville & Brooks, 1999).

El ensayo aplicado para conocer la velocidad de propagación de una onda ultrasónica sobre la matriz de concreto, se realizó posterior al ensayo de resistividad eléctrica, debido a que los poros del material se llenan de gel, por lo que no es apto realizarla antes de cualquier otra prueba física ya que puede ocasionar variaciones en sus resultados. El procedimiento del ensayo de VPU fue realizado de acuerdo con lo establecido por la norma NMX-C-275-ONNCCE-2004.

Cabe señalar que, durante la realización del ensayo se tomó la precaución de mantener constantemente húmedos los especímenes y evitar así variantes en las lecturas ya que el grado de saturación del espécimen afecta a la velocidad de pulso, y este factor debe tenerse en cuenta al evaluar los resultados del ensayo. Además, la velocidad de pulso en el espécimen saturado es menos sensible a los cambios en su calidad relativa.

Equipo empleado:

- Equipo comercial de ultrasonido modelo V-Meter MK IV™
- Agente de acoplamiento (gel comercial para cabello)²

Procedimiento:

1. Se conectan los transductores al aparato de pulso ultrasónico, mediante los cables coaxiales aptos para el equipo comercial.
2. Se calibra el equipo de velocidad de pulso ultrasónico, colocando los transductores uno sobre otro y accionando el mecanismo de calibración interno del equipo.
3. Una vez calibrados los transductores, se colocaron cada uno de los especímenes de forma horizontal y procurando que las caras donde se pretende hacer el ensayo (cara de prueba e inferior a ella), estuviera plana, lisa, exenta de suciedad y no carbonatada.
4. Se aplicó un adecuado agente de acoplamiento (gel para cabello), a la cara de los transductores y a las dos caras del espécimen a ensayar.
5. Se aplicó el modo de prueba, transmisión directa (a cilindros y vigas), con los transductores en las caras opuestas de cada espécimen (figura 108).



Figura 108. Transmisión directa de pulso ultrasónico en cilindros y vigas de concreto. Fuente: propia.

6. Se introdujo en el equipo la distancia en línea recta medida de centro a centro de las caras de los transductores (ancho o longitud del espécimen previamente medido).
7. Se presionaron las caras de los transductores firmemente contra la superficie del espécimen de concreto, hasta que se mostrara un valor de velocidad de pulso estable en la pantalla del equipo.
8. Se registró el valor de velocidad de pulso ultrasónico para cada espécimen de prueba.

Cálculos del ensayo:

Si fuera el caso en donde en vez de registrar directamente la velocidad de propagación de la onda ultrasónica que viaja por el concreto, se tomará solamente la lectura del tiempo que toma el pulso para atravesar la longitud, se aplicaría la siguiente fórmula en los modos de prueba de transmisiones directas e indirectas.

$$V = \frac{L}{T}$$

Donde:

V = velocidad de pulso, en m/s.

L = longitud de paso, en m.

T = tiempo que toma el pulso para atravesar la longitud, en s.

Especificaciones respecto a resultados del ensayo y al equipo ⁽¹⁻²⁾:

Los criterios de evaluación para la calidad del concreto, respecto a los resultados de la prueba se muestran en la tabla 55.

Tabla 55. Criterios de evaluación de la calidad del concreto hidráulico en función de la VPU (NMX-C-275-ONNCCE-2004, 2004).

Velocidad de Propagación	Calidad del Concreto
<1780 m/s	Concreto con muchos vacíos o agrietamiento alto (deficiente)

1780 a 2350 m/s	Concreto con algunos vacíos o agrietamiento medio (normal)
> 2350 m/s	Concreto con pocos vacíos o agrietamiento bajo o nulo (alta o durable)

4.4.2.1.3. Determinación del Módulo de elasticidad dinámico (Ed) en cilindros de 10 cm Ø x 20 cm h sometidos a VPU

El cálculo del módulo de elasticidad dinámico, se determina por medio de vibraciones de un espécimen de concreto, aplicándose solamente a un esfuerzo insignificante. Debido a la ausencia de un esfuerzo significativo aplicado, no se induce microagrietamiento en el concreto y no existe fluencia. En consecuencia, el módulo dinámico se refiere casi a efectos puramente elásticos, por esta razón, se considera que el módulo dinámico es aproximadamente igual al módulo tangente inicial determinado en la prueba estática; siendo entonces, apreciablemente mayor que el módulo secante obtenido de la aplicación de carga a un espécimen de concreto (Neville A. , 2013).

Para el caso en estudio, el cálculo para determinar el módulo de elasticidad dinámico, se realizó a partir de los valores de VPU obtenidos del ensayo anterior, en los tres especímenes cilíndricos de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, por mezcla y por edad de prueba, y siguiendo la metodología dada por la norma ASTM C597 (C597, 2016), la cual menciona lo siguiente:

La velocidad de pulso ultrasónico de una onda longitudinal de compresión en una masa de concreto está relacionada con sus propiedades elásticas y su densidad de acuerdo a la siguiente relación:

$$VPU = \sqrt{\frac{E_d(1 - \mu)}{D(1 + \mu)(1 - 2\mu)}}$$

Donde:



VPU = Velocidad de pulso ultrasónico, en km/s

E_d = Módulo de elasticidad dinámico, en MN/m²

μ = Relación dinámica de Poisson

D = Densidad del material, en kg/m³

De la relación anterior, se dedujo entonces que el módulo de elasticidad dinámico (E_d) se calcula como:

$$E_d = \frac{VPU^2(1 + \mu)(1 - 2\mu)D}{(1 - \mu)}$$

De acuerdo a lo anterior, conocida la velocidad de pulso ultrasónico, se determinó la densidad de cada concreto en estudio, a partir de pesar los especímenes y calcular su volumen:

$$D = \frac{\text{Masa del espécimen}}{\text{Volumen del espécimen}}$$

Ahora bien, al realizar la evaluación faltaría conocer la magnitud de la relación dinámica de Poisson; en este caso dicho coeficiente, se estimó con un valor de 0.15 para todas las mezclas de concreto, siendo una constante para el cálculo del módulo de elasticidad dinámico y establecido de acuerdo con la literatura (J. Vidaud Quintana & Vidaud Quintana, 2016).

4.4.2.1.4. Resistencia a la compresión en cilindros de 10 cm \varnothing x 20 cm h.

El ensayo de resistencia a la compresión del concreto es sin duda el más común de todos los ensayos sobre concreto endurecido, siendo que la mayoría de las características deseables del concreto están relacionadas cualitativamente con su resistencia; además de que, es la propiedad mecánica que representa la condición de carga en el que el concreto exhibe la mayor capacidad para soportar esfuerzos.

La resistencia a la compresión del concreto, es la capacidad de carga por unidad de área del concreto hidráulico, medida en ensayos de especímenes elaborados, curados y ensayados en las condiciones estándar especificadas, generalmente expresadas en MPa (kg/cm²) (NMX-C-155-ONNCCE, 2014).

El ensayo se desarrolló de acuerdo al procedimiento descrito en la norma NMX-C-083-ONNCE-2014, sometiendo a compresión 3 cilindros de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, por cada mezcla en estudio y una vez cumplida la edad de 7, 28, 90 y 180 días después de su elaboración.

Equipo empleado:

- 3 especímenes cilíndricos de 10 cm \varnothing x 20 cm h
- Equipo medidor de dimensiones (Vernier y flexómetro)
- Máquina de ensayo con dispositivo de lectura de carga
- Material de cabeceo (azufre)
- Molde para cabeceo de los cilindros de 10 cm \varnothing x 20 cm h

Procedimiento:

1. Se determinaron las dimensiones de cada uno de los cilindros, con ayuda del vernier y del flexómetro, midiendo el diámetro y la altura de los especímenes de ensayo.
2. Antes de someter los cilindros a una carga de compresión, las caras de aplicación de carga de los especímenes fueron cabeceadas con material de cabeceo (azufre), como se observa en la figura 109, siguiendo el procedimiento descrito por la norma mexicana (NMX-C-109-ONNCE, 2013).

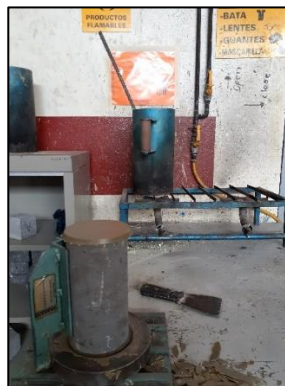


Figura 109. Cabeceo de cilindros para el ensayo a compresión. Fuente: propia.

3. Se limpiaron las superficies de las placas superior e inferior de la máquina de ensayo y las cabezas del espécimen a ensayar, colocando este último sobre la placa inferior alineando su eje con el centro de la placa de carga con asiento esférico; mientras la

placa superior hacía un contacto suave y uniforme sobre la cabeza superior del cilindro a ensayar.

4. Se niveló y se colocó la máquina de ensayo en ceros. Posteriormente, se aplicó una carga a compresión a una velocidad constante (figura 110), dentro de los intervalos de 9.6 t/min a 14.4 t/min, y hasta que el indicador señaló la carga máxima alcanzada.



Figura 110. Aplicación de carga a cilindros elaborados de las diferentes mezclas en estudio. Fuente: propia.

5. Se registro la carga máxima (P), expresada en kg, soportada por el espécimen cilíndrico.
6. Se repitieron los pasos 3, 4 y 5 del presente procedimiento, para los cilindros restantes.

Cálculos del ensayo:

Para conocer el esfuerzo a compresión del concreto, a la edad de prueba especificada, se dividió la carga máxima (P) entre el área de las caras de aplicación de carga:

$$f'c = \frac{P}{A}$$

Donde:

$f'c$ = Resistencia a compresión, en kg/cm^2

P = Carga máxima, en kg

A = Área del espécimen, cm^2



4.4.2.1.5. Determinación del módulo de elasticidad estático en cilindros de 10 cm \varnothing x 20 cm h sometidos a compresión

El módulo de elasticidad estático es el parámetro que establece la relación entre esfuerzo y deformación del concreto en un ensayo de carga axial en compresión y se determina como la pendiente de la secante definida en el intervalo comprendido entre 50 millonésimas de deformación unitaria y 40% de su resistencia máxima.

Para encontrar el módulo de elasticidad de las mezclas de concreto en estudio, se sometieron a compresión 3 cilindros de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, el primero de ellos se ensayó hasta su carga última como se describe en el apartado anterior y con los dos cilindros restantes se siguió la metodología descrita en la norma NMX-C-128-ONNCCE-2013 como a continuación se presenta:

Equipo empleado:

- 3 especímenes cilíndricos de 10 cm \varnothing x 20 cm h
- Equipo medidor de dimensiones (Vernier y flexómetro)
- Máquina de ensayo con dispositivo de lectura de carga
- Material de cabeceo (azufre)
- Molde para cabeceo de los cilindros de 10 cm \varnothing x 20 cm h
- Un deformímetro (anillos de acero) y un extensómetro (indicador de carátula)

Procedimiento:

1. Se determinaron las dimensiones de cada uno de los cilindros, con ayuda del vernier y del flexómetro, midiendo el diámetro y la altura de los especímenes de ensayo.
2. Antes de someter los cilindros al ensayo a compresión, las caras de aplicación de carga de los especímenes fueron cabeceadas con material de cabeceo (azufre), siguiendo el procedimiento descrito por la norma mexicana (NMX-C-109-ONNCCE, 2013).
3. Del primer cilindro que se llevó a la carga máxima de falla, se determinó el valor correspondiente al 12% y 60% de su carga máxima, registrando dichos valores en la hoja de trabajo.

4. A los dos cilindros restantes, se les colocó el deformímetro (anillos de acero), quedando cada cilindro al centro de los anillos. Los anillos de acero se fijaron mediante los tornillos de punta y se colocó el extensómetro (indicador de caratula), como se muestra en la figura 111; posteriormente se retiraron las barras que separan los anillos y se verificó que no existiera movimiento entre los anillos y el cilindro de prueba.



Figura 111. Cilindro de 10 cm de diámetro x 20 cm de altura con deformímetro (anillos de acero) y extensómetro para medir deformaciones longitudinales. Fuente: propia.

5. Se colocó cada cilindro al centro de la máquina de prueba y se colocó la caratula del indicador en ceros.
6. Se aplicaron dos precargas al cilindro hasta el valor del 12% de la carga máxima, revisando que en la primera precarga el extensómetro regresará a ceros; mientras que, en la segunda precarga además de revisar la posición final del extensómetro se tomaron lecturas para verificar que la aplicación de carga, la lectura de deformaciones y la toma de cargas fuera la adecuada.
7. Posteriormente se comenzó a aplicar carga a una velocidad constante hasta el 60% de su carga máxima de falla, registrando las deformaciones cada 10 micrómetros (0.01 mm) con su carga correspondiente.



Figura 112. Aplicación de carga a compresión hasta el 60% de su carga máxima de falla. Fuente: propia.

8. Se realizó una gráfica esfuerzo-deformación unitaria y se determinó el Módulo de Elasticidad Estático para cada cilindro de prueba.

Cálculos del ensayo:

Para conocer el módulo de elasticidad estático del concreto, a la edad de prueba especificada, se aplicó la siguiente ecuación:

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{e_2 - 0.000050}$$

Donde:

E_c = Módulo de elasticidad estático, en MPa (kg/cm^2)

S_1 = Esfuerzo a 50 millonésimas de deformación

S_2 = Esfuerzo correspondiente al 40% de f'_c máxima

e_2 = Deformación al 40% de f'_c máxima

4.4.2.1.6. Resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de 15 cm \varnothing x 30 cm h (tensión indirecta en cilindros)

El ensayo para conocer la resistencia a la tensión del concreto, se basa en colocar un cilindro de concreto, del mismo tipo que para ensayos de compresión, con su eje horizontal entre las platinas de una máquina de pruebas, aplicando carga constante hasta que ocurre la falla por tensión indirecta en forma de separación a lo largo del diámetro vertical del espécimen.

La prueba de tensión indirecta es la más sencilla de realizar y se obtienen valores más uniformes a comparación con otras pruebas de tensión. También, se cree que la resistencia



determinada en el ensayo de tensión indirecta está cercana a la resistencia de tensión directa del concreto, siendo 5 o 12 por ciento mayor (Neville A. , 2013).

El ensayo para conocer la tensión indirecta de las mezclas en estudio, fue realizado bajo los lineamientos establecidos por la norma NMX-C-163-ONNCCE-2019 y cuyo procedimiento fue el siguiente:

Equipo empleado:

- 3 especímenes cilíndricos de 15 cm Ø x 30 cm h
- Equipo medidor de dimensiones (Flexómetro)
- Máquina de ensayo con dispositivo de lectura de carga
- Una placa de acero de aproximadamente 40 cm x 20 cm x 3 cm
- Un par de tiras para distribución de la carga
- Un marcador de tinta indeleble o crayola

Procedimiento:

1. Con ayuda del equipo medidor de dimensiones, se tomó la dimensión del diámetro promediando las medidas de dos mediciones cerca de los extremos y una al centro y su longitud se obtuvo promediando las dos medidas de las líneas que unen los extremos de las dos caras del espécimen.
2. Se marcó la muestra, con una crayola, en la parte media del diámetro del cilindro y de manera longitudinal, rodeando el perímetro de todo el espécimen para tener la referencia al realizar la tensión indirecta.
3. Se colocó una de las tiras a lo largo del centro de la placa de apoyo inferior. El espécimen se posicionó sobre la tira de carga y se acomodó de tal modo que las líneas marcadas en sus dos extremos fueran verticales y quedaran concentradas sobre la tira, para posteriormente colocar longitudinalmente la segunda tira de carga sobre el cilindro, concentrándola sobre las líneas marcadas en los extremos del mismo (figura 113).

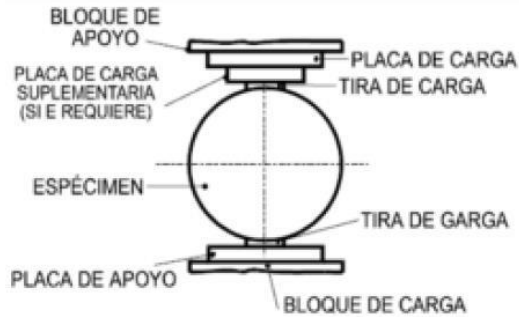


Figura 113. Posición del espécimen en la máquina de prueba. Fuente: NMX-C-163-ONNCCE-2019.

4. Se colocó la placa de acero suplementaria, cuidando que el centro del espécimen se encontrara directamente debajo del centro de la placa de carga y de la placa de apoyo de la máquina de prueba.
5. Se aplicó la carga de forma gradual a una velocidad constante hasta llegar a la falla del espécimen (figura 114) y se registró su carga máxima a tensión indirecta de la mezcla de concreto en estudio.



Figura 114. Aplicación de carga a compresión en la sección diametral del cilindro de concreto. Fuente: propia.

Cálculos del ensayo:

La resistencia a tensión por compresión diametral de los especímenes cilíndricos se calculó con la siguiente ecuación.

$$F_{c''T} = \frac{2P}{\pi Ld}$$

Donde:

$F_{c''T}$ = Resistencia a la tensión por compresión diametral, en kg/cm^2

P = carga máxima aplicada en kg

L = longitud en cm

d = diámetro en cm



Observaciones respecto al ensayo:

Las tiras de distribución de carga, empleadas para cada espécimen de prueba, fueron de papel cartón con un espesor aproximado de 3 mm, cortadas a un ancho aproximado de 1" (2.5 cm) y una longitud de 35 cm.

4.4.2.1.7. Resistencia a la tensión por flexión en vigas de 15 cm x 15 cm x 60 cm

Para la obtención del valor del módulo de ruptura de las mezclas de concreto se realizó el ensayo a flexión de vigas de concreto de 15 cm de ancho por 15 cm de espesor por 60 cm de longitud, de acuerdo a lo establecido en la norma mexicana NMX-C-191-ONNCCE-2015 (NMX-C-191-ONNCCE, 2015) y cuyo procedimiento fue el siguiente:

Equipo empleado:

- 3 especímenes prismáticos de 15 cm x 15 cm x 60 cm
- Equipo medidor de dimensiones (Flexómetro)
- Una escuadra y regla
- Una franela
- Máquina de ensayo
- Un dispositivo de aplicación de carga capaz de aplicar cargas en los tercios del claro
- Un micrómetro de caratula
- Un marcador de tinta indeleble o crayola

Procedimiento:

1. Se determinaron las dimensiones de cada una de las vigas en estudio, con ayuda del vernier y del flexómetro, volteando el espécimen sobre un lado respecto a la posición del moldeado y midiendo la base, el espesor y la longitud de cada una de las vigas.
2. Con ayuda de la escuadra, la regla y el marcador, se marcaron las paredes de la viga a los puntos tercios del claro, dejando 75 mm a cada lado de los tercios marcados para tener la referencia al realizar el ensayo.

3. Se posicionó la viga en el dispositivo de ensayo (apoyos), centrándola en los bloques de apoyo (figura 115.a) y éstos a su vez se centraron respecto a la placa de carga de la máquina de ensayo. Posteriormente, los bloques de aplicación de carga se colocaron en contacto con la superficie del espécimen en los puntos tercios entre los apoyos (figura 115.b).



Figura 115. a) colocación de viga sobre los apoyos con ayuda de las marcas de referencia; b) colocación de los bloques de aplicación de carga sobre la superficie de la viga. Fuente: propia.

4. Se posicionó el micrómetro de caratula, sobre el bloque de apoyo de la máquina y se ajustó a ceros tanto el micrómetro como la máquina de ensayos.
5. Se aplicó la carga sobre el espécimen de prueba, a una velocidad uniforme, registrando la carga respecto a la deformación leída en el micrómetro hasta la falla de la muestra (figura 116); para después, registrar su carga ultima de falla y la ubicación de la misma, siendo que los cálculos para encontrar el esfuerzo por flexión del concreto dependen de la posición de la falla dentro o fuera del tercio medio marcado en la pared de la viga.



Figura 116. Aplicación de la carga sobre la viga hasta su falla. Fuente: propia.



Cálculos del ensayo:

Si la falla se presentó en el tercio medio del claro, el módulo de ruptura se calculó como sigue:

$$MR = \frac{P \times L}{b \times d^2}$$

Donde:

MR = Módulo de Ruptura o resistencia a la tensión por flexión, en MPa (kg/cm²)

P = Carga máxima aplicada, en N (kgf)

L = Distancia entre apoyos, en cm

b = Ancho promedio del espécimen, en cm

d = Peralte o espesor promedio del espécimen, en cm

Por el contrario, si la falla se presentaba fuera del tercio medio del claro, en no más del 5% de su longitud, se calculó el módulo de ruptura como sigue:

$$MR = \frac{3 \times P \times a}{b \times d^2}$$

Donde:

a = Distancia promedio entre la línea de falla y el apoyo más cercano en la superficie de la viga, en mm

Cuando la falla ocurría fuera del tercio medio del claro en más del 5% se desechó el resultado de la prueba.

4.4.2.2. Ensayos por durabilidad en el concreto endurecido

Los ensayos por durabilidad que se aplican a muestras de concreto hidráulico a nivel de laboratorio, son ensayos destructivos, que evalúan la capacidad para resistir satisfactoriamente las cargas de diseño, la acción ambiental, ataque químico o abrasión y de proteger principalmente al acero de refuerzo de la corrosión o cualquier otro proceso de

deterioro, con el objeto de que el concreto mantenga su forma original, condición de servicio y propiedades mecánicas durante la vida útil del concreto hidráulico dentro de una obra civil.

Todas las pruebas de durabilidad, requirieron por mezcla en estudio, un mínimo de 3 discos de concreto para la obtención de un valor promedio, con dimensiones de 10 cm de diámetro y 5 cm de espesor, obtenidos a partir de cortar cilindros de concreto de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, como se muestra en la siguiente figura.



Figura 117. Obtención de discos de concreto a partir del corte de cilindros de 10 cm \varnothing x 20 cm h. Fuente: propia.

Una vez obtenidos los discos de concreto para cada mezcla en estudio, los cuales fueron cortados 7 días antes de realizar los ensayos por durabilidad, fueron sumergidos en un recipiente con agua con el propósito de continuar con su curado por inmersión hasta el día de prueba especificada.

Las pruebas fueron realizadas a la edad de 180 días después de la elaboración de los especímenes y en el caso del ensayo de la determinación de la profundidad de carbonatación, se realizó la prueba a vigas ensayadas a flexión a los 28 días de edad y las cuales fueron expuestas al ambiente, en dirección de los vientos dominantes de la ciudad de Morelia, Michoacán (sentido suroeste) para posteriormente hacer el conteo de 180 días y realizar la prueba correspondiente.

A continuación, se presentan los diferentes ensayos por durabilidad, realizados en esta investigación, de acuerdo con las diferentes clases de exposición a las cuales pueden estar sujetas las mezclas de concreto en estudio una vez que se encuentren en la superficie de los pavimentos rígidos o en cualquier otra obra civil de construcción.



Los ensayos se llevaron a cabo bajo lo recomendado por la normativa correspondiente; pero también, fue consultado el “manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado” de la Red Iberoamericana XV.B. “DURAR” para su correcta ejecución.

4.4.2.2.1. Resistencia al Ataque por Sulfatos

Los sulfatos que se encuentran en contacto con el concreto hidráulico, se consideran sustancias químicas agresivas que afectan la durabilidad del material y deterioran su matriz cementicia.

Cuando las estructuras de concreto hidráulico se encuentran en ambientes de agresividad química (por gases, líquidos o sólidos) en contacto con agua, se puede presentar soluciones saturadas de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.

Los sulfatos reaccionan primero con el aluminato tricálcico; una reacción subsecuente con la cal libre (CaO) produce una masa voluminosa que agrieta al concreto y fomenta un ataque extra. El ataque por sulfatos se manifiesta por la pérdida progresiva de la resistencia de la pasta de cemento debido a la pérdida de cohesión entre los productos de hidratación. Los productos expansivos generan agrietamientos por donde posteriormente ingresan otros agentes que pueden acelerar el deterioro, como lo son los iones cloruro (Bernabé Reyes, 2015).

La prueba a nivel del laboratorio no se encuentra normada para concreto hidráulico; sin embargo, simula mediante solución preparada de sulfato de sodio, las condiciones de exposición a sales a las que se encuentran sometidos en la mayoría de los casos los elementos de concreto hidráulico en ambientes industriales y marinos, los cuales sufren constantes cambios de secado y humedecimiento, provocando el deterioro de la matriz de concreto, para finalmente reducir las condiciones de servicio del elemento.

El ensayo de resistencia al ataque por sulfatos, se realizó siguiendo lo descrito por la norma correspondiente (NMX-C-075-ONNCCE, 2018) a la edad de 180 días de elaboración de las diferentes mezclas en estudio y cuyo procedimiento fue el siguiente.

Equipo empleado:

- 5 discos de concreto de 10 cm Ø x 5 cm h, por mezcla en estudio



- Tres recipientes de plástico con tapa, con capacidad suficiente para alojar las muestras y la solución de sulfato de sodio
- Tres rejillas de plástico con aberturas que permitan que la solución de sulfato de sodio llegue a las muestras y de dimensiones tales que puedan colocarse en el fondo de los recipientes de plástico.
- Un horno de secado
- Una balanza con aproximación al décimo de gramo
- Charolas metálicas
- Un taladro con espas mezcladoras
- Tres recipientes con capacidad de 19 litros para realizar la solución de sulfato
- Una resistencia eléctrica
- Un termómetro de mercurio
- Guantes de látex
- Sulfato de sodio en forma anhidra (Na_2SO_4)
- Agua potable para la solución

Procedimiento:

1. Se extrajeron los 5 discos de concreto, por mezcla en estudio, del recipiente de curado y se enumeraron para su identificación.
2. Se colocaron los discos de concreto en las charolas metálicas y se ingresaron al horno de secado a una temperatura de $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ hasta masa constante, registrando dicho valor como “ m_s del ciclo 0”. Para el caso de la presente investigación, los discos de concreto alcanzaron su masa constante al séptimo día de haber ingresado al horno de secado.
3. Durante el tiempo de secado de las muestras de concreto, se realizó la solución de sulfato de sodio (Na_2SO_4), de acuerdo con lo establecido en la norma NMX-C-075-ONNCCE-2018, con una concentración de 350 g de sulfato por litro de agua a una temperatura comprendida entre 25 °C y 30 °C , medida con el termómetro de mercurio y alcanzada al calentar el agua con la resistencia eléctrica.

Una vez alcanzada la temperatura del agua contenida en el recipiente de 19 litros, se incorporó el sulfato y con ayuda de las espas giratorias adaptadas en el taladro, se agitó

la solución por un tiempo aproximado de 1 hora (figura 118), se tapó el recipiente y se dejó enfriar la solución a temperatura ambiente del laboratorio hasta antes de su empleo.



Figura 118. Elaboración de la solución de sulfato de sodio. Fuente: propia.

4. Una vez obtenida la masa seca de los especímenes por mezcla, se destaparon los recipientes que contenían la solución (3 recipientes con un total de 30 litros de solución de sulfato de sodio), se rompió la costra de sal que se formó en la superficie del líquido, se agitó completamente la solución y se vertió en los tres recipientes de plástico con su rejilla en el fondo (figura 119.a), procurando mantener un tirante de solución de no menos de 2 cm por encima de la superficie de los especímenes una vez sumergidos en la solución.
5. Con ayuda de los guantes de látex, se sumergieron los discos de concreto (los cuales se dejaron enfriar a temperatura ambiente después de sacarlos del horno) en la solución de sulfato de sodio (figura 119.b) y se taparon los recipientes de plástico; durante un tiempo de 17 ± 1 horas y manteniendo una temperatura aproximada de laboratorio de $22 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, identificando el presente paso como “ciclo 1”.
6. Concluidas las 17 ± 1 horas, se extrajeron de cada uno de los recipientes los especímenes, se ingresaron nuevamente al horno de secado a temperatura de $110 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 7 días (figura 119.c).
7. Pasado el tiempo de secado, se extrajeron los discos del horno y con ayuda de la balanza se obtuvo la masa seca (figura 119.d), registrando dicha masa como “ m_s del ciclo 1”.



Figura 119. Primer ciclo de prueba: a) Recipientes de plástico adaptados en su fondo con rejilla perforada, b) Inmersión de los discos de concreto en la solución de sulfato, c) Secado de las muestras después de la inmersión, d) Obtención de la masa seca. Fuente: propia.

8. Se dejaron enfriar los discos a temperatura ambiente y luego se volvieron a sumergir en la solución de sulfato iniciando un nuevo ciclo; es decir repitiendo los pasos 5, 6 y 7 hasta cumplir con el número de ciclos necesarios para registrar una pérdida de masa de la muestra inferior al 5% respecto a la masa seca registrada en el “ciclo 0” o hasta observar una desintegración total del material (figura 120).



Figura 120. Proceso de desintegración de los discos de concreto. Fuente: propia.

Cálculos del ensayo:

Al finalizar el registro de la masa de cada espécimen por cada ciclo de prueba, se llevó a cabo el cálculo del porcentaje de pérdida de masa, respecto al ciclo inicial o ciclo 0 del ensayo, como a continuación se presenta:

$$\% \text{ Pérdida de masa} = \left(\frac{M_s \text{ ciclo } 0 - M_s \text{ ciclo } i}{M_s \text{ ciclo } 0} \right) \times 100$$

Donde:

Ms = Masa seca y constante, medida después de extraer el espécimen del horno de secado, en g
i = Número de ciclo (del 1 al 7)



Observaciones y especificaciones respecto a los resultados del ensayo:

Se consideró haber alcanzado la masa constante de los discos de concreto, cuando el último registro de pérdida de masa fue menor que 0.1% de la masa anterior registrada. Se comprobaron las pérdidas de masa de los discos al sacarlos del horno y determinando cada 24 horas su masa sin enfriamiento.

Se registró la pérdida de masa de las muestras junto con un registro de deterioros progresivos que se observaron en la superficie y aristas de los discos de concreto a partir del humedecimiento en sulfato y secado de estos.

4.4.2.2.2. Determinación de la Profundidad de Carbonatación

La carbonatación, en mezclas de concreto hidráulico, se define como la reacción provocada del CO₂ en presencia de humedades relativas mayores a 50%, con los productos hidratados del cemento, produciendo CaCO₃ (carbonato de calcio) y reduciendo la alcalinidad normal (pH entre 12.0 y 13.5) del concreto. El dióxido de carbono (CO₂) es uno de los agentes que influyen en la degradación del acero en el concreto hidráulico, producido mayoritariamente en zonas urbanas e industriales.

Cuando el concreto se carbonata, el pH disminuye por debajo de 10 y la capa pasiva que protege al acero de refuerzo se desestabiliza, favoreciendo así el inicio de la corrosión del acero (NMX-C-515-ONNCCE, 2016).

La medición de la carbonatación se llevó a cabo mediante el procedimiento descrito por la norma NMX-C-515-ONNCCE-2016 y permite, a través de una ecuación hacer la predicción de vida de servicio de cada una de las mezclas en estudio.

Equipo empleado:

- 3 mitades de vigas por mezcla, resultantes del ensayo de flexión a 28 días y expuestas al ambiente durante 180 días
- Dispositivo de medición lineal: Vernier
- Máquina de ensayos con el dispositivo de aplicación de carga a flexión

- Solución indicadora ácido-base: fenolftaleína (1 g fenolftaleína + 100 ml de alcohol isopropílico o etanol)
- Atomizador para rociar la solución indicadora
- Cepillo de cerdas de plástico

Procedimiento:

1. Para poder iniciar con el ensayo, cada mitad de viga expuesta a la humedad del ambiente fue fallada en su sección transversal, con ayuda de la máquina de ensayos y el dispositivo de aplicación de carga a flexión, como se muestra en la figura 121, con el propósito de encontrar la distancia carbonatada representativa de cada muestra y desechando la parte frontal expuesta ante los vientos dominantes.



Figura 121. Obtención del espécimen de prueba a partir de la mitad de una viga fallada en su sección transversal. Fuente: propia.

2. La superficie de cada espécimen fracturado, fue limpiado con el cepillo de cerdas de plástico, para posteriormente aplicar con el atomizador el indicador de ácido-base (figura 122), en una forma uniforme sobre la superficie a evaluar, sin permitir escurrimientos de la solución, con el fin de evitar la contaminación de la sección carbonatada.

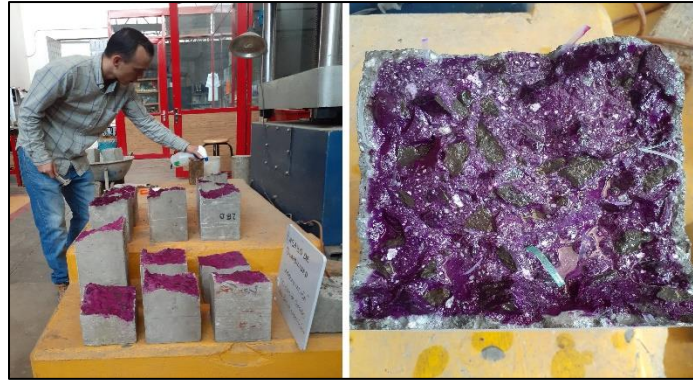


Figura 122. Aplicación del indicador de ácido-base sobre la superficie del espécimen fracturado. Fuente: propia.

3. Después de la aplicación de la fenolftaleína, y antes de transcurridos 15 minutos de prueba, se efectuó la medición de la profundidad de la zona incolora en la superficie del espécimen fracturado (figura 123), determinándose un promedio de 3 valores máximos dependiendo la cara expuesta del a viga y omitiendo la zona de la cara donde se asentó la mitad de la viga al exponerse al CO₂ del ambiente.



Figura 123. Medición de la profundidad de la zona incolora en la superficie del espécimen fracturado. Fuente: propia.

4. Se registraron cada una de las profundidades carbonatadas con aproximación de 0.1 mm, por fragmento de viga y por mezcla en estudio.

Cálculos del ensayo:

Para estimar la velocidad de carbonatación de las mezclas de concreto en estudio, se relaciona la profundidad de carbonatación con la raíz cuadrada del tiempo de exposición, como a continuación se presenta:

$$X_{CO_2} = K_{CO_2} \cdot \sqrt{t}$$

Donde:

X_{CO_2} = profundidad de carbonatación, en mm

K_{CO_2} = constante de carbonatación en mm/año^{1/2}

t = tiempo de exposición del concreto al ambiente, en años

Siendo que, el presente ensayo determina la profundidad de carbonatación, es posible predecir la progresión de la misma y el tiempo en el cual la carbonatación alcanzará el refuerzo del concreto, con las siguientes ecuaciones:

$$K_{CO_2} = \frac{X_{CO_2}}{\sqrt{t}}$$

$$t = \frac{t_{den}}{t_{año}}$$

$$t_{pred} = \left(\frac{e_c}{K_{CO_2}} \right)^2$$

Donde:

t_{den} = tiempo de exposición del concreto, en días, hasta cumplir la edad de ensayo

$t_{año}$ = cantidad de días en un año, 365.25 días.

t_{pred} = tiempo estimado en que el frente de carbonatación llegue al refuerzo, en años

e_c = recubrimiento de concreto del acero de refuerzo, en mm

Especificaciones respecto a resultados del ensayo:

Los criterios de evaluación para indicar la resistencia a la carbonatación del concreto, respecto a los resultados de la prueba se muestran en la tabla 56.

Tabla 56. Criterios de evaluación de la resistencia a la carbonatación del concreto hidráulico (NMX-C-515-ONNCCE, 2016).

Constante de Carbonatación	Calidad del concreto hidráulico
----------------------------	---------------------------------

$< 3 \text{ mm/año}^{1/2}$	Concreto con elevada resistencia a la carbonatación
$3 \text{ a } 6 \text{ mm/año}^{1/2}$	Concreto de calidad media con inicio de carbonatación
$> 6 \text{ mm/año}^{1/2}$	Concreto de muy baja resistencia a la carbonatación

4.4.2.2.3. Determinación de la Absorción Capilar

El manual de la Red “Durar” (Red Iberoamericana XV.B. "DURAR", 1998) define a la absorción capilar del concreto hidráulico como: “la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los poros capilares cuando el concreto se encuentra en contacto con agua líquida”. Representa la porosidad efectiva o accesible al agua y por tanto a los agentes agresivos del ambiente.

Los poros capilares constituyen la causa principal de la permeabilidad de la pasta de cemento endurecida, así como su vulnerabilidad a la acción de agentes agresivos del ambiente. El concreto hidráulico que se encuentra con una nula presencia de capilaridad interconectada, presentará en su estructura una condición de durabilidad alta (Red Iberoamericana XV.B. "DURAR", 1998).

El ensayo se llevó a cabo, una vez que cumplieron 180 días los especímenes elaborados por cada mezcla en estudio, siguiendo el procedimiento descrito por la norma NMX-C-504-ONNCCE-2015.

Equipo empleado:

- 3 discos de concreto de 10 cm Ø x 5 cm h, por mezcla en estudio
- Dispositivo de medición: Vernier y Cronómetro
- Recipientes o contenedores de plástico para almacenamiento con tapa
- Esponjas del tamaño de la base de los contenedores
- Horno de secado
- Parrilla eléctrica
- Material de sellado (80% parafina + 20% brea)
- Recipiente metálico para contener el material de sellado



- Brocha de cerdas suaves
- Bolsas de plástico
- Ligas
- Tela absorbente (franela)
- Balanza con aproximación al décimo de gramo

Procedimiento:

1. Una vez extraídos los discos de concretos de los recipientes de curado, se colocaron en el horno de secado a una temperatura de $50\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ durante 3 días.
2. Pasados los 3 días, se colocaron los especímenes dentro de un recipiente hermético sellado durante un tiempo de 15 días, dejando un espacio de aproximadamente 5 cm entre cada disco de concreto, para permitir el flujo libre de aire alrededor de estos, asegurando evitar el contacto con las paredes del recipiente.
3. Se extrajeron los especímenes de prueba del recipiente de almacenamiento y se registró su masa antes de sellar las superficies laterales.
4. Con ayuda del vernier, se midió al menos cuatro diámetros de cada disco en la superficie que se expuso al agua y se calculó un diámetro promedio por espécimen.
5. Se colocaron las esponjas en la parte inferior de los recipientes que contendrían los especímenes de prueba y se llenaron con agua del grifo para que el nivel del agua fuera de 3 ± 1 mm por encima de la parte superior de cada esponja. Dicho nivel de agua, se mantuvo durante todo el ensaye.
6. Se selló la superficie lateral de cada espécimen (figura 124) utilizando el material de sellado (parafina y brea) sometido a la fuente de calor (parrilla eléctrica) para aplicarlo en forma líquida con la brocha.



Figura 124. Sellado de la superficie lateral de los especímenes. Fuente: propia.

7. Se tomó cada disco ya sellado en su superficie lateral y se selló el extremo que no se expondría al agua (figura 125), con una bolsa de plástico detenida con una liga.

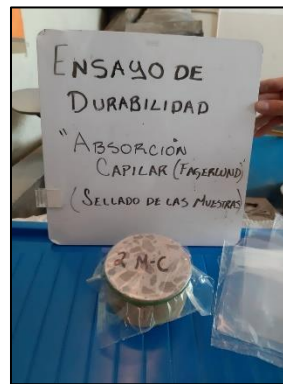


Figura 125. Sellado del extremo opuesto de prueba. Fuente: propia.

8. Se midió la masa de cada disco sellado y se registró como la masa inicial (m_0).
9. Se inicio la medida del tiempo, con ayuda del cronómetro, e inmediatamente se colocó la superficie de ensayo de cada espécimen sobre la esponja (figura 126.a), anotando la fecha y hora del contacto inicial con agua.
10. Se determinó la masa que iba adquiriendo cada disco de concreto en los intervalos de tiempo de 60 s, 5 min, 10 min, 20 min, 30 min, 60 min, 2 horas, 3 horas, 4 horas, 5 horas, 6 horas, 24 horas, 48 horas, 72 horas, 96 horas, 120 horas, 144 horas, 168 horas y 192 horas después del primer contacto con el agua; retirado el espécimen del contenedor, secando con la franela hasta alcanzar una condición de superficialmente seco, invirtiendo el disco de modo que la superficie húmeda no entrará en contacto

con el platillo de la balanza (figura 126.b), registrando cada masa como m_t y reinstalando inmediatamente cada espécimen en el recipiente.

El recipiente se mantuvo cerrado mientras no se extraía ningún disco para evitar la evaporación del agua y por consiguiente la disminución del tirante de agua.



Figura 126. a) Colocación de los discos sobre la esponja, b) medida de la masa del disco invertido sobre la balanza. Fuente: propia.

11. Una vez que se obtuvieron todas las masas, de cada disco de concreto por mezcla en estudio, se procedió a realizar el cálculo para la obtención de la sorción capilar y del índice de absorción.

Cálculos del ensayo:

El manual de la Red “DURAR” menciona que la metodología de ensayo para la determinación de la absorción capilar se debe a Fagerlund, el cual se basa en tres coeficientes, los cuales se calculan con base en las siguientes ecuaciones:

- Coeficiente de la resistencia a la penetración del agua (m):

$$m = \frac{t}{z^2}, s/m^2$$

Donde

z = la profundidad de penetración del agua, en m^2 , al tiempo en segundos “ t ”.

- Coeficiente de absorción capilar (k):

$$k = \frac{(m_t - m_0)/A}{\sqrt{t}}, kg/m^2 s^{1/2}$$

Donde:



m_0 = masa inicial del espécimen antes de ingresar en contacto con el agua, en kg

m_t = masa del espécimen después de cada intervalo de tiempo, en kg

A = área expuesta del espécimen, en m^2

- Porosidad efectiva (ϵ_e):

$$\epsilon_e = \frac{k\sqrt{m}}{1000}, \%$$

Con los tres coeficientes anteriores, dados por Fagerlund, se calcula una Sorción Capilar (S):

$$S = \frac{1}{\sqrt{m}}, mm/h^{1/2} \text{ o } m/s^{1/2}$$

Mientras que, la norma NMX-C-504-ONNCCE-2015 indica realizar el cálculo del índice de absorción, en mm, definido como “el cambio en la masa dividida entre el producto del área transversal del espécimen por la densidad del agua (0.001 g/mm^3)”, como a continuación se presenta:

$$I = \frac{m_t - m_0}{a \times d}$$

Donde:

I = índice de absorción, en mm

m_t = masa, en el tiempo t , en g

m_0 = masa, en el tiempo 0 , en g

a = zona expuesta de la muestra, en mm^2

d = densidad del agua en g/mm^3

Posteriormente se deben encontrar la tasa inicial y la tasa secundaria de absorción de agua del espécimen ($mm/s^{1/2}$), definida como “la pendiente del análisis de regresión lineal del índice de absorción contra la raíz cuadrada del tiempo ($s^{1/2}$) mediante el método de mínimos cuadrados aplicado a cada espécimen”.



Especificaciones respecto a resultados del ensayo:

El manual de la Red “DURAR” (Red Iberoamericana XV.B. "DURAR", 1998), proporciona un criterio de evaluación, respecto a los valores obtenidos de la sorción capilar S , en donde especifica que para un espesor de recubrimiento de 3 cm en ambientes severos, se recomiendan concretos con sorción capilar $S \leq 5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^{1/2}$ ($0.05 \text{ mm/s}^{1/2}$) y en medios menos severos puede ser hasta de $1 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$ ($0.1 \text{ mm/s}^{1/2}$); siendo así que valores mayores a los anteriores, se recomiendan para ambientes no corrosivos.

La norma NMX-C-504-ONNCCE-2015, señala que si los datos de espécimen no siguen una relación lineal (un coeficiente de correlación $R < 0.98$), entonces se invalida el resultado de la tasa de absorción del espécimen.

5. Resultados y discusiones

El presente capítulo está conformado por los valores cuantificados en cada una de los ensayos aplicados a los diferentes especímenes elaborados por cada mezcla de concreto en estado fresco y endurecido; además, de ser un complemento de las características, adquiridas en el laboratorio, de los materiales utilizados para cada una de las mezclas elaboradas y que se encuentran definidas en el apartado 4.2. de esta investigación.

La cuantificación se llevó a cabo mediante tablas de cálculo, basadas en las ecuaciones proporcionadas por la normativa vigente, con el propósito de elaborar gráficas comparativas de resultados en donde se integraron las cinco mezclas en estudio, de tal forma que se pudo determinar el desempeño físico, mecánico y por durabilidad de cada una de ellas; además de, verificar su calidad y la influencia tanto del material producto de PET reciclado como de la CBC, respecto al comportamiento obtenido de la mezcla control (M-C).

Las cinco mezclas de concreto fueron nombradas e identificadas, durante toda la investigación, como a continuación se presentan:

1. **M-C** = Mezcla Control o Mezcla convencional de concreto hidráulico.
2. **PR-0.8** = Mezcla de concreto con adición de 0.8% de fibra de PET.
3. **PM-0.8** = Mezcla de concreto con adición de 0.8% de PET molido.
4. **PR0.8 + CBC15** = Mezcla de concreto con adición de 0.8% de fibra de PET y 15% de Ceniza de Bagazo de Caña.
5. **PM0.8 + CBC15** = Mezcla de concreto con adición de 0.8% de PET molido y 15% de Ceniza de Bagazo de Caña.

5.1. Propiedades en estado fresco

Posterior a la elaboración de cada una de las mezclas y antes de ser colocadas en cada uno de los especímenes de prueba se determinó el revenimiento, el índice de pH y la temperatura.

En la tabla 57 se muestran los resultados obtenidos del valor medido en la prueba de revenimiento de cada una de las mezclas:

Tabla 57. Resultados de revenimiento en las mezclas en estudio.

Revenimiento, cm			
Mezcla	Revenimiento nominal (cm)	Revenimiento real (cm)	Tolerancia (cm)
M-C	7.5	9.5	2.5
PR-0.8	7.5	10	2.5
PM-0.8	7.5	9.5	2.5
PR0.8 + CBC15	7.5	10	2.5
PM0.8 + CBC15	7.5	10	2.5

Para el caso de las cinco mezclas de concreto, se observa en la tabla 57, que los valores medidos de revenimiento se encuentran al límite superior de la tolerancia recomendada por la norma NMX-C-156-ONNCCE respecto al revenimiento de diseño de 7.5 cm; es decir que, todas las mezclas cumplieron con el revenimiento, presentando un ligero exceso de agua en las mezclas, haciéndolas más fluidas, pero siendo trabajables para los fines de estudio.

La trabajabilidad que se observó en las dos mezclas con adición de fibra de PET (PR-0.8 y PR0.8 + CBC15) fue diferente a las demás mezclas, siendo que estas al momento de estar en contacto la pasta y la fibra, presentaban una mayor consistencia entre las partículas; mientras que la mezcla M-C, PM-0.8 y PM0.8 + CBC15 se dejaba notar el ligero exceso de agua en su superficie.

De acuerdo con los indicadores para medir el potencial de hidrogeno “pH”, todas las mezclas presentaron un valor de entre 11 y 13 (figura 127), lo cual indica que son mezclas de carácter alcalino.



Figura 127. Resultados del pH de las mezclas en estudio.

Mientras que, la temperatura adquirida en cada una de las mezclas por medio del termómetro de vástago fue de 22 °C, cuyo valor es apto para la fabricación de los especímenes de prueba de acuerdo a las condiciones de temperatura de laboratorio.

5.2. Propiedades en estado endurecido

5.2.1. Ensayos físico-mecánicos

En este tipo de ensayos, el resultado constó de evaluar tres especímenes por forma (cilíndricos y prismáticos) y por mezcla, de tal manera de encontrar un valor promedio a la edad de 7, 28, 90 y 180 días después de la elaboración y curado de todos los especímenes. Cada uno de los ensayos presentan los siguientes resultados.

5.2.1.1. Resistividad eléctrica

Los resultados referentes a este ensayo se presentan en las figuras 128, 129 y 130; los cuales fueron obtenidos a partir de someter cilindros de 10 cm Ø x 20 cm h, cilindros de 15 cm Ø x 30 cm h y vigas de 15 cm x 15 cm x 60 cm en posición longitudinal. Los valores obtenidos son significativos de durabilidad, siendo cada tipo de concreto elaborado, un material con un riesgo de corrosión muy alto o muy bajo, según lo especificado en el apartado 4.4.2.1.1. de esta investigación.

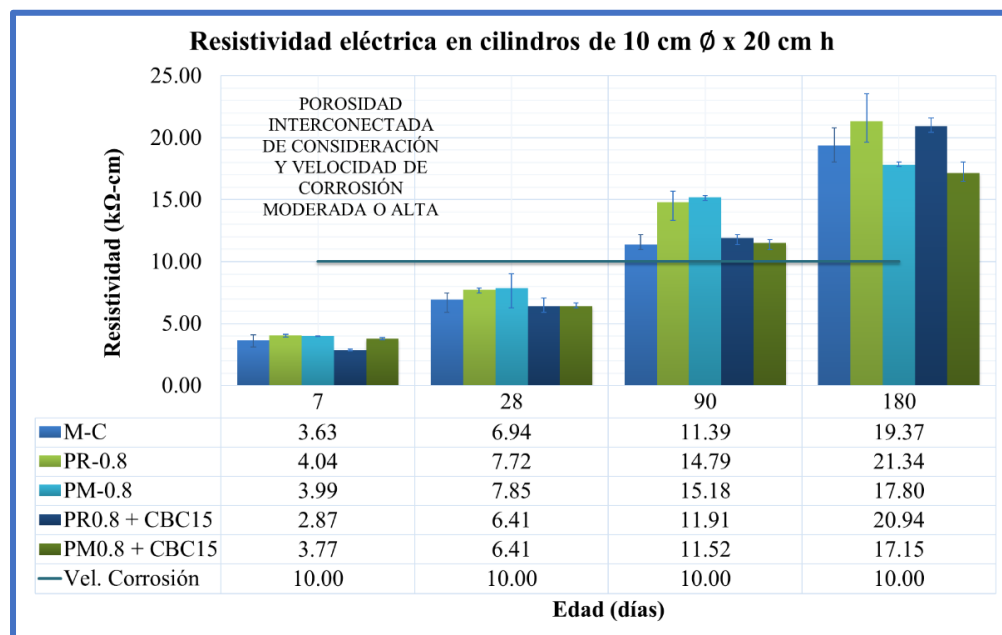


Figura 128. Resistividad eléctrica en cilindros de 10 cm x 20 cm.

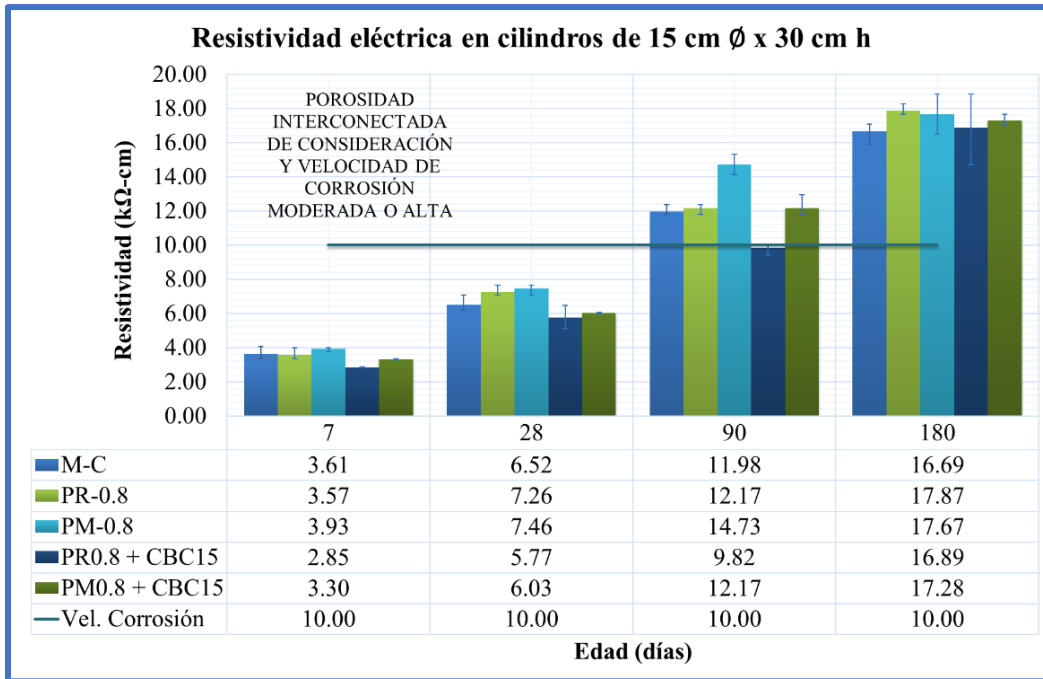


Figura 129. Resistividad eléctrica en cilindros de 15 cm x 20 cm.

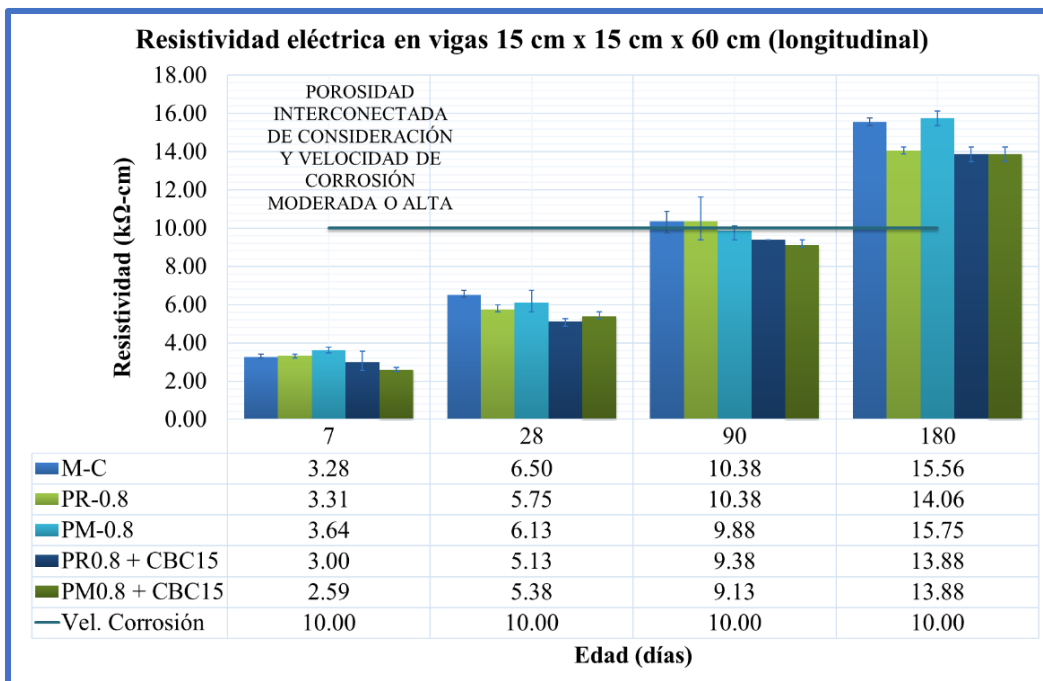


Figura 130. Resistividad eléctrica medida longitudinalmente en vigas de 15 cm x 15 cm x 60 cm.



De acuerdo con lo observado en los resultados obtenidos para cada espécimen y en todas las mezclas en estudio, se presenta un incremento del valor de resistividad eléctrica al paso del tiempo, alcanzando a los 28 días de edad valores menores a 10 k Ω -cm; es decir, todas las mezclas de concreto presentan a la edad de 28 días una porosidad interconectada excesiva, permitiendo que el transporte de agentes agresivos sea extremadamente rápido, según lo especificado en la tabla 54 de esta investigación y por la norma NMX-C-514-ONNCCE-2019. Cabe señalar, que la mezcla PR0.8 + CBC15 es la que menor valor alcanza para los diferentes especímenes a los 7 y 28 días de edad (2.85 k Ω -cm y 5.13 k Ω -cm respectivamente), seguido de la mezcla PM0.8 + CBC15 (2.59 k Ω -cm y 5.38 k Ω -cm), teniendo una ligera mejoría las mezclas PR-0.8 Y PM-0.8 respecto a la mezcla control (M-C).

A la edad de 90 y 180 días todas las mezclas alcanzaron valores entre 10 k Ω -cm y 50 k Ω -cm, lo que significa que presentaron porosidades interconectadas de consideración, permitiendo que el transporte de agentes agresivos dentro de las mezclas sea rápido. El comportamiento y los valores que presentan las cuatro mezclas modificadas con PET y CBC son muy similares respecto a la mezcla M-C, sin existir valores fuera del rango que forman todas las mezclas (entre 10 y 22 k Ω -cm).

5.2.1.2. *Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU)*

En las figuras 131, 132, 133 y 134 se presentan los valores obtenidos en el ensayo de VPU para los mismos especímenes cilíndricos y prismáticos que fueron utilizados en el ensayo de resistividad eléctrica. Los valores obtenidos desde el día 7 hasta los 180 días de edad de los especímenes, fueron muy similares entre todas las mezclas, alcanzo velocidades de pulso ultrasónico por arriba de 4000 m/s y representando así concretos con pocos vacíos o agrietamiento bajo o nulo en su estructura.

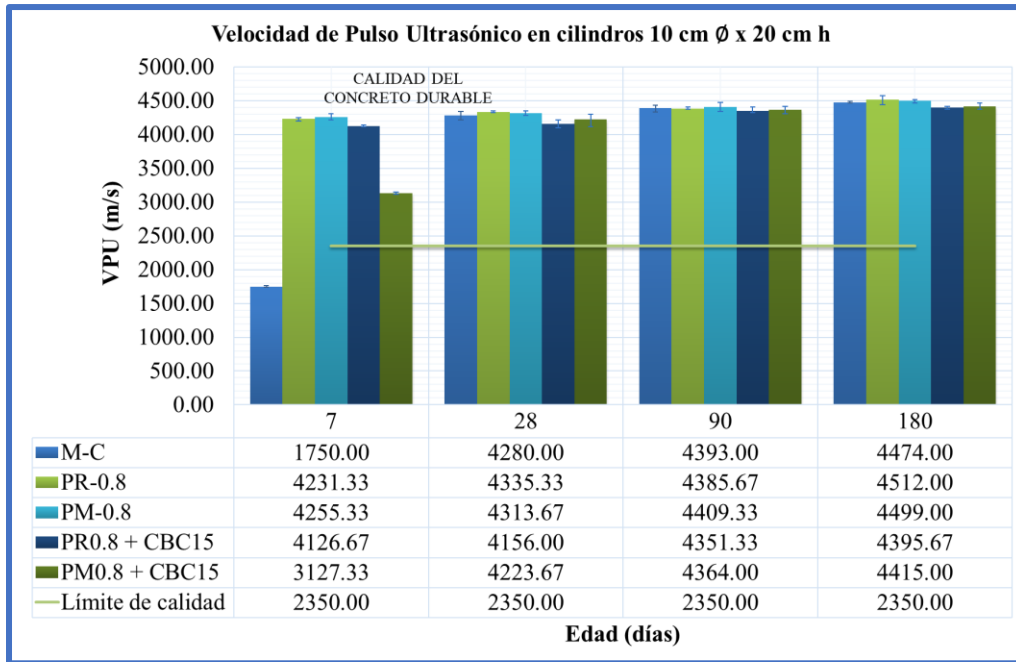


Figura 131. VPU en cilindros de 10 cm x 20 cm.

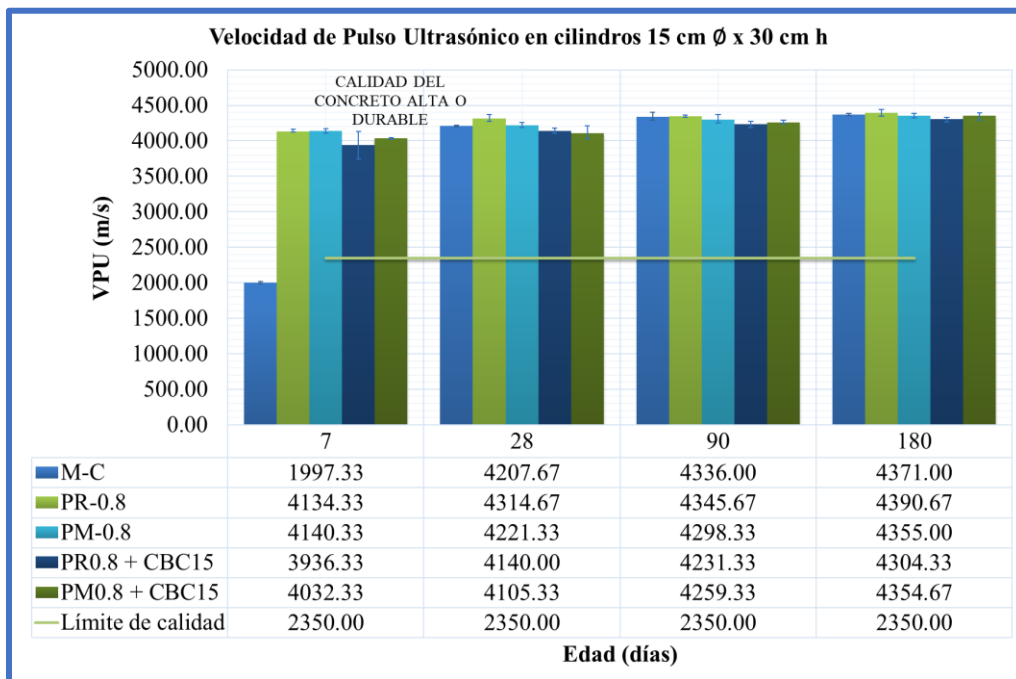


Figura 132. VPU en cilindros de 15 cm x 30 cm

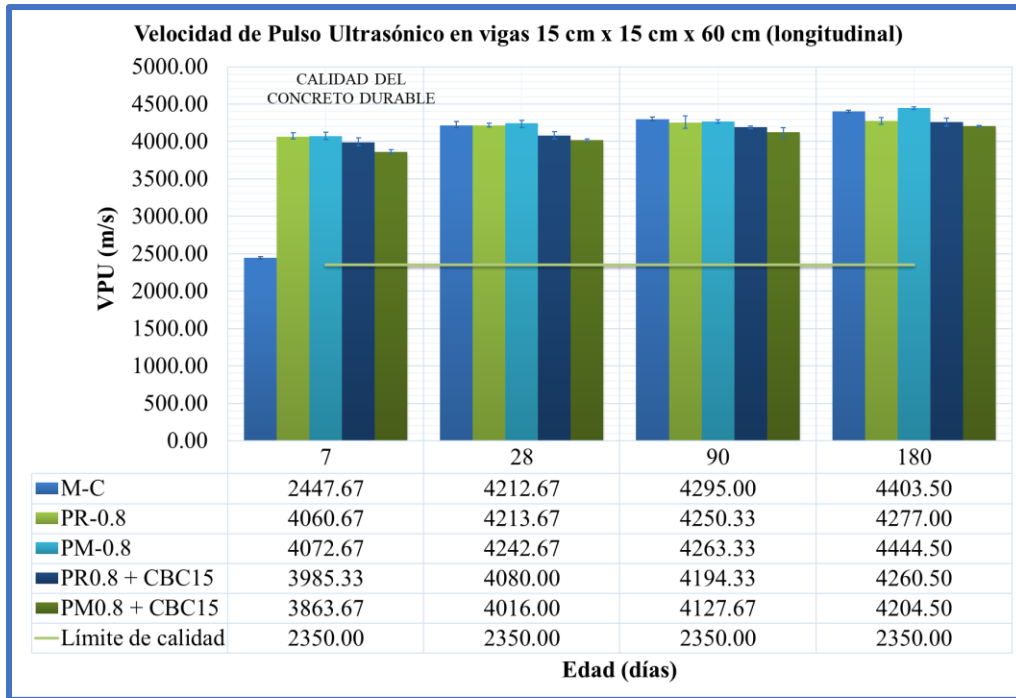


Figura 133. VPU medida longitudinalmente en vigas de 15 cm x 15 cm x 60 cm.

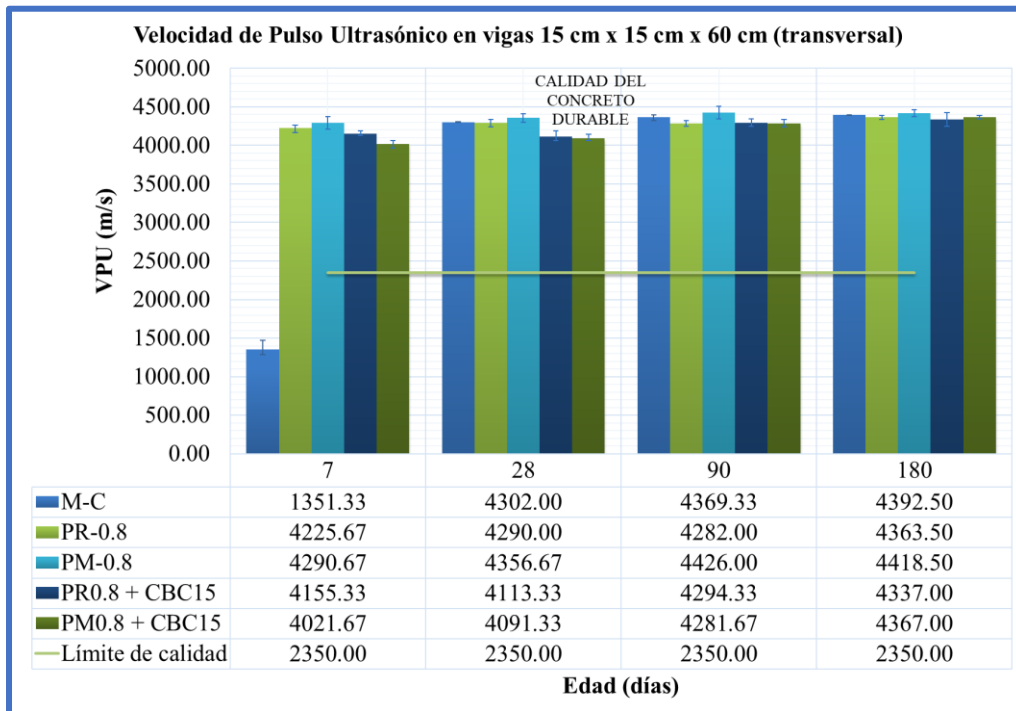


Figura 134. VPU medida transversalmente en vigas de 15 cm x 15 cm x 60 cm

De acuerdo a lo observado en los gráficos anteriores, las mezclas con adición de CBC (PR0.8 + CBC15 y PM0.8 + CBC15) presentan valores menores a las otras tres mezclas sin adición de CBC, a lo largo de las edades de prueba, pero representando todas ellas concretos de calidad buena o durable, según lo establecido en la tabla 55 y por la norma mexicana NMX-C-275-ONNCCE-2004, la cual establece un valor superior a 2350 m/s para identificar a los concretos con pocos vacíos en su estructura.

La mezcla M-C, a la edad de 7 días, presenta valores atípicos de VPU respecto a lo obtenido para las otras mezclas, debido a errores de medición del equipo de prueba.

5.2.1.3. Módulo de elasticidad dinámico (E_d) en cilindros de concreto

A partir de evaluar la VPU en las diferentes mezclas de concreto en estudio, se determinó el módulo de elasticidad dinámico para cilindros de 10 cm \varnothing x 20 cm h, suponiendo un coeficiente de Poisson de 0.15 según lo descrito en el apartado 4.4.2.1.3. y obteniendo valores de densidad de los concretos, como a continuación se presenta:

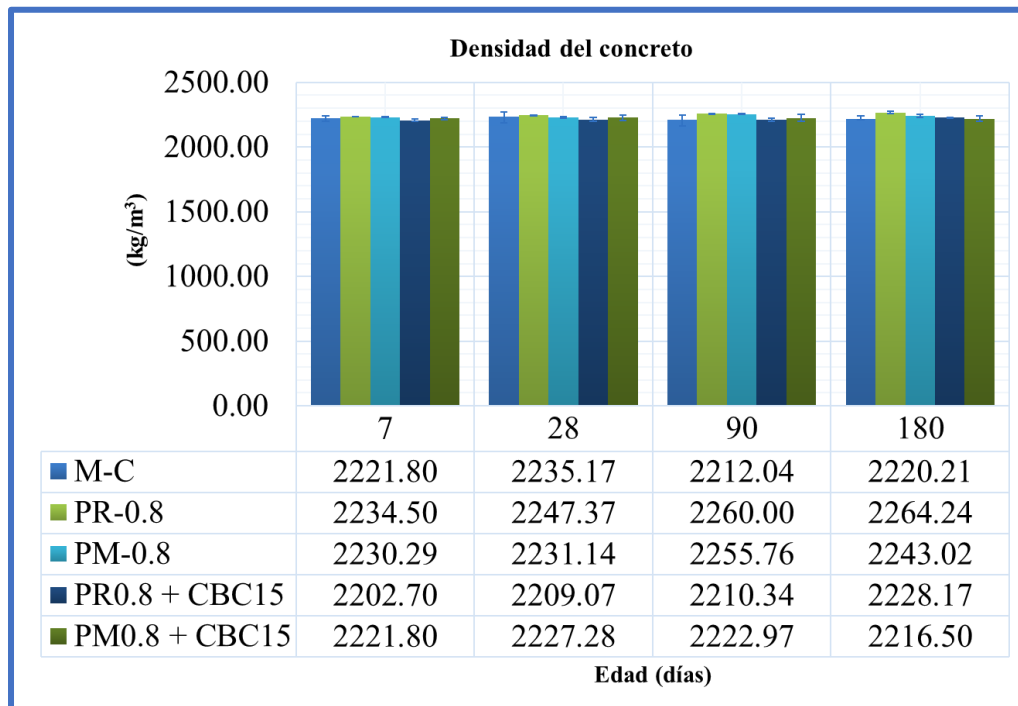


Figura 135. Densidad calculada en cilindros de 10 cm \varnothing x 20 cm h.

Como se observa en la figura 135, la masa volumétrica o densidad de las diferentes mezclas en estudio se encuentra entre 1800 y 2400 kg/m³, obteniendo así concretos de peso normal. También, los valores obtenidos muestran un pequeño incremento de su densidad, en todas las edades de prueba, al incorporar fibra de PET en el concreto (mezcla PR-0.8) respecto al concreto control (M-C) y a los demás concretos modificados, alcanzando un valor de 2264.24 kg/m³ a los 180 días de edad, seguido de la mezcla PM-0.8 con un valor de 2255.76 kg/m³ a los 90 días de edad. En el caso de las mezclas con adición de CBC, sus valores se encuentran ligeramente por debajo de lo que resulta para la mezcla M-C, durante las edades de prueba.

Una vez calculada la densidad de las diferentes mezclas en estudio, se determinó su módulo de elasticidad dinámico, los cuales se presentan en la siguiente figura.

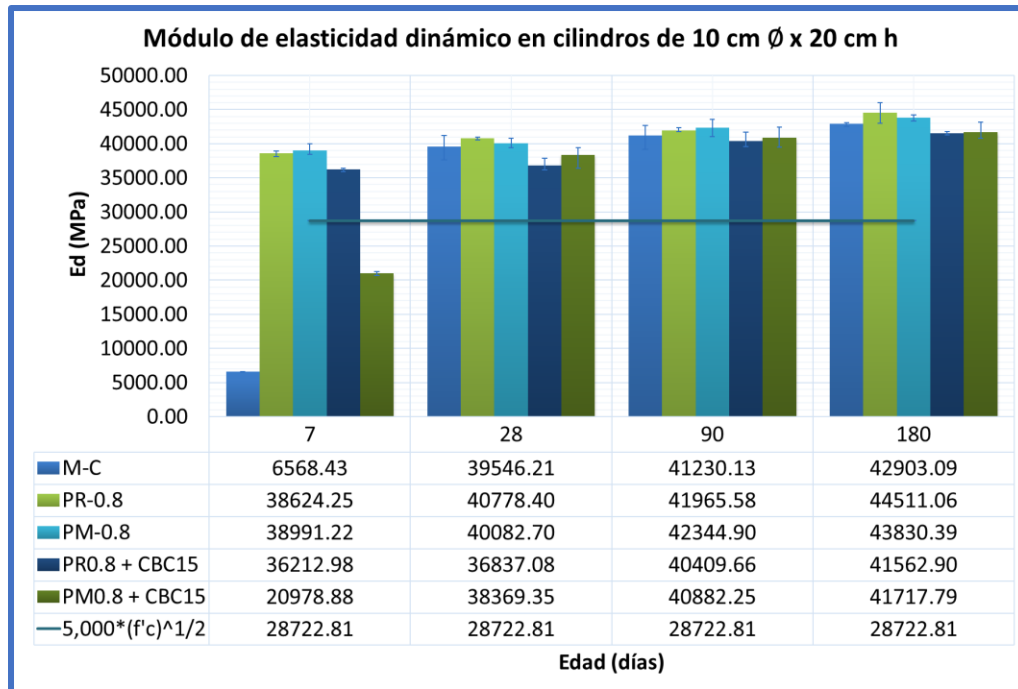


Figura 136. Módulo de elasticidad dinámico a partir de valores de VPU en cilindros de 10 cm x 20 cm.

El gráfico de la figura 136, muestra los valores obtenidos del módulo de elasticidad dinámico a partir de los valores obtenidos de VPU en cilindros de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura y cuyos valores representan un comportamiento muy similar a lo descrito en los resultados de VPU; resaltando que, las mezclas con material de PET (PR-0.8 y PM-0.8) presentan valores mayores de “Ed” respecto a la mezcla M-C y a las mezclas con adición de

CBC (PR0.8 + CBC15 y PM0.8 + CBC15), con valores de 44511.06 MPa y 43830.39 MPa, a 180 días de edad, en el caso de la mezcla PR-0.8 y de PM-0.8 respectivamente. Todas las mezclas de concreto presentaron un rango de variación a la edad de 180 días de “Ed” entre 7,000 y 8,000 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en Megapascales.

Las mezclas PR0.8 + CBC15 y PM0.8 + CBC15 presentaron valores de módulo de elasticidad dinámico menores a los de la mezcla M-C, durante todas las edades de prueba; siendo la mezcla PR + CBC15 la que alcanzo un valor menor a 180 días de 41562.90 MPa.

La mezcla M-C, a la edad de 7 días, presenta valores atípicos de Ed respecto a lo obtenido para las otras mezclas, debido a errores de medición en el ensayo de VPU.

5.2.1.4. Resistencia a la compresión

La resistencia a compresión de los concretos elaborados en la presente investigación partió de un valor de diseño de 330 kg/cm² (33 MPa). Dicha resistencia, se evaluó en cilindros de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, para un periodo de curado de 7, 28, 90 y 180 días. La figura 137, muestra las resistencias a compresión y el comportamiento de los diferentes concretos respecto al tiempo.

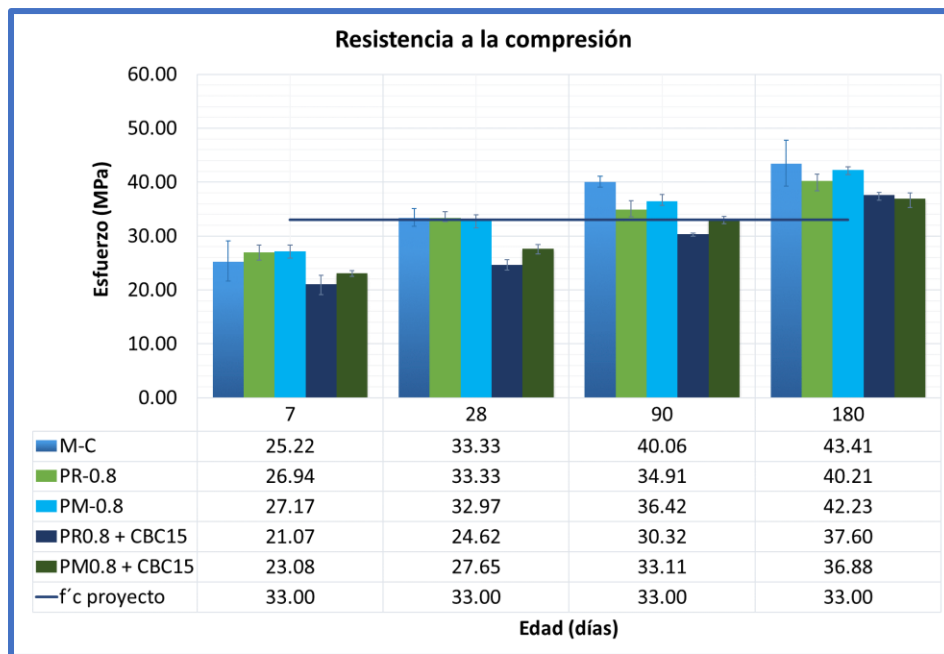


Figura 137. Resistencia a la compresión en cilindros de 10 cm Φ x 20 cm h.

Según lo observado en la figura anterior, la incorporación de CBC en el concreto retardo el desempeño mecánico a compresión respecto al concreto convencional (M-C), siendo que los concretos PR-0.8 + CBC15 y PM-0.8 + CBC15 no alcanzaron el 100% de su resistencia de diseño a los 28 días. La mezcla PR-0.8 + CBC15 alcanzó un valor de 24.62 MPa (75% del $f'c$ diseño); mientras que, la mezcla PM-0.8 + CBC15 su valor fue de 27.65 MPa (84% del $f'c$ diseño). Estas mismas mezclas de concreto, cumplieron con su resistencia a compresión hasta la edad de 180 días, pero obteniendo valores inferiores a las demás mezclas.

Por otra parte, la mezcla M-C fue la que ganó mayor resistencia a partir de los 28 días de edad de los especímenes, con un valor promedio a 180 días de 43.41 MPa (132% del $f'c$ diseño), por encima de las mezclas PR-0.8 y PM-0.8, las cuales cumplieron con la resistencia de diseño desde los 28 días pero con valores de esfuerzo a los 180 días de 40.21 MPa (122% $f'c$ diseño) y 42.23 MPa (128% $f'c$ diseño) respectivamente.

El modo de falla de los cilindros fue una fisuración típica, caracterizada por la formación de grietas paralelas a la dirección de la carga, como se muestra en la figura 138. A medida que se iba incrementando la carga posterior a la de falla, los cilindros con presencia de fibra (PR-0.8 y PR0.8 + CBC15) presentaban una resistencia a la separación o destrucción del espécimen a comparación de los cilindros sin fibra de PET (M-C, PM-0.8 y PM0.8 + CBC15).

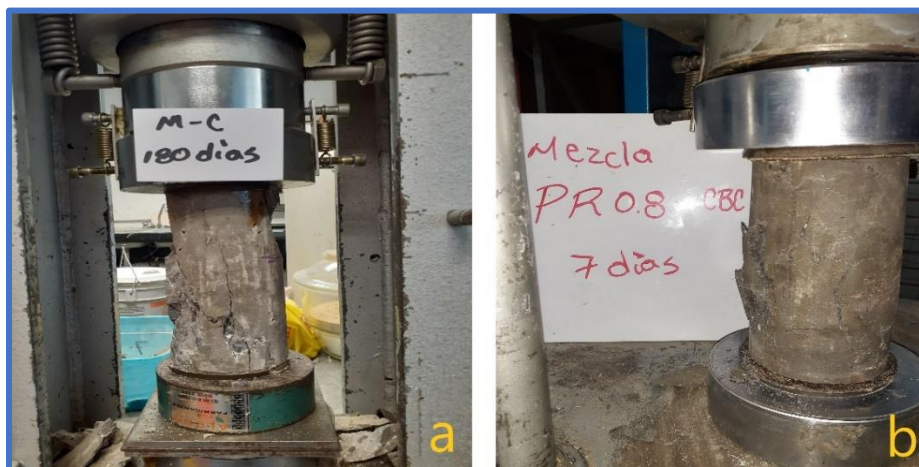


Figura 138. Falla típica en el concreto: a) cilindro con fracturas y fragmentos separados a la matriz, b) cilindro con fragmentos unidos a la matriz mediante la fibra de PET.

5.2.1.5. Módulo de elasticidad estático

El módulo de elasticidad estático o valor de rigidez de las mezclas de concreto, fue evaluado a partir del ensayo de resistencia a compresión conforme a la edad de prueba especificada. La figura 139 muestra los valores obtenidos de los módulos dinámicos de cada una de las mezclas de concreto estudiadas, los cuales a la edad de 90 y 180 días sobrepasaron la aproximación de rigidez de los concretos hidráulicos, recomendada por la literatura (H. Kosmatka, Kerkhoff, C. Panarese, & Tanesi, 2004), de 5,000 veces la raíz cuadrada del $f'c$ de diseño (28,722.81 MPa).

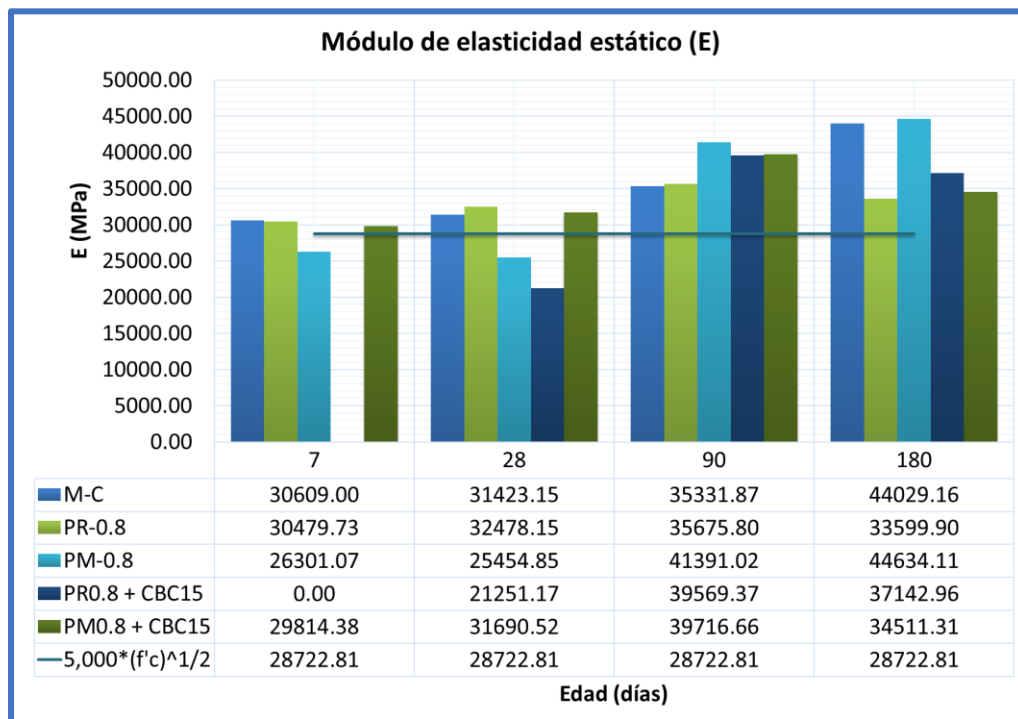


Figura 139. Módulo de elasticidad estático a partir de someter cilindros de 10 cm ϕ x 20 cm h a compresión.

Los valores obtenidos de módulo de elasticidad muestran una variación entre todas las mezclas respecto a la edad de los especímenes, en donde se observa que la mezcla con fibra de PET (PR-0.8) presenta valores de elasticidad muy similares en las 4 edades de prueba, en un rango de 30,000 a 36,000 MPa, obteniendo el valor más bajo de rigidez a 180 días (33,599.9 MPa), comparado con las otras mezclas. La mezcla M-C al igual que la mezcla PM-0.8 incrementaron su módulo elástico conforme se incrementó su edad y su resistencia a compresión, siendo las mezclas con mayor rigidez; mientras que, las dos mezclas con CBC

(PR0.8 + CBC15 y PM0.8 + CBC15) no presentan un incremento en su rigidez a 7 y 28 días, pero si a 90 días, alcanzando su mayor rigidez a dicha edad (39,569.37 MPa y 39,716.66 MPa, respectivamente) y disminuyendo su valor a 180 días. Todas las mezclas de concreto presentaron un rango de variación a la edad de 180 días de “E” entre 5,000 y 8,000 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en Megapascuales.

Con la deformación unitaria que presentaban las muestras al someterlos a esfuerzos a compresión menores al 60% de la resistencia máxima, se formaron curvas esfuerzos-deformación unitaria, como se observa en las figuras 140 a 143, en las cuales se puede observar que, a mayor módulo de elasticidad adquirido por los concretos, mayor es su pendiente y su riesgo a fallar frágilmente.

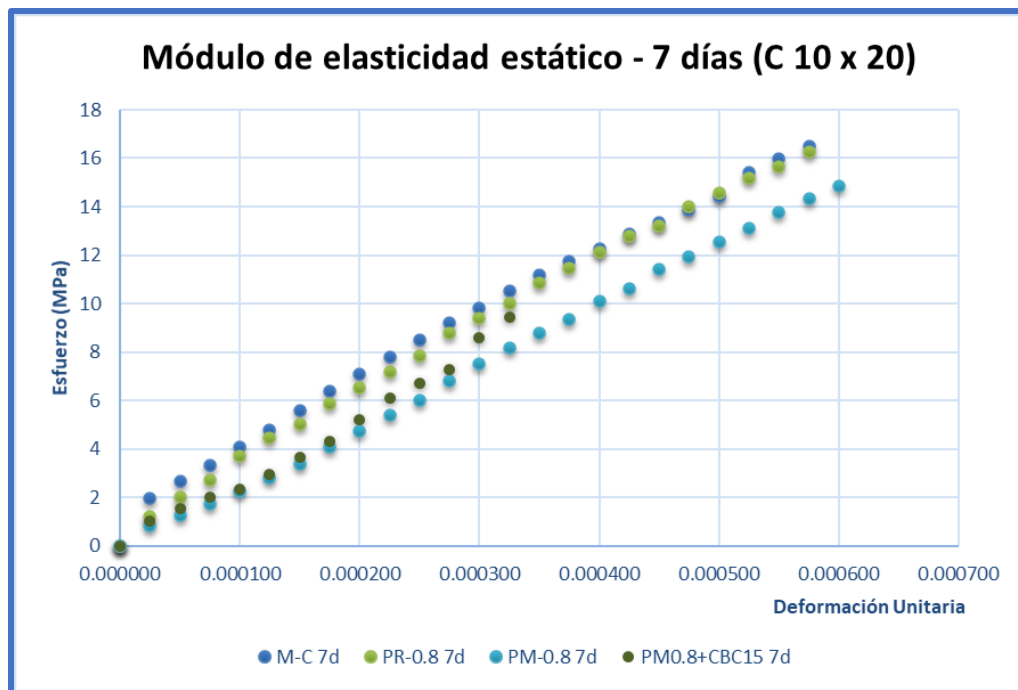


Figura 140. Curva Esfuerzo-Deformación Unitaria a 7 días de edad de las mezclas en estudio.

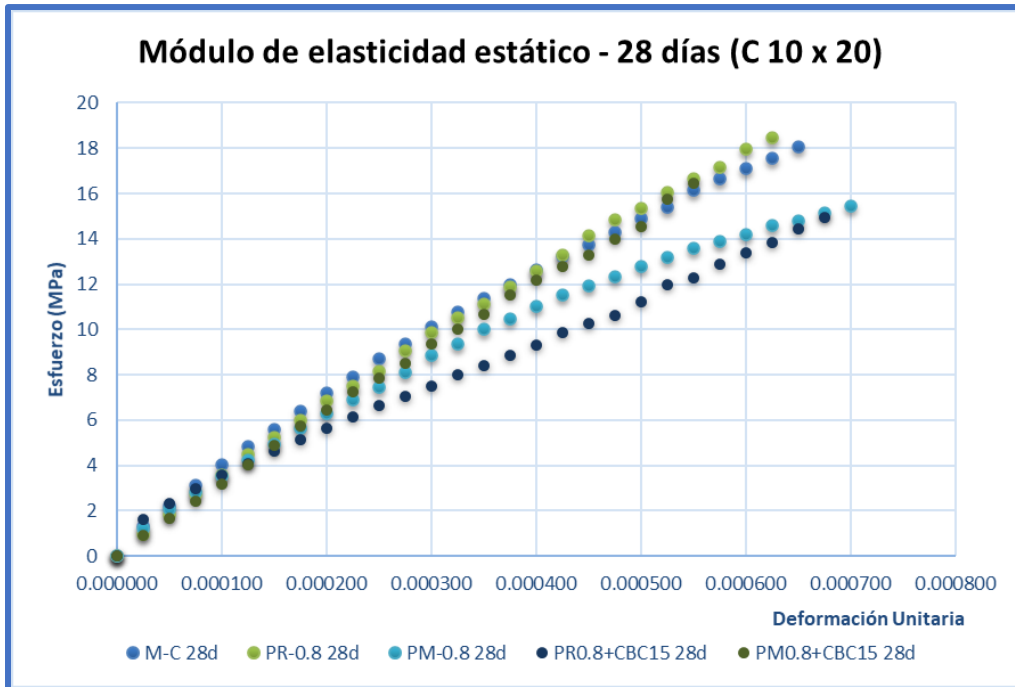


Figura 141. Curva Esfuerzo-Deformación Unitaria a 28 días de edad de las mezclas en estudio.

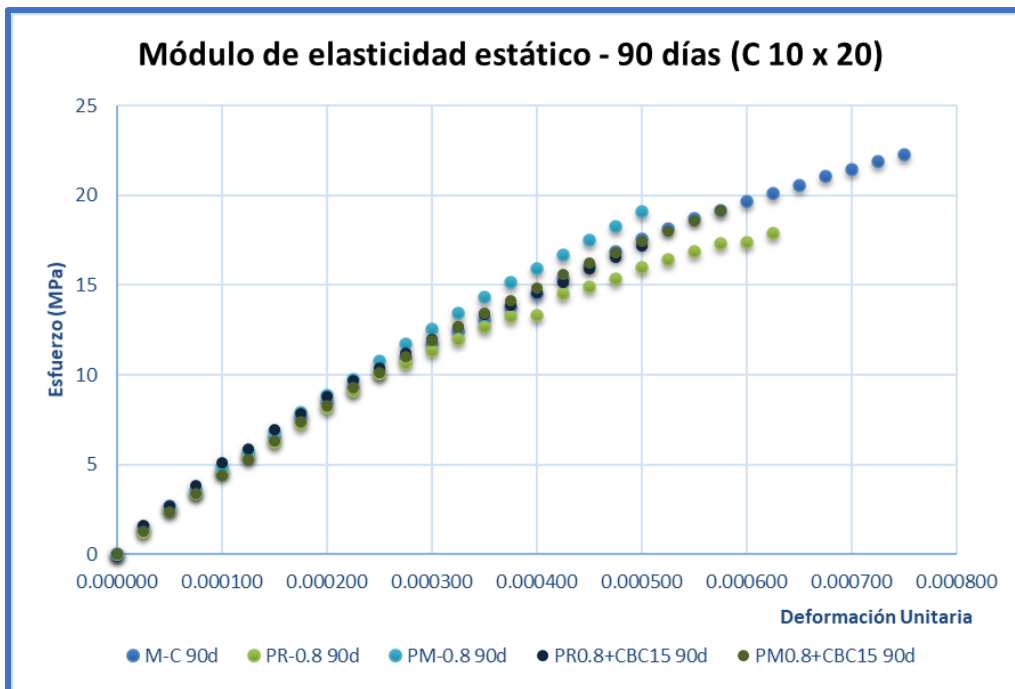


Figura 142. Curva Esfuerzo-Deformación Unitaria a 90 días de edad de las mezclas en estudio.

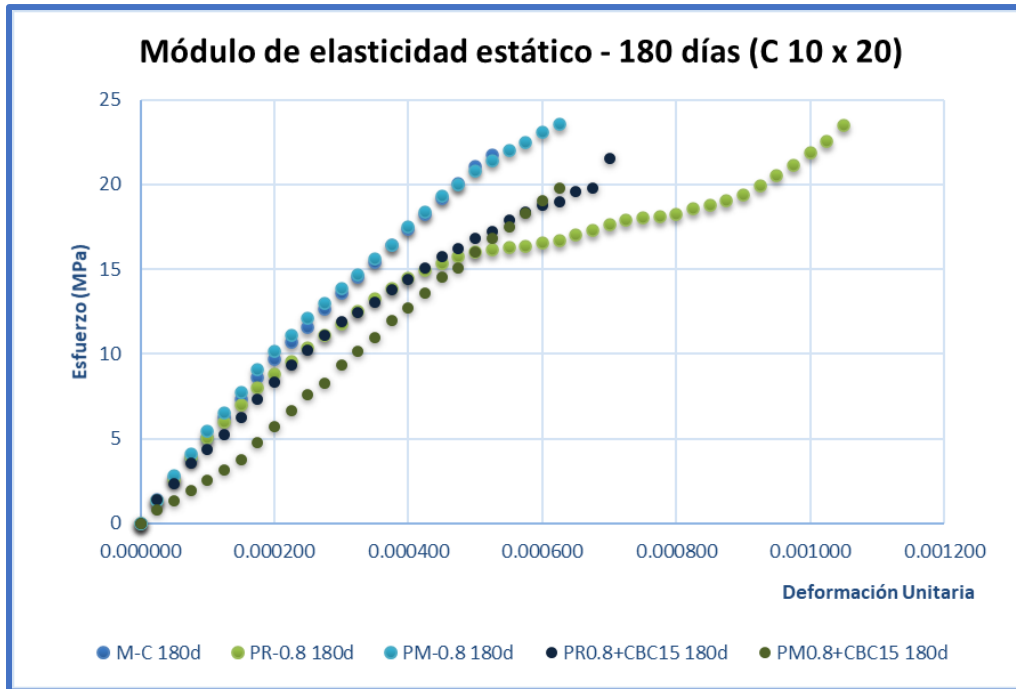


Figura 143. Curva Esfuerzo-Deformación Unitaria a 180 días de edad de las mezclas en estudio.

5.2.1.6. Resistencia a la tensión por compresión diametral

La resistencia a la tensión por compresión diametral o tensión indirecta de las mezclas de concreto en estudio, se observan en la figura 144, cuyos valores de esfuerzo es bien sabido que son menores a los adquiridos por compresión, siendo así que, estos dejan de ser significativos desde el punto de vista estructural, pero adquiriendo importancia al momento de resistir fallas producto de contracciones en el concreto.

El esfuerzo típico a tensión del concreto de peso normal, se encuentra aproximadamente entre 0.4 y 0.7 veces la raíz cuadrada del f'_c de diseño. Como se puede observar en el gráfico de la figura 144, en el caso de la investigación, todas las mezclas se encontraron en dicho rango después de los 28 días de edad, con valores de tensión indirecta de entre 2.30 MPa y 4.02 MPa.

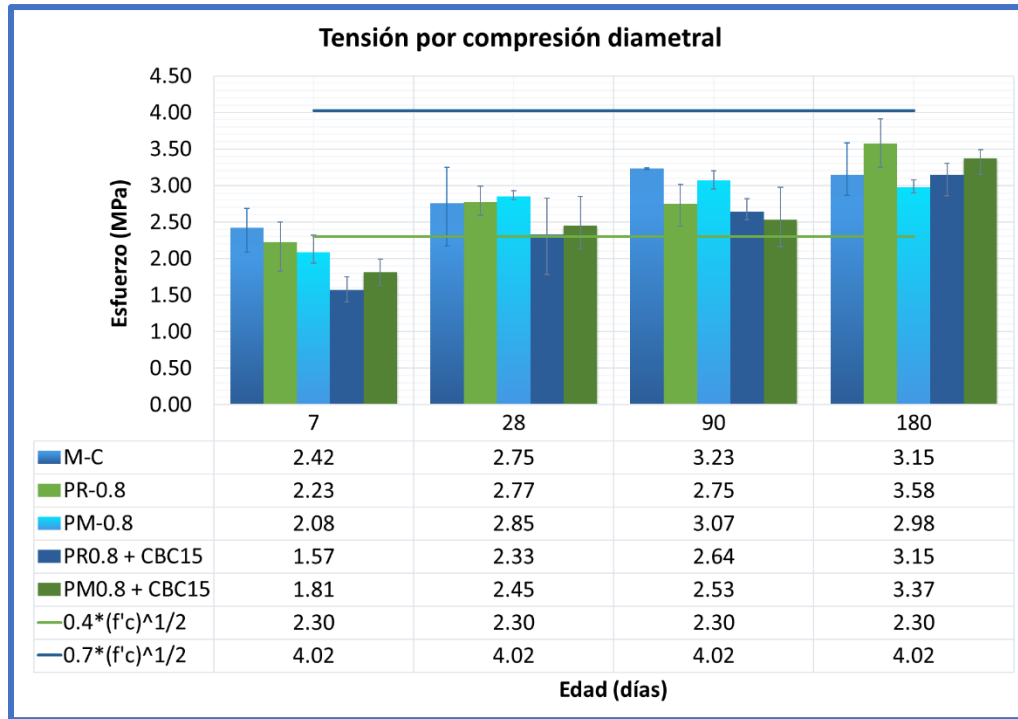


Figura 144. Resistencia a la tensión indirecta en cilindros de 15 cm Ø x 30 cm h.

Los cilindros de concreto con fibra de PET (PR-0.8) llegaron a alcanzar un valor promedio de hasta 3.58 MPa a 180 días, por arriba de la mezcla M-C y de las demás mezclas. La mezcla de concreto con PET molido (PM-0.8) fue la más desfavorable al llegar a 180 días de edad (2.98 MPa), con un valor menor que los concretos con CBC (3.15 MPa para PR0.8 + CBC15 y 3.58 MPa para PM0.8 + CBC15) los cuales presentaban menores valores de esfuerzo a tensión a 7, 28 y 90 respecto a las otras mezclas en estudio.

La falla que presenta el concreto control (M-C) y los concretos con PET molido (PM-0.8 y PM0.8 + CBC15) sometidos a compresión en su sección longitudinal, es una falla típica que se caracteriza por la ruptura repentina del cilindro, quedando separadas sus mitades longitudinales, evaluada como falla frágil en el concreto (figura 145.a); mientras que los cilindros de concreto con Fibra de PET (PR-0.8 y PR0.8 + CBC15) presentan una sola grieta bien definida en las caras transversales de los cilindros, sin existir una separación de sus mitades, evaluada como una falla dúctil (figura 145.b).



Figura 145. Fallas por tensión en cilindros de concreto: a) falla frágil en el concreto, b) falla dúctil en el concreto.

5.2.1.7. Resistencia a la tensión por flexión (MR)

La calidad del concreto hidráulico en las losas de pavimento rígido está determinada por su módulo de ruptura o resistencia a la flexión, dicho parámetro, junto con el módulo de elasticidad, representa un valor importante en el cumplimiento del diseño de pavimentos. En la presente investigación se evaluaron vigas de 15 cm de arista en su sección transversal por 60 cm de longitud, apoyadas en dos puntos en sus extremos y sometidas a dos cargas en el tercio medio del claro, de tal forma que se pudiera comprobar el esfuerzo a tensión por flexión de diseño de 4.2 MPa para todas las mezclas a edades de 7, 28, 90, 180 y 240 días.

De acuerdo con el gráfico de la figura 146, la resistencia a la flexión tomó un comportamiento muy parecido a lo obtenido en el ensayo de resistencia a la compresión, sin embargo, el MR de las mezclas representó de 11% a 15% de su resistencia a compresión durante las primeras cuatro edades de prueba (7 a 180 días).

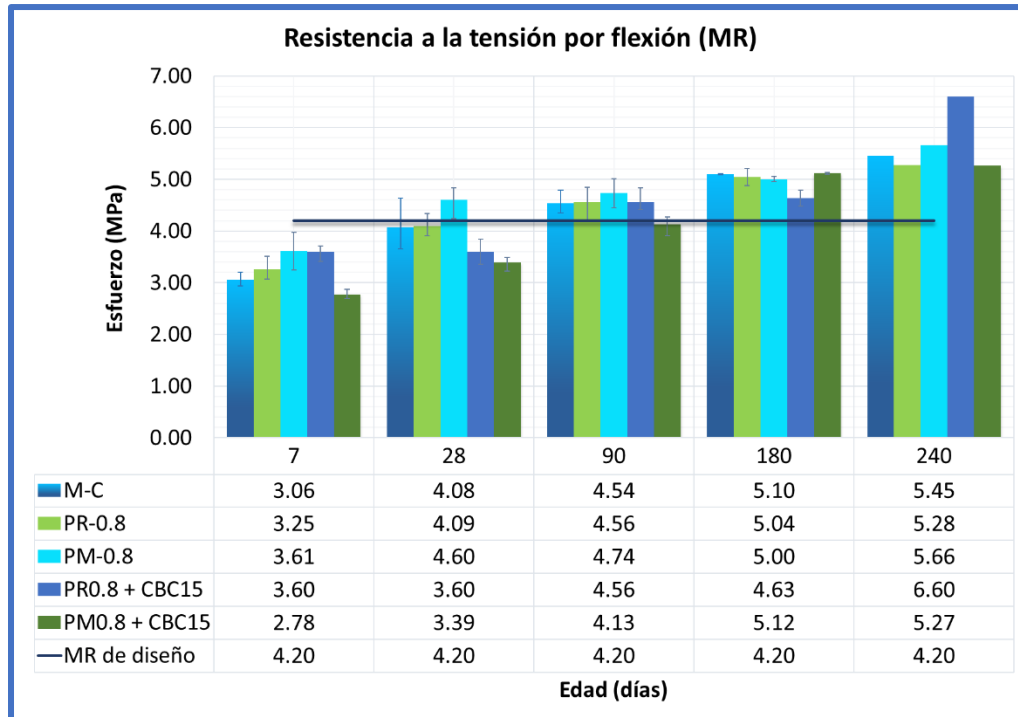


Figura 146. Módulo de ruptura en vigas de 15 cm x 15 cm x 60 cm.

La incorporación de CBC en las dos mezclas con material de PET, de igual manera que en las dos anteriores pruebas mecánicas, retardo el desempeño por flexión a los 28 días de edad, sin cumplir con el 100% de su MR, alcanzo la mezcla PR0.8 + CBC15 un valor de MR igual a 3.6 MPa (86% MR diseño) y la mezcla PM0.8 + CBC15 un valor de MR de 3.39 MPa (81% MR diseño). La mezcla PR0.8 + CBC15 cumplió con el 100% de MR de diseño hasta los 90 días y obtuvo un valor de 6.60 MPa, superior al concreto control (M-C) y a las demás mezclas de concreto, a la edad de 240 días. Por su parte, la mezcla PM0.8 + CBC15, cumplió el 100% de MR de diseño hasta los 180 días, con un valor de 5.12 MPa, mayor al del concreto PR0.8 + CBC15.

Observando el comportamiento de las mezclas modificadas, de acuerdo con su resistencia a flexión, no existió una diferencia trascendental respecto a la mezcla control (M-C), pero teniendo en cuenta que la mezcla de PM-0.8 mantuvo una resistencia a flexión ligeramente superior a las otras mezclas, excepto a los 240 días, cuyo valor superior lo adquirió la mezcla PR0.8 + CBC15. El concreto con fibra de PET (PR-0.8) sólo supero la resistencia a flexión

del concreto sin fibra (M-C) en las dos primeras edades de prueba, pero no fue así, al adquirir mayor edad con el tiempo.

A los 240 días, adicionales de prueba, se midió la deformación transversal adquirida por las vigas al estar sometidas a flexión hasta la carga ultima de falla, obteniendo una curva esfuerzo-deformación transversal por mezcla de concreto, las cuales se presentan en el gráfico de la figura 147.

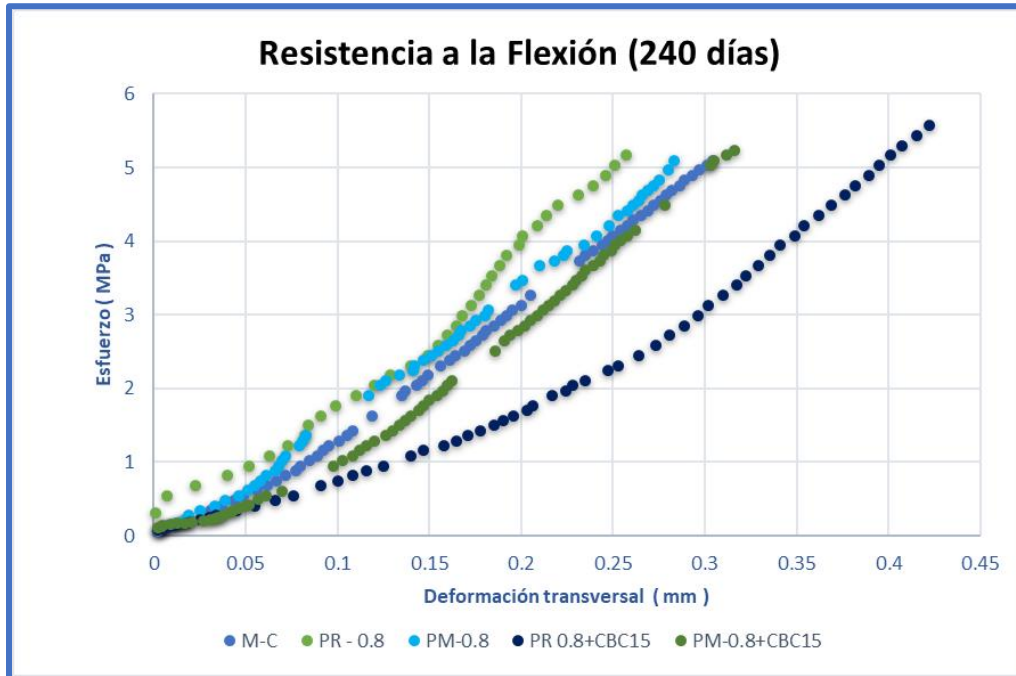


Figura 147. Curva esfuerzo vs deformación transversal a partir de ensayo a flexión en vigas de concreto.

En la figura anterior, se observa que el concreto PR0.8 + CBC15 adquirió una deformación mayor de 0.422 mm representada por un esfuerzo de 5.60 MPa superior a los demás concretos, seguido de la mezcla PM0.8 + CBC15 con una deformación de 0.316 mm, pero presentando una pendiente similar a las mezclas con material de PET (PR-0.8 y PM-0.8) y a la mezcla control (M-C).

El concreto con fibra de PET (PR-0.8), según su curva esfuerzo-deformación unitaria, es el material que menos deformación transversal presenta a lo largo de la trayectoria de esfuerzos y obtenido un valor de 0.57 mm al presenta la primera falla en su estructura.

Por otra parte, la figura 148 muestra el modo de falla a flexión que presenta el concreto M-C y los concretos sin fibras (PM-0.8 y PM0.8 + CBC15) fue una falla típica súbita presentada por los concretos convencionales y cuya característica principal es la de obtener una ruptura repentina de la viga al mismo tiempo de presentar la primer grieta en su estructura; mientras que, los concretos con la macrofibra de PET (PR-0.8 y PR0.8 +CBC15) presentaron una falla no súbita en su estructura, es decir, al momento de llegar a la carga ultima de falla, se presentaba una primer grieta en la parte inferior de la viga, sin separarse las mitades de la viga, existiendo una unión en la parte superior de la misma (figura 149) y adquiriendo mayor deformación transversal antes de romperse completamente en dos partes.

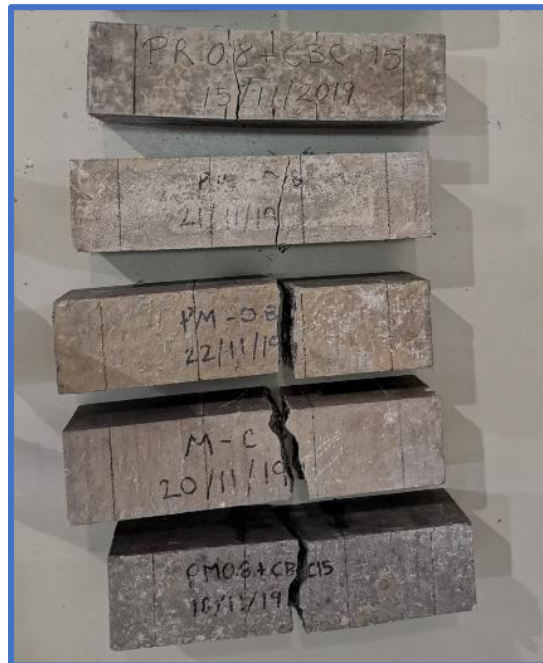


Figura 148. Falla súbita y no súbita (con fibra de PET) en vigas de concreto sometidas a flexión.



Figura 149. Falla no súbita en el concreto con fibra de PET.

Al presentarse la primera falla en el concreto con fibra de PET (PR-0.8 y PR0.8 + CBC15), los especímenes prismáticos llegaron a separarse, tocando la placa base del equipo de prueba, en un promedio de tiempo de 10 a 15 minutos.

5.2.2. Ensayos por durabilidad

Los ensayos por durabilidad, como ya se mencionó en el apartado 4.4.2.2., constó de evaluar muestras constituidas por discos de concreto de 10 cm de diámetro por 5 cm de altura (provenientes del corte de cilindros de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura), para los ensayos de resistencia a los sulfatos y absorción capilar a los 180 días de haberse elaborado y curado los especímenes, y por mitades de vigas producto del ensayo de flexión a 28 días, expuestas al ambiente durante 180 días para la determinación de la carbonatación en su estructura. Cada uno de los ensayos presentan los siguientes resultados.

5.2.2.1. Resistencia al ataque por sulfatos

El ensayo de resistencia al ataque por sulfatos evaluó el porcentaje de pérdida de masa que adquieren las muestras de concreto, debido a los ciclos acelerados de inmersión en solución de sulfato de sodio (por 17 ± 1 hora) y secado en horno (hasta alcanzar su masa constante). El promedio del porcentaje de pérdida de masa de cinco discos de concreto de 10 cm \varnothing x 5 cm h, para cada una de las mezclas, se presenta en el gráfico de la siguiente figura.

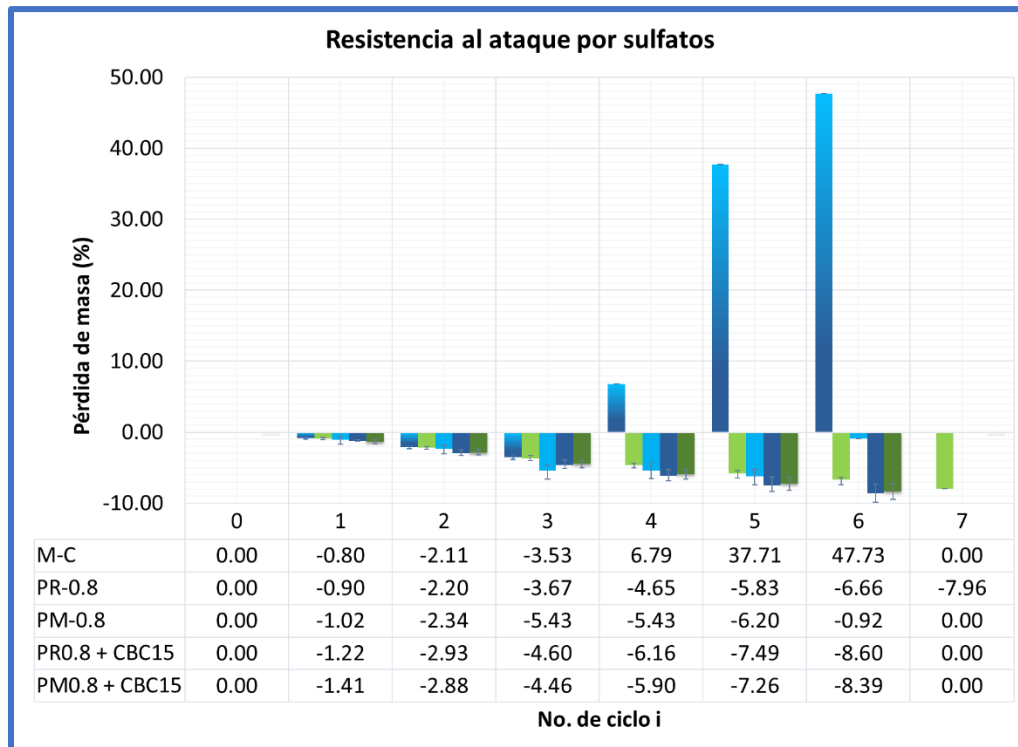


Figura 150. Porcentaje de pérdida de masa en discos de 10 cm \varnothing x 5 cm h, sometidos a 180 días de edad.

De los resultados observados en la figura 150, los concretos sometidos al ataque acelerado de sulfato de sodio, muestran valores negativos de pérdida de masa en los primeros 3 ciclos de prueba, es decir, todas las mezclas incluyendo la mezcla control (M-C) llenaron sus poros de sulfato, ganando masa y permitiendo que el agente químico ingresará a los poros y se cristalizará al momento de estar en su proceso de secado.

A partir de observar en el gráfico la ganancia de masa en las muestras de concreto, se pudo identificar que las mezclas de concreto con CBC (PR0.8 + CBC15 y PM0.8 + CBC15) adquirieron una mayor cantidad de sulfato durante todo el ensayo, comportándose muy similar y destruyéndose completamente sin perder masa, al llegar al último ciclo.

En los primeros 3 ciclos el concreto que menos sulfato adquirió fue el M-C, el cual provocó que en el ciclo 4 existiera una disminución en el valor promedio de la ganancia de masa, observado en la figura 151, lo cual provocó la pérdida de masa hasta su desintegración total al ciclo 7 de prueba.



Figura 151. Pérdida de masa en los especímenes del concreto M-C al 4º ciclo de prueba.

El concreto PM-0.8 inició su pérdida de masa al llegar al ciclo 6, pero sin llegar a un valor positivo de pérdida de masa y desintegrándose al llegar al último ciclo; mientras que, el concreto PR-0.8 fue el que menos sulfato ganó de todas las mezclas hasta el ciclo 6, adquiriendo una masa de 7.96 % en el último ciclo respecto al inicio del ensayo y sin existir rupturas ni ablandamientos en su estructura, sólo una pequeña red de agrietamientos superficiales (figura 152).



Figura 152. Concreto PR-0.8 en el ciclo 7 de prueba.

5.2.2.2. Profundidad de carbonatación

Para obtener la constante de carbonatación de los concretos en estudio (figura 154), fue obtenida la profundidad de carbonatación, en mm, bajo la metodología marcada en el apartado 4.2.2.2.2. y cuyos valores de carbonatación fueron plasmados en la gráfica siguiente (figura 153):

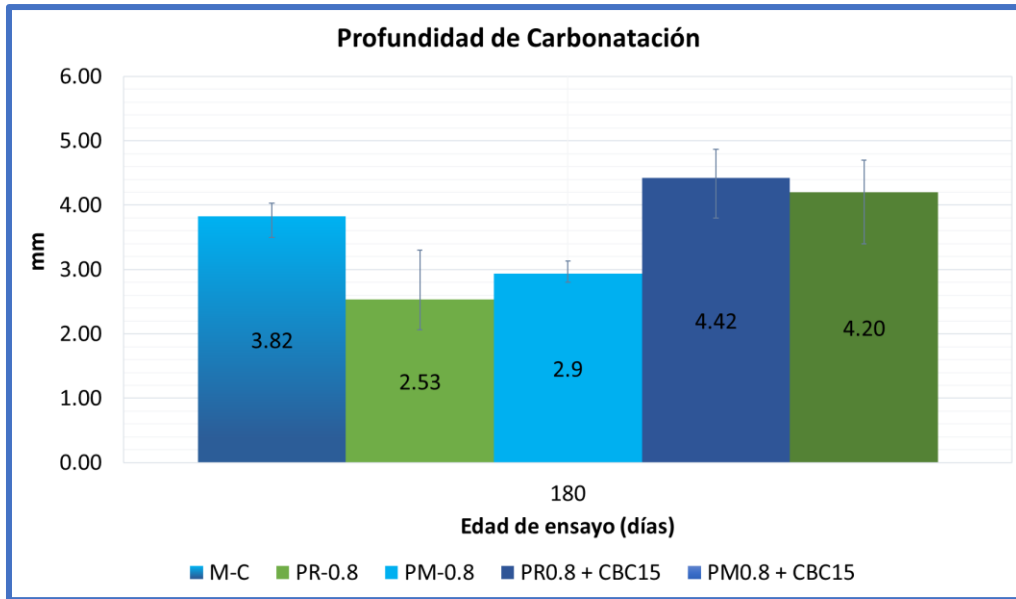


Figura 153. Profundidad de carbonatación en la sección transversal de un pedazo de viga a 180 días de edad.

Como se observa en el gráfico anterior, las mezclas con CBC (PR0.8 + CBC y PM0.8 + CBC15) presentaron mayor carbonatación al estar en contacto con el ambiente, seguido del concreto control (M-C) y siendo favorecidas las mezclas con material de PET (PR-0.8 y PM-0.8) a la hora de carbonatarse.

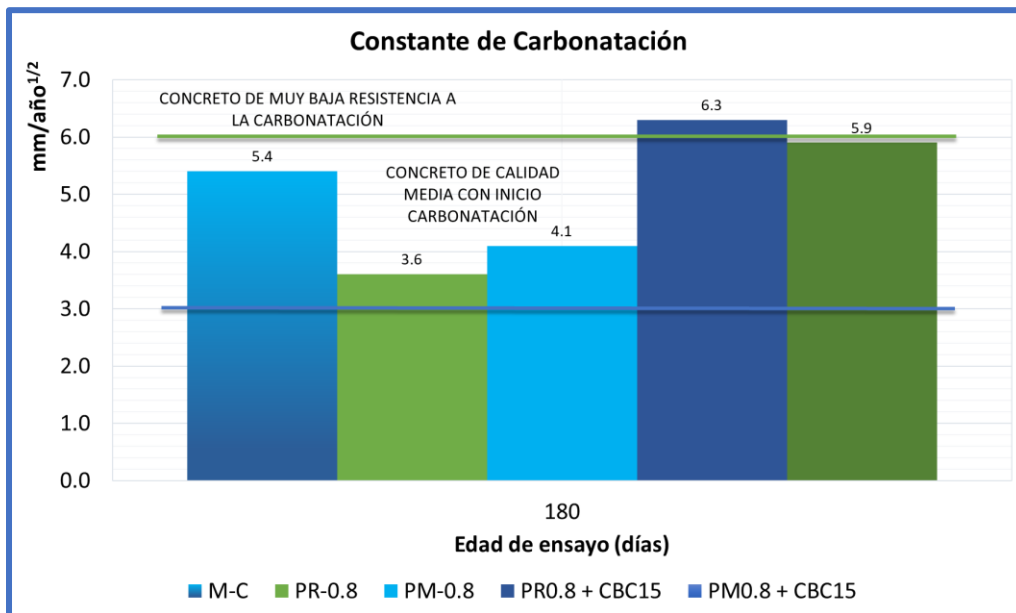


Figura 154. Constante de carbonatación obtenida a partir del valor medido de carbonatación en la sección transversal de un pedazo de viga a 180 días de edad.

La constante de carbonatación, que permite estimar la profundidad de carbonatación que puede adquirir el concreto en un determinado año, se calcula a partir de dividir la distancia medida de carbonatación entre la raíz cuadrada del tiempo, y cuyo comportamiento podemos observar en la figura 154 es el mismo dado por la distancia de carbonatación de cada mezcla de concreto.

A partir de determinar las constantes de carbonatación, se observa que de acuerdo con los límites de durabilidad especificados por la norma mexicana NMX-C-115-ONNCCE-2016 para carbonatación, los concretos PR0.8 + CBC15 y PM0.8 + CB15, presentan características de un concreto de muy baja resistencia a la carbonatación con valores de 6.3 mm/año^{1/2} y de 5.9 mm/año^{1/2}, respectivamente. La mezcla PM0.8 + CBC15 considerado con muy baja resistencia a la carbonatación por encontrarse en el límite superior de durabilidad (6 mm/año^{1/2}).

Los concretos sin CBC adquirieron valores de la constante de carbonatación entre 3 mm/año^{1/2} y 6 mm/año^{1/2}, lo que significa que son concretos con una calidad media con inicio de carbonatación, siendo la mezcla PR-0.8 la menos favorable para el inicio del ataque del CO₂, con un valor de 3.6 mm/año^{1/2}.

A partir de los valores de la constante K_{CO₂}, se pudo realizar una proyección de la profundidad de carbonatación, en mm, que pueden alcanzar en 25 años los concretos elaborados. Dicha proyección, se puede observar en la tabla 58 y figura 155. A los 25 años de edad, el concreto M-C alcanzaría una distancia de carbonatación de 27 mm, el PR-0.8 un valor de 18 mm, el PM-0.8 un valor de 20.5 mm, el PR0.8 + CBC15 un valor de 31.5 mm y el PM0.8 + CBC15 un valor de 29.5 mm.

Tabla 58. Profundidad de carbonatación, en mm, estimada a partir de la constante de carbonatación.

Proyección de la profundidad de carbonatación, en mm					
Tiempo (años)	M-C	PR-0.8	PM-0.8	PR0.8 + CBC15	PM0.8 + CBC15
	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
1	5.4	3.6	4.1	6.3	5.9
2	7.6	5.1	5.8	8.9	8.3
3	9.4	6.2	7.1	10.9	10.2



4	10.8	7.2	8.2	12.6	11.8
5	12.1	8	9.2	14.1	13.2
6	13.2	8.8	10	15.4	14.5
7	14.3	9.5	10.8	16.7	15.6
8	15.3	10.2	11.6	17.8	16.7
9	16.2	10.8	12.3	18.9	17.7
10	17.1	11.4	13	19.9	18.7
11	17.9	11.9	13.6	20.9	19.6
12	18.7	12.5	14.2	21.8	20.4
13	19.5	13	14.8	22.7	21.3
14	20.2	13.5	15.3	23.6	22.1
15	20.9	13.9	15.9	24.4	22.9
16	21.6	14.4	16.4	25.2	23.6
17	22.3	14.8	16.9	26	24.3
18	22.9	15.3	17.4	26.7	25
19	23.5	15.7	17.9	27.5	25.7
20	24.1	16.1	18.3	28.2	26.4
21	24.7	16.5	18.8	28.9	27
22	25.3	16.9	19.2	29.5	27.7
23	25.9	17.3	19.7	30.2	28.3
24	26.5	17.6	20.1	30.9	28.9
25	27	18	20.5	31.5	29.5

Como podemos observar en la tabla 58, la mezcla de concreto con fibra de PET (PR-0.8) alcanzaría la menor carbonatación en 25 años, respecto a las demás mezclas, siendo las mezclas con CBC las más desfavorables, asumiendo que, si se tuvieran espesores de recubrimiento del acero de refuerzo, en concretos reforzados, menores a 25 mm, existiría un riesgo de corrosión alto para estos elementos.

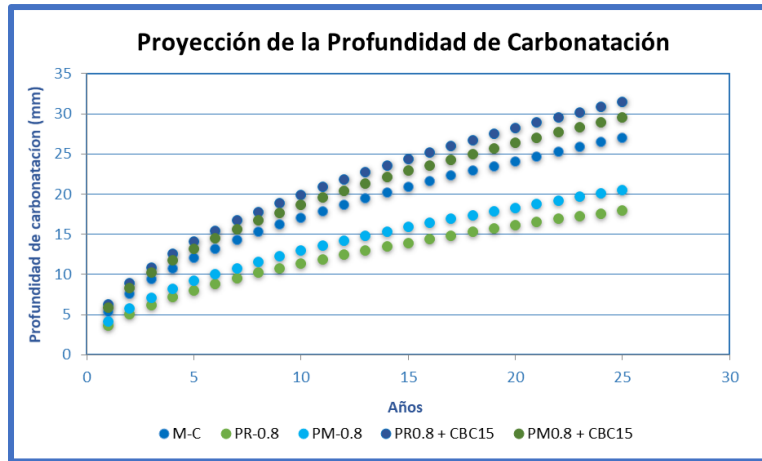


Figura 155. Proyección de la profundidad de carbonatación suponiendo una exposición de 25 años.

5.2.2.3. Absorción capilar

El cálculo de la cantidad de absorción capilar de agua, en $m/s^{1/2}$, se llevó a cabo a la edad de 180 días en cinco discos de 10 cm \varnothing por 5 cm h, por cada mezcla de concreto en estudio, mediante dos metodologías de cálculo (Red “DURAR” y NMX-C-504-ONNCCE-2015) que coinciden en graficar una serie de puntos a partir del índice de absorción contra la raíz cuadrada del tiempo en segundos, para posterior a eso realizar una regresión lineal y así determinar el valor de sorción capilar o tasa de absorción de agua, de cada muestra de concreto.

Un ejemplo del cálculo inicial y de los resultados para las dos metodologías se presenta en la tabla 59, la cual contiene datos del disco 1 de la mezcla PR-0.8. El desarrollo de los resultados para el disco puesto de ejemplo, se aplicó para todas las mezclas en estudio y por cada uno de los discos sometidos al contacto con el agua.

Tabla 59. Serie de datos para el primer disco de la mezcla PR-0.8.

Datos iniciales	Valor
Mezcla =	PR-0.8
m_0 =	853.00 g
Diámetro =	99.7 mm
Área (a) =	7806.93 mm ²
Altura (a) =	50.00 mm
Densidad del agua (d) =	0.001 g/mm ³



Tiempo (s)	\sqrt{t} (s ^{1/2})	m_t (g)	$[(m_t - m_0) / (a \cdot d)],$ (mm)
0	0.00	853.0	0.00
60	7.75	855.8	0.36
300	17.32	857.6	0.59
600	24.49	858.8	0.74
1200	34.64	860.4	0.95
1800	42.43	861.7	1.11
3600	60.00	864.3	1.45
7200	84.85	867.4	1.84
10800	103.92	869.9	2.16
14400	120.00	871.9	2.42
18000	134.16	873.6	2.64
21600	146.97	875.1	2.83
86400	293.94	886.1	4.24
172800	415.69	891.5	4.93
259200	509.12	894.2	5.28
345600	587.88	895.8	5.48
432000	657.27	897.1	5.65
518400	720.00	897.7	5.73
604800	777.69	898.7	5.85
691200	831.38	899.1	5.91

De los datos obtenidos en la tabla 59, se realizó una gráfica de puntos (figura 156) con los valores de la raíz cuadrada del tiempo en el eje de las abscisas y con los valores obtenidos de la última columna (índice de absorción) para después realizar una regresión lineal y encontrar las ecuaciones pertenecientes a dos líneas de tendencia (inicial y secundaria), las cuales se interceptaban en un mismo punto del plano.

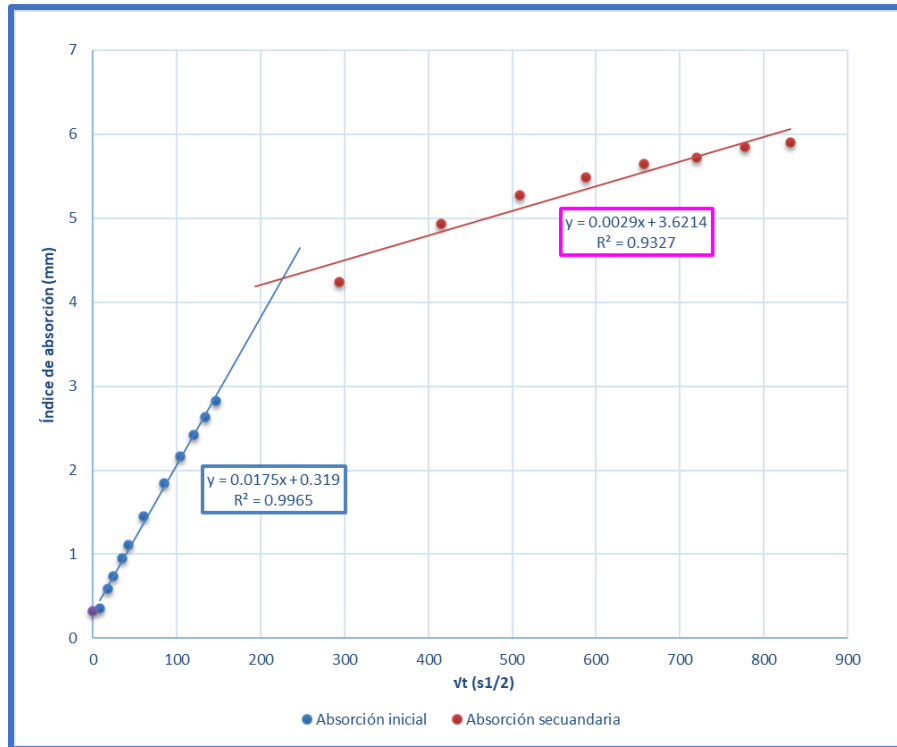


Figura 156. Análisis de regresión lineal, a partir de graficar el Índice de absorción vs \sqrt{t} para el primer disco de la mezcla PR-0.8.

En el gráfico anterior se observan dos pendientes: la primera de ellas que se forma por los primeros puntos (día 1 de prueba) representa la absorción inicial de agua adquirida por el concreto y la segunda, que la forman los puntos con valores de índice de absorción con diferencia de un día, representa la saturación del mismo.

Para cada una de las metodologías descritas en el apartado 4.4.2.2.3., se realizó un promedio de los coeficientes determinados por mezcla de concreto y los resultados se presentan en la tabla 60 (metodología de la Red “DURAR”) y en los gráficos de las figuras 157 y 158 (metodología NMX-C-504-ONNCCE-2015) de este apartado.

Tabla 60. Resultados obtenidos a partir de la metodología descrita en la Red DURAR.

Metodología de Fagerlund				
Mezcla	Resistencia a la penetración del agua (m), s/m ²	Coefficiente de absorción capilar (k), kg/m ² s ^{1/2}	Porosidad efectiva (ϵ_e), %	Sorción Capilar (S), m/s ^{1/2}
M-C	1.89 x 10 ⁷	0.0197	8.57	2.30 x 10 ⁻⁴

PR-0.8	1.99×10^7	0.0195	8.85	2.20×10^{-4}
PM-0.8	1.99×10^7	0.0192	8.56	2.25×10^{-4}
PR0.8 + CBC15	1.84×10^7	0.0257	11.03	2.33×10^{-4}
PM0.8 + CBC15	2.01×10^7	0.0232	10.38	2.23×10^{-4}

De la tabla 60, se observa que los concretos con adición de material plástico reciclado PR-0.8 y PM-0.8, presentan una menor cantidad de sorción capilar de agua con un valor de $2.20 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$ y $2.25 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$, respecto a lo adquirido por el concreto M-C y debido a que de igual forma sus porcentajes de porosidad efectiva son ligeramente menor al concreto convencional, siendo el concreto PM-0.8 el que menos poros interconectados presenta con un 8.56%. El concreto PR0.8 + CBC15 presenta los valores más desfavorables de sorción capilar y porosidad efectiva, obteniendo una sorción de $2.33 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$ y una porosidad efectiva de 11.03%.

El manual de la Red DURAR especifica que valores menores de sorción de $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^{1/2}$ en el concreto será apto para exposiciones severas, y para condiciones menos severas se aceptan valores de $1 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$. Todos los valores de sorción, de los concretos en estudio obtenidos por la metodología de Fagerlund, se encuentran fuera de estos dos rangos especificados por el manual, por lo tanto, se definen como concretos no aptos para ambientes corrosivos.

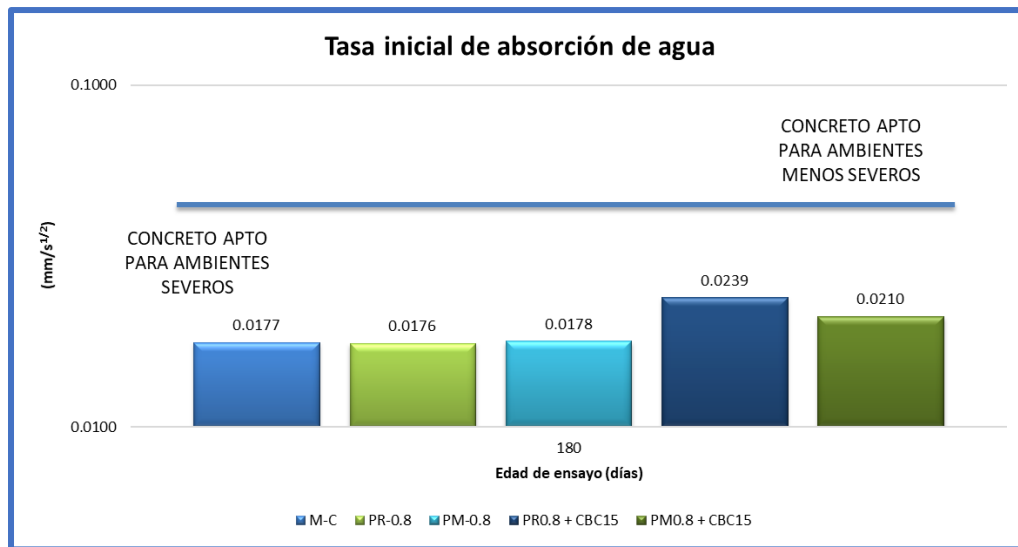


Figura 157. Tasa inicial de absorción de agua a 180 días de edad de las mezclas de concreto.

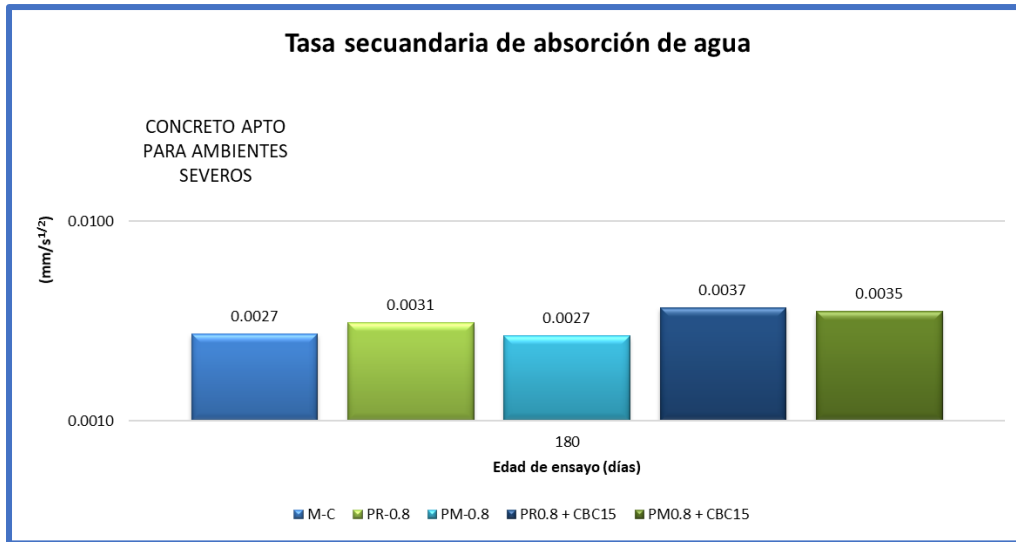


Figura 158. Tasa secundaria de absorción de agua a 180 días de edad de las mezclas de concreto.

Por otra parte, la metodología descrita por la norma NMX-C-504-ONNCCE-2015 presenta un par de resultados de tasa de absorción de agua en el concreto, obtenido una tasa inicial en el primer día para cada mezcla de concreto y una segunda tasa para los 7 días consecutivos posteriores. De la figura 157, se observa que los concretos M-C, PR-0.8 y PM-0.8, presentan una tasa inicial de absorción de 0.0177 mm/s^{1/2}, 0.0176 mm/s^{1/2} y 0.0178 mm/s^{1/2} respectivamente, menor a los concretos con CBC. El concreto PR0.8 + CBC15 presenta los valores más desfavorables de tasa inicial de absorción capilar, obteniendo un valor de 0.0239 mm/s^{1/2}. En el caso de la tasa secundaria de absorción (figura 158), el comportamiento de los concretos es el mismo que lo ocurrido para la tasa inicial, obteniendo valores para M-C igual a 0.0027 mm/s^{1/2}, para PR-0.8 de 0.0031 mm/s^{1/2}, para PM-0.8 de 0.0027 mm/s^{1/2}, para PR0.8 + CBC15 de 0.0037 mm/s^{1/2} y para PM0.8 + CBC15 de 0.0035 mm/s^{1/2}.

Los valores de tasa inicial y secundaria de absorción de agua, se compararon con las especificaciones del manual de la Red DURAR, los cuales mencionan que valores menores de sorción de $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^{1/2}$ (0.05 mm/s^{1/2}) en el concreto será apto para exposiciones severas, y para condiciones menos severas se aceptan valores de $1 \times 10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$ (0.1 mm/s^{1/2}); determinando así, que todas los valores obtenidos de los concretos en estudio son valores menores a 0.05 mm/s^{1/2}, lo que significa que todos ellos se definen como concretos aptos para ambientes severos de corrosión.

6. Análisis del costo de producción de las mezclas de concreto

La factibilidad de implementar materiales no convencionales a una mezcla de concreto hidráulico, no sólo depende de encontrar beneficios respecto al desempeño mecánico y a la durabilidad de los nuevos concretos hidráulicos, si no también, debe existir un equilibrio respecto a su costo inicial de construcción, para que dicho material sea factible en la integración del costo total de cualquier obra civil; para ello, se realizó un cálculo del costo de cada mezcla de concreto elaborada en esta investigación, teniendo en cuenta que el precio de los materiales adicionados incrementará el costo total de un concreto convencional.

El cálculo del costo de cada mezcla de concreto hidráulico, se estimó únicamente a partir de conocer las cantidades necesarias de los materiales que constituyen 1 m³ de concreto y de los precios de adquisición de cada material durante el mes de agosto del año 2020. Los costos de cada material pueden variar dependiendo la zona y el estado. Las cantidades necesarias de los materiales fueron obtenidas por el método de diseño de mezclas ACI, visto en el apartado 4, para una resistencia a la compresión de 330 kg/cm² (MR = 42 kg/cm²) y una relación agua/cemento de 0.51. Las siguientes tablas muestran el costo calculado para cada mezcla de concreto en estudio.

CONCRETO CONTROL (M-C)

Tabla 61. Cálculo del costo total del concreto control M-C.

Costo de materiales para 1 m ³ de concreto M-C					
Material	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario (\$)	Total (\$)
Cemento	Cemento marca Tolteca CPC 30R RS	Ton	0.402	3,000.00	1,206.00
Grava	Grava tritura de ¾" del banco de material "La Roka"	m ³	0.3734	203.45	75.97
Arena	Arena blanca del banco de material "El Coro"	m ³	0.2445	100.00	24.45
Agua	Agua potable	m ³	0.2673	19.91	5.32
Costo total de materiales					1,311.74

El costo total de los materiales para 1m³ de concreto convencional (M-C) de MR de diseño de 42 kg/cm² es de \$1,311.74 (mil treientos once pesos 74/100) MXN más IVA.

CONCRETO PR-0.8

Tabla 62. Cálculo del costo total del concreto con fibra de PET (PR-0.8).

Costo de materiales para 1 m ³ de concreto PR-0.8					
Material	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario (\$)	Total (\$)
Cemento	Cemento marca Tolteca CPC 30R RS	Ton	0.402	3,000.00	1,206.00
Grava	Grava tritura de ¾" del banco de material "La Roka"	m ³	0.3734	203.45	75.97
Arena	Arena blanca del banco de material "El Coro"	m ³	0.2445	100.00	24.45
Agua	Agua potable	m ³	0.2673	19.91	5.32
Fibra de PET ¹	Macrofibra de PET reciclado	kg	3.2158	1592.51	5,121.19
Costo total de materiales					6,432.93

El costo total de los materiales para 1m³ de concreto con fibra de PET (PR-0.8) de MR de diseño de 42 kg/cm² es de \$6,432.93 (seis mil cuatrocientos treinta y dos pesos 93/100) MXN más IVA.

¹El costo unitario de la fibra de PET fue estimado a partir de un análisis del precio unitario por concepto de fabricación de macrofibra de PET reciclado con especificaciones determinadas. La tabla 63 muestra el análisis del costo total de la macrofibra de PET (PR).

Tabla 63. Cálculo del precio unitario de la fibra de PET elaborada en la investigación.

Análisis de precio unitario – Fibra de PET					
Concepto	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario (\$)	Total (\$)
	Fabricación de macrofibra de PET reciclado, texturizada y cortada a 3.2 de diámetro por 38.1 mm de longitud.	Unidad		kg	
		Cantidad		1.00	
		Precio Unitario (\$)		1,592.51	
		Total (\$)		1,592.51	
Clave	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario (\$)	Total (\$)
Materiales					



Botella PR	Botellas de plástico PET recicladas con capacidad de 2 litros sin tapa.	kg	1.5365	4.50	6.91
Total de Materiales					\$ 6.91
Mano de Obra					
Fabricante de fibra	Ayudante general	Jor	3.4209	450.00	1,539.41
Total de Mano de Obra					\$ 1,539.41
Herramienta					
Cortadora de PET	Máquina de corte para obtener hilos de PET	% (MO)	0.03	1,539.41	46.18
Total de Herramienta					\$ 46.18
Equipo					
-	-	-	-	-	-
Total de Equipo					\$ 0.00
Costo directo					\$ 1,592.51

A partir de que, la fibra de PET no es comercial y que fue creada y elaborada en la presente investigación, el precio unitario se estimó a partir de sumar el costo de las botellas de PET reciclado (\$ 4.50 MXN/kg), más el costo total de mano de obra empleada para la fabricación de la fibra y un costo total de herramienta menor, calculado como un 3% de la mano de obra, teniendo en cuenta que, por ser una máquina de corte no motorizada y elaborada con materiales reciclados su costo horario, por cargos fijos, del equipo es despreciable para el cálculo.

La cantidad de PET requerido en kilogramos para fabricar 1 kg de fibra, fue calculada a partir de considerar un aumento en el cálculo de las botellas necesarias, en kilogramos, por 53% de desperdicio al fabricar las macrofibras. El rendimiento del ayudante general, equivale a fabricar 0.29232 kg de fibra de PET texturizada por jornada; es decir, transformar aproximadamente 16 botellas recicladas de refresco de 2 litros, en una jornada laboral de 8 horas.

CONCRETO PM-0.8

Tabla 64. Cálculo del costo total del concreto con PET molido (PM-0.8).

Costo de materiales para 1 m ³ de concreto PM-0.8					
Material	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario (\$)	Total (\$)
Cemento	Cemento marca Tolteca CPC 30R RS	Ton	0.402	3,000.00	1,206.00
Grava	Grava tritura de ¾" del banco de material "La Roka"	m ³	0.3734	203.45	75.97
Arena	Arena blanca del banco de material "El Coro"	m ³	0.2445	100.00	24.45
Agua	Agua potable	m ³	0.2673	19.91	5.32
PET molido	PET limpio y molido obtenido del proceso de reciclaje mecánico	kg	3.2158	8.00	25.73
Costo total de materiales					1,337.47

El costo total de los materiales para 1m³ de concreto con PET molido (PM-0.8) de MR de diseño de 42 kg/cm² es de \$1,337.47 (mil trecientos treinta y siete pesos 47/100) MXN más IVA.

CONCRETO PR0.8 + CBC15

Tabla 65. Cálculo del costo total del concreto con fibra de PET y CBC (PR0.8 + CBC15).

Costo de materiales para 1 m ³ de concreto PR0.8 + CBC15					
Material	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario (\$)	Total (\$)
Cemento	Cemento marca Tolteca CPC 30R RS	Ton	0.402	3,000.00	1,206.00
Grava	Grava tritura de ¾" del banco de material "La Roka"	m ³	0.3734	203.45	75.97
Arena	Arena blanca del banco de material "El Coro"	m ³	0.2445	100.00	24.45
Agua	Agua potable	m ³	0.2673	19.91	5.32
Fibra de PET¹	Macrofibra de PET reciclado	kg	3.2158	1592.51	5,121.19
CBC²	Ceniza de Bagazo de Caña	kg	60.294	98.08	5,913.64
Costo total de materiales					12,346.57

El costo total de los materiales para 1m^3 de concreto con fibra de PET y ceniza de bagazo de caña (PR0.8 + CBC15) de MR de diseño de 42 kg/cm^2 es de \$12,346.57 (doce mil trecientos cuarenta y seis 57/100) MXN más IVA.

²El costo unitario de la ceniza de bagazo de caña fue estimado a partir de un análisis del precio unitario por concepto de acondicionamiento de CBC para fines de adición en el concreto hidráulico. La tabla 66 muestra el análisis del costo total de la ceniza de bagazo de caña (CBC) seca y molida.

Tabla 66. Cálculo del precio unitario de la CBC para fines de adición en la investigación.

Análisis de precio unitario – CBC					
Concepto	Acondicionamiento de ceniza de bagazo de caña (CBC) para fines de adición en el concreto hidráulico, mediante un proceso de secado y de molido.	Unidad	kg		
		Cantidad	1.00		
		Precio Unitario (\$)	98.08		
		Total (\$)	98.08		
Clave	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario (\$)	Total (\$)
Materiales					
CBC15	Ceniza de Bagazo de Caña adquirida del ingenio azucarero “Lázaro Cárdenas”	kg	1.013	0.30	0.30
Total de Materiales					\$ 0.30
Mano de Obra					
Fabricante de adición mineral	Ayudante general	Jor	0.0087	450.00	3.91
Total de Mano de Obra					\$ 3.91
Herramienta					
	Herramienta menor	% (MO)	0.03	3.91	0.12
Total de Herramienta					\$ 0.12
Equipo					
Horno	Horno de secado con capacidad para secar 6 kg de CBC al día	hora	4.00	23.30	93.18
Molino	Máquina de desgaste de “Los Ángeles”	hora	0.0694	8.18	0.57
Total de Equipo					\$ 93.75
Costo directo					\$ 98.08

El precio unitario de la CBC se estimó a partir de sumar el costo de adquisición de la CBC del ingenio azucarero (\$ 300.00 MXN/tonelada), que habitualmente se adquiere para fines de composteo, más el costo total de mano de obra empleada para el acondicionamiento de la CBC, un costo total de herramienta menor, calculado como un 3% de la mano de obra y un costo por cargos fijos de los equipos empleados.

La cantidad de CBC requerida en kilogramos para fabricar 1 kg de CBC seca y molida, fue calculada a partir de considerar un aumento en el cálculo de las CBC requerida del ingenio por 1.3% característico de la humedad que adquiere la ceniza en contacto con el ambiente. El rendimiento del ayudante general, equivale a moler 115.2 kg de CBC en una jornada de 8 horas. El costo de mano de obra por secar la CBC se encuentra incluido en el costo horario del horno de secado, teniendo un rendimiento de secado de 6 kg de CBC tal cual se adquirió del ingenio azucarero en un tiempo de 24 horas.

CONCRETO PM0.8 + CBC15

Tabla 67. Cálculo del costo total del concreto con PET molido y CBC (PM0.8 + CBC15).

Costo de materiales para 1 m ³ de concreto PM0.8 + CBC15					
Material	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario (\$)	Total (\$)
Cemento	Cemento marca Tolteca CPC 30R RS	Ton	0.402	3,000.00	1,206.00
Grava	Grava tritura de ¾" del banco de material "La Roka"	m ³	0.3734	203.45	75.97
Arena	Arena blanca del banco de material "El Coro"	m ³	0.2445	100.00	24.45
Agua	Agua potable	m ³	0.2673	19.91	5.32
PET molido	PET limpio y molido obtenido del proceso de reciclaje mecánico	kg	3.2158	8.00	25.73
CBC²	Ceniza de Bagazo de Caña	kg	60.294	98.08	5,913.64
Costo total de materiales					7,251.11

El costo total de los materiales para 1m³ de concreto con PET molido y ceniza de bagazo de caña (PM0.8 + CBC15) de MR de diseño de 42 kg/cm² es de \$7,251.11 (siete mil doscientos cincuenta y uno 11/100) MXN más IVA.



7. Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

La investigación cumplió con los objetivos trazados al inicio de la investigación, partiendo con la caracterización, selección y acondicionamiento de los materiales aptos para las mezclas de concreto en estudio; así como, con el de diseñar las mezclas a partir del parámetro de resistencia MR, de tal manera que, el programa experimental llevó consigo la elaboración de especímenes cilíndricos y prismáticos para la cuantificación de las propiedades en estado fresco (revenimiento, potencial de hidrogeno y temperatura) y endurecido (resistividad eléctrica; velocidad de pulso ultrasónico; resistencia a la compresión, a la tensión y a la flexión; módulo de elasticidad estático y dinámico; resistencia a los sulfatos, carbonatación y absorción capilar) para determinar la influencia que puede alcanzar el adicionar PET reciclado y ceniza de bagazo de caña (CBC) en un concreto hidráulico convencional.

A parte de cumplir con los objetivos particulares de la investigación, el estudio realizado presenta una serie de conclusiones a partir de los resultados obtenidos al incorporar el material de PET reciclado y la adición mineral, las cuales se identifican a continuación:

- Una de las principales aportaciones en el área de los materiales sostenibles fue la creación de una nueva macrofibra, con características particulares, elaborada a partir de botellas de PET post-consumo (PR), la cual puede llegar a ser una alternativa prometedora como un material de refuerzo/adición en losas de concreto hidráulico para pavimentos rígidos.
- El empleo de material de PET producto del reciclaje de botellas recicladas en la mezcla de concreto, no le es dañino a la matriz cementicia, lo que genera una densidad y estabilidad aceptable al concreto hidráulico.
- El empleo de ceniza de bagazo de caña (CBC), como adición en mezclas de concreto hidráulico modificadas con material de PET, por la granulometría mostrada en la tabla 40 de la presente investigación, entorpeció el grado de hidratación de las matrices cementicias, conocido esto a partir de todos los resultados obtenidos en los ensayos



físicos y mecánicos, los cuales presentan un retardo en su desempeño a edades inferiores a 90 días y una mayor porosidad efectiva de hasta un 27%, medida a 180 días; provocando así, un incremento en el riesgo de deterioro de los concretos, producto del ataque agresivo de agentes peligrosos del ambiente (provocando baja durabilidad) con respecto a las demás mezclas de concreto hidráulico.

- Con respecto a las propiedades medidas de las mezclas de concreto en estado fresco, se identificó que todas las mezclas son de carácter alcalino, alcanzando temperaturas ideales de laboratorio iguales a 22 °C, sin importar la adición mineral o el material plástico e identificando específicamente que, las mezclas modificadas con macrofibras de PET presentaron una mayor consistencia y mayor enlace entre los materiales; siendo que las mezclas sin fibra se dejaba notar el ligero exceso de agua producto del revenimiento medido.
- La **resistividad eléctrica**, medida en cada mezcla de concreto, arrojó una variación de resultados para las mezclas con y sin CBC, siendo que el par de mezclas con ceniza de bagazo de caña (PR0.8 + CBC15 y PM0.8 + CBC15), presentaron un valor inferior respecto a las demás mezclas y observando un valor superior en el caso de las mezclas PR-0.8 y PM-0.8, respecto a la mezcla control (M-C). Los valores alcanzados de resistividad eléctrica de todas las mezclas se encontraron entre 10 kΩ-cm y 22 kΩ-cm a la edad de 180 días, lo que significa que presentaron porosidades interconectadas de consideración, permitiendo que el transporte de agentes agresivos dentro de todas las mezclas sea rápido.
- La **velocidad de pulso ultrasónico**, dentro de los cinco concretos hidráulicos, fue comúnmente identificada por encima de los 3500 m/s como lo marcan diversos trabajos sobre el concreto de peso normal, alcanzando valores por arriba de 4000 m/s y representando así concretos con pocos vacíos y con bajo riego a agrietamientos en su estructura, según las especificaciones de la normativa mexicana. Las mezclas de concreto con material de plásticos se encuentran con un valor de VPU ligeramente



superior a la mezcla M-C y mayormente a las mezclas combinadas con CBC, en las diferentes edades de prueba.

- La **densidad** presentada por las mezclas con material de PET fue ligeramente mayor a las otras mezclas de concreto, siendo la mezcla con macrofibra de PET la que presentó una densidad mayor a lo largo de las edades de prueba, finalizando con una densidad de 2264.24 kg/m^3 a los 180 días. La mezcla con PET molido y CBC presentó la menor densidad por debajo de la mezcla control.
- En relación con el **módulo de elasticidad dinámico**, determinado a partir de la VPU y densidad de cada mezcla de concreto, representó para todas las mezclas un valor de 7,000 a 8,000 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en Megapascuales, obteniendo el valor más alto de rigidez la mezcla con fibra de PET, con 44511.06 MPa a 180 días, seguido de la mezcla con PET molido y de la mezcla control, siendo la mezcla con fibra de PET y CBC la de menor valor de rigidez después de los 28 días de edad y hasta los 180 días.
- Respecto al **desempeño mecánico** de cada uno de los concretos elaborados, tanto la mezcla control como las mezclas con adición de PET y CBC cumplieron con las resistencias de proyecto y únicamente existió un decremento en la rigidez del concreto al agregar fibra de PET, visto al determinar el módulo de elasticidad estático en cada una de las mezclas. La incorporación de macrofibra de PET en el concreto benefició el incremento de la tensión en el concreto hidráulico.
- En el comportamiento a flexión o del módulo de ruptura de las distintas mezclas de concreto, característica en los pavimentos rígidos, definitivamente no existió una variación o un aumento en el valor del esfuerzo al adicionar la fibra de PET o los otros materiales, sin embargo, se pudo notar que las fibras de PET ayudan a que la falla del concreto hidráulico no sea súbita como usualmente se presenta, así como



ayudan a mitigar las grietas que se forman en la parte inferior de las vigas de prueba, al fallar éstas.

- Es entonces que, la presencia de macrofibra de PET reciclado en las mezclas de concreto, ayudan a incrementar la resistencia a tensión del concreto y a modificar las fallas típicas del concreto convencional ante cualquier modo de carga, mitigando así las fallas en el concreto y presentando una falla no súbita y dúctil en su estructura. Las fibras en el concreto hidráulico ayudan a que el material incremente su tenacidad (absorción de energía); es decir, incluso después del agrietamiento de la matriz, pueda seguir siendo cargado.
- Al cuantificar la durabilidad del concreto convencional y de los concretos modificados con material de PET y CBC resultó que, todas las mezclas presentan un riesgo moderado a alto de presentar problemas de deterioro y corrosión (en el caso de tener acero embebido) ante agentes agresivos del ambiente, siendo los más desfavorables los concretos con ceniza de bagazo de caña y observando una ligera mejoría en la durabilidad al incorporar únicamente la macrofibra de PET reciclado.
- Desde el punto de vista costo-beneficio, al incorporar macrofibras de PET recicladas, creadas bajo una metodología de reciclaje mecánico y en forma rustica, como se hizo en este trabajo, eleva el costo de producción del concreto 4.9 veces más lo correspondiente a elaborar un concreto convencional. También, por otra parte, al incorporar la CBC seca y molida en un concreto con fibra de PET, incrementa el costo 9.4 veces lo correspondiente a elaborar un concreto convencional, siendo este tipo de concreto con adición mineral el más desfavorable de acuerdo con el desempeño mecánico y de durabilidad obtenido. En el caso del concreto con PET molido, cuyo desempeño mecánico y de durabilidad no difiere de un concreto convencional, su costo de construcción se eleva solamente un 2 % del costo del concreto control.



6.1. Recomendaciones y trabajo futuro

Siendo que la presente investigación, es sólo una primera aproximación respecto a la utilización de la macrofibra de PET reciclado y del PET molido; así como de la combinación con una adición mineral, se recomienda lo siguiente para los trabajos futuros:

- Replicar las mezclas de concreto con macrofibra de PET y demás mezclas de concreto y cuantificar la tenacidad o absorción de energía que puede alcanzar el concreto reforzado con estas macrofibras de PET.
- Realizar un estudio de micro y nano-caracterización, de los materiales adicionados al concreto, principalmente de la CBC tal cual fue adicionada a los concretos con material de PET reciclado; así como, de las matrices de concreto fabricadas en la presente investigación, que permitan dar un panorama más claro del ¿por qué? de los resultados obtenidos.
- La aplicación de ensayos de durabilidad, que permitieran un mayor panorama respecto a las especificaciones de un concreto durable, como es el caso de la indicación eléctrica de penetrabilidad de iones cloruros, la permeabilidad de agua y la medida de expansión provocada por sulfatos.
- Medir la contracción adquirida por especímenes nuevos de concreto con las mismas características de estudio o bien, realizar un tramo de prueba de un pavimento rígido en donde se involucre principalmente la macrofibra de PET creada en la presente investigación.
- Realizar una nueva investigación en donde se puedan comparar diferentes concretos reforzados con macrofibras comerciales y la de PET reciclado, condicionando la dosificación apta para las fibras comerciales principalmente.



7. Bibliografía

- 211.1, A. (1994). "Standard practice for selection proportions for normal, heavyweight, and mass concrete". En *ACI Manual of Concrete Practice, Part 1 : Materials and General Properties of Concrete* (pág. 38). Detroit, Michigan.
- ACI 305R-91. (1994). "Hot weather concreting". En *ACI Manual of Concrete Practice, Parte 2 - 1992: Construction Practices and Inspection Pavements* (pág. 20). Detroit, Michigan: ACI.
- Aguilera Bazán, G., & Diestra Lujan, V. A. (2017). *Influencia de la fibra de PET a partir de botellas recicladas sobre el comportamiento mecánico en un concreto aplicado en prefabricados*. Trujillo, Perú: Universidad Nacional de Trujillo.
- Al-Hadithi, A. I., & Hilal, N. N. (2016). The possibility of enhancing some properties of self-compacting concrete by adding waste plastic fibers. *Journal of Building Engineering*, 8, 20-28.
- Antillón, J. (2016). USO DE FIBRAS EN EL CONCRETO. *Construcción y Tecnología en Concreto*, 28-29.
- Arabi Nawwaf Saoud AL Qadi, K. S.-K. (2011). Effect of Polypropylene Fibres on Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete at elevated temperatures. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(10).
- ARGOS. (2010). *TIPOS DE DETERIOROS EN PAVIMENTOS DE CONCRETO*. ARGOS.
- ARQHYS, 2. (2017). *Propiedades del cemento*. Revista ARQHYS.com. Obtenido de obtenido de: <http://www.arqhys.com/propiedades-quimicas-del-cemento.html>.
- Arreola Sánchez, M. (2013). *ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE MATERIALES (SUSTITUTOS PARCIALES DEL CEMENTO), PARA MEJORAR LA DURABILIDAD DE MORTEROS PARA REPARACIÓN Y/O CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO*. Morelia, Michoacán, México: UMSNH.



- Arulrajah et al., A. (2015). Modulus of rupture evaluation of cement stabilized recycled glass/recycled concrete aggregate blends. *Construction and Building Materials* , 84, 146-155.
- Askeland, D. R. (2016). *Ciencia e Ingeniería de los materiales*. EEUU: Cengage Learning.
- ASTM C 1583. (2013). *Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method)*. EE.UU.: ASTM.
- ASTM-C-150. (2016). *Standard Specification for Portland Cement*. ASTM.
- ASTM-C-70. (2003). *Standard Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregate*.
- Ávila Córdoba, L. I., Martínez Barrera, G., Barrera Díaz, C. E., Ureña Nuñez, F., & Loza Yáñez, A. (2015). PET de Desecho y su Uso en Concreto. En G. Martínez Barrera, J. Hernández Zaragoza, T. López Lara, & C. (. Menchaca Campos, *Materiales Sustentables y Reciclados en la Construcción* (págs. 95-122). Barcelona, España: OmniaScience.
- Awaja, F., & Pavel, D. (2005). Recycling of PET. *European Polymer Journal* 47 (7), 1453-1477.
- Baldenebro López, F. J. (2015). *ESTUDIO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE FIBRAS DE PET Y SU COMPORTAMIENTO EN UNA MATRIZ DE CONCRETO*. Chihuahua, Chih.: Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.
- Bernabé Reyes, C. (2015). *Evaluación de Morteros de Cemento Sustituidos con Cenizas Puzolánicas para mitigar el fenómeno de Corrosión en Estructuras de Concreto en Rehabilitación*. Morelia, Michoacán: UMSNH.
- Blancas Herrera, V. H. (2017). *“EVALUACIÓN FÍSICO-MECÁNICA Y POR CRITERIOS DE DURABILIDAD DE MATRICES CEMENTICIAS CON SUSTITUCIONES ORGÁNICAS*. Morelia, Michoacán, México: UMSNH.



- Brent, A. (2006). *Plastics: materials and processing*. Michigan - USA: Pearson Prentice Hall.
- C109/C109M, A. (2016). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2 in. or [50-mm] Cube Specimens)*. EE. UU.: ASTM.
- C597, A. (2016). *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. EE.UU.: ASTM.
- Caggiano et. al., A. (2012). Fracture behavior of concrete beams reinforced with mixed long/short steel fibers. *Constr. Build. Mater*, 37, 832-840.
- Camacho Velasco, I. (2010). *Obtención de concreto polimérico a partir de la degradación de PET*. Cuautitlan Izcali, Estado de México, México: UNAM.
- Celis Navarro, G. (2011). Pavimentos carreteros con concreto. *CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA EN CONCRETO*, 1(06).
- CEMEX. (2019). *Ficha Digital CPC 30R RS: CEMEX*. Obtenido de <https://www.cemex.com/documents/27057941/45887874/ficha-digital-CPC-30R-RS.pdf/85067743-f419-b55d-68b6-990f57ef4119>
- Chan Yam, J. L., Solis Carcaño, R., & Moreno, E. I. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Ingeniería 7-2*, 39-46.
- Choi et al., P. (2017). Effects of mineral admixtures and steel fiber on rheology, strength, and chloride ion penetration resistance characteristics of wet-mix shotcrete mixtures containing crushed aggregates. *Construction and Building Materials* , 142, 376-384.
- Choi, Y. W., Moon, D. J., Kim, Y. J., & Lachemi, M. (2009). Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate, manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles. *Constr. Build. Mater.* 23, 2829-2835.
- CONADESUCA. (2018). *CAÑA DE AZUCAR - ESTADÍSTICAS INTERNACIONALES DE PRODUCCIÓN*. México: SAGARPA.



- Cordeiro, C., Toledo, R., Tavares, R., & Fairbairn, E. (2008). “Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars”. *ELSEVIER*, 410.
- Dávila Mercado, M. P. (2010). *EFFECTO DE LA ADICIÓN DE FIBRAS SINTÉTICAS SOBRE LAS PROPIEDADES PLÁSTICAS Y MECÁNICAS DEL CONCRETO*. México, D.F.: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- de León Morga, M. A. (2015). *Antecedentes Históricos de las carreteras en México*. México: Instituto Tecnológico de Tapachula.
- Diccionario. (2019). [//www.google.com.mx/?gfe_rd=cr&ei=iFAxVqjpO-en8we0_4DoAw#q=agua](http://www.google.com.mx/?gfe_rd=cr&ei=iFAxVqjpO-en8we0_4DoAw#q=agua). Obtenido de Diccionario .
- Divsholi, B., & T.Y.D. Lim, S. (2013). Durability and mechanical properties of high strength concrete incorporating ultra fine ground granulated blast-furnace slag. *Constr. Build. Mater*, 40, 875-881.
- documents.mx. (07 de Diciembre de 2015). *CUARTEO DE AGREGADOS*. Obtenido de <http://documents.mx/documents/cuarteo-de-agregados.html>.
- ECOCE. (2017). *ECOCE 15 AÑOS*. CDMX: ECOCE.
- Elías, X. (2009). *Reciclaje de residuos industriales. Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora*. España: Díaz de Santos.
- Flores Fernández, J. A. (2014). *EFFECTO EN LAS PROPIEDADES EN TENSION DE UN MATERIAL COMPUESTO BASE CEMENTO REFORZADO CON FIBRAS DE PET RECICLADO*. Chihuahua: CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS S.C.
- Foti, D. (2011). Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers. *Construction and Building Materials* , 25, 1906-1915.
- Frigione, M. (2010). Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste Management*, 30, 1101-1106.



- Gomero Cervantes, B. W. (2006). *ADITIVOS Y ADICIONES MINERALES PARA EL CONCRETO*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería Perú.
- Guevara, G., Hidalgo, C., Pizarro, M., Rojas, L., & Segura, G. (2012). Efecto de la variación agua/cemento en el concreto. *Tecnología en Marcha*. Vol. 25, N° 2, 80-86.
- H. Kosmatka, S., Kerkhoff, B., C. Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Skokie, Illinois, EE.UU.: Portland Cement Association.
- Hayasaka Reyes, J., & Peñafiel Soto, F. (1996). *PAVIMENTO DE CONCRETO HIDRAULICO EN CARRETERAS*. MEXICO, D.F.: INSTITUTO TECNOLOGICO DE LA CONSTRUCCIÓN, A.C.
- Hormigón, I. B. (2006). *DISEÑO DE PAVIMENTOS (AASHTO-93)*. Bolivia: Escuela de Caminos de Montaña de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de San Juan.
- Hsu, T. C., Slate, F. O., Sturman, G. M., & Winter, G. (1963). Microcracking of plain concrete and the shape of the stress-strain curve. *J. Amer. Concr. Inst.*, 60, 209-24.
- Inciarte Melan, C. P. (2012). *Análisis comparativo de métodos de diseño y construcción de pavimentos de concreto hidráulico según normas aplicadas en México, Reino Unido y España*. México: UNAM.
- Instituto del Concreto. (1997). *Manual Tecnología y Propiedades*. Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto.
- Instituto del Concreto. (1997). *Manual Tecnología y Propiedades*. Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto.
- J. Vidaud Quintana, I. E., & Vidaud Quintana, I. I. (2016). ULTRASONIDO: Aplicación para la determinación del módulo de elasticidad dinámico. *CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA EN CONCRETO*, 31-35.



- Libre et al., N. A. (2011). Mechanical properties of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice. *Construction and Building Materials*, 25, 2458-2464.
- Liguori, B., Iucolano, F., Capasso, I., Lavorgna, M., & Verdolotti, L. (2014). The effect of recycled plastic aggregate on chemico-physical and functional properties of composite mortars. *J. Mater* 57, 578-584.
- Lopes Pereira et al., E. (2017). Optimization of mechanical properties in concrete reinforced with fibers from solid urban wastes (PET bottles) for the production of ecological concrete. *Construction and Building Materials*, 149, 837-848.
- López Roman, J. (2015). *ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS CORTAS DE ACERO Y MACROFIBRAS DE POLIPROPILENO: INFLUENCIA DEL TIPO Y CONSUMO DE FIBRA ADICIONADO*. México, D. F.: UNAM.
- López, J. (2015). *Tesis de Maestría Análisis de las propiedades del concreto reforzado con fibras cortas de acero y macrofibras de polipropileno: Influencia del tipo y consumo de fibra adicionado*. México: Universidad Autónoma de México.
- M. Barreda, C. (2000). Concreto reforzado con fibras de polipropileno: tramo experimental de un pavimento de concreto. *Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga*, 1145-1150.
- M. D. Cohen, J. O. (1990). "Mechanism of plastic shrinkage cracking in portland cement and portland cement-silica fume paste and mortar". *Cement and Concrete Research*, 20, núm. 1, 103-19.
- Mahyar Azhdarpour, A., Reza Nikoudel, M., & Taheri, M. (2016). The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; a laboratory evaluation. *Construction and Building Materials*, 109, 55-62.
- Mehta, P., & Gerwick, B. (1982). *Concr. Int.*



- Metha, K., & Monteiro, P. (2013). *Concreto Estructura, propiedades y materiales*. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C.
- Miranda Rebolledo, R. (2010). *DETERIOROS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES Y RÍGIDOS*. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.
- M-MMP-2-02-032. (2018). MMP. MÉTODOS DE MUESTREO Y PRUEBA DE MATERIALES. En *Resistencia a la Degradación del Agregado Grueso mediante la Máquina de Los Ángeles*. México: SCT.
- Moreno, E. I. (2006). Determinación del pH de la solución de los poros de concreto después de un proceso acelerado de carbonatación. *Ingeniería 10-3*, 5-12.
- N. Singh, D. H. (2017). Recycling of plastic solid waste: a state of art review and future applications. *Compos. Part B 115*, 409-422.
- Naaman, A. (2000). *Fibre Reinforcements for Concrete: looking back, looking ahead*. Rilem Proceedings 15.
- National Ready Mixed Concrete Association. (1998). *¿Qué, por qué y cómo? Resistencia a Flexión del concreto*. Silver Spring, Maryland: NRMCA.
- Navarro Sánchez, L. M., Martínez Molina, W., & Espinoza Mandujano, J. A. (2011). *Análisis de Materiales*. Morelia, Michoacán: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; Facultad de Ingeniería Civil.
- N-CMT-2-02-003. (2002). CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES. En *Calidad del Agua para Concreto Hidráulico*. México: SCT.
- N-CMT-4-06-001. (2019). Calidad de Agregados para Carpetas de Concreto Hidráulico. En *CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES*. México: SCT.
- N-CTR-CAR-1-04-009. (2006). Carpetas de Concreto Hidráulico. En *CTR. CONSTRUCCIÓN*. México: SCT.
- Neville, A. (1998). *Tecnología del Concreto* (Primera ed.). México: Trillas; Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC).



- Neville, A. (2013). *TECNOLOGÍA DEL CONCRETO*. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
- Neville, A., & Brooks, J. (1999). “*Tecnología del concreto*”. México: Pearson.
- NMX-C-030-ONNCCE. (2004). *Industria de la construcción - Agregados - Muestreo*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-061-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cementantes Hidráulicos*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-073-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción - Agregados - Masa Volumétrica - Método de Prueba*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-075-ONNCCE. (2018). *Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Sanidad Por Medio de Sulfato de Sodio o Sulfato de Magnesio - Método de Ensayo*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-077-ONNCCE. (1997). *Industria de la Construcción - Agregados para concreto - Análisis granulométrico - Método de Prueba*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-085-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Determinación Estándar para el Mezclado de Pastas y Morteros de Cementantes Hidráulicos*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-088-ONNCCE. (1997). *Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de Impurezas Orgánicas en el Agregado Fino*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-109-ONNCCE. (2013). *Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Cabeceo de Especímenes*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-111-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción - Agregados para concreto hidráulico - Especificaciones y Métodos de ensayo*. CDMX: ONNCCE.



- NMX-C-122-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción - Agua para Concreto - Especificaciones*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- NMX-C-128-ONNCCE. (2013). *Industria de la Construcción - Concreto Sometido a Compresión - Determinación del Modulo de Elasticidad Estático y Relación de Poisson*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-148-ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción - Cementos y Concretos Hidráulicos - Gabinetes, Cuartos Húmedos y Tanques de Almacenamiento - Condiciones de Diseño y Operación*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-152-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Determinación de la Densidad*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-155-ONNCCE. (2014). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN - CONCRETO HIDRÁULICO - DOSIFICADO EN MASA - ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE ENSAYO*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-156-ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Determinación del Revenimiento en el Concreto Hidráulico*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-159-ONNCCE. (2016). *Industria de la Construcción - Concreto - Elaboración y Curado de Especímenes en el Laboratorio*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- NMX-C-164-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Grueso*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-165-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado fino - método de ensayo*. CDMX: ONNCCE.



- NMX-C-170-ONNCCE. (1997). *Industria de la Construcción - Agregados - Reducción de las Muestras de Agregados Obtenidas en el Campo, al Tamaño Requerido para las Pruebas*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- NMX-C-191-ONNCCE. (2015). Determinación de la resistencia a la flexión del concreto. En *Normativa NMX*. México.
- NMX-C-263-ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico Endurecido - Determinación de la Masa Específica, Absorción y Vacíos*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-275-ONNCCE-2004. (2004). *Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de la Velocidad de Pulso a través del Concreto - Método de Ultrasonido*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-403-ONNCCE. (1999). *Industria de la construcción – concreto- hidráulico para uso estructural*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-414-ONNCCE. (2017). *Industria de la construcción -Cementantes Hidráulicos- Especificaciones y Métodos de Ensayo*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-514-ONNCCE. (2019). *Industria de la construcción - Resistividad eléctrica del concreto hidráulico - especificaciones y métodos de ensayo*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-515-ONNCCE. (2016). *Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Durabilidad - Determinación de la Profundidad de Carbonatación en Concreto Hidráulico - Especificaciones y Método de Ensayo*. CDMX: ONNCCE.
- Notas de Concreto. (2017). *Peso Específico y Densidad Relativa del Concreto*. Obtenido de <http://notasdeconcretos.blogspot.mx/2011/04/peso-especifico-densidad-y-densidad.html>.
- Olivera, F. (1996). *ESTRUCTURACIÓN DE VÍAS TERRESTRES*. México D.F.: CECSA.



- Palacios Santillán, A. (2014). *ELABORACIÓN DE PET-CONCRETO, BUSCANDO MEJORAR SUS PROPIEDADES MECANICAS DE TENSION Y FLEXIÓN*. México D.F.: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- Pardavé, W. (2004). *Envases y medio ambiente*. Colombia: ECOE Ediciones.
- Passuello et. al., A. (2009). Cracking behavior of concrete with shrinkage reducing admixtures and PVA fibers. *Cem. Concr. Compos*, 31, 699-704.
- Pérez Alama, V. (1986). *El concreto armado en las estructuras*. México: Trillas.
- Pesquera, S. d. (13 de Agosto de 2018). *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (siap)*. Obtenido de Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (siap): <https://www.gob.mx/siap/articulos/la-produccion-de-cana-de-azucar-supera-las-55-millones-de-toneladas-en-2018?idiom=es>
- PlasticsEurope, P.-t. F. (2018). *An Analysis of European Latest Plastics Production, Demand and Waste Data*.
- Propiedades de los cementos*. (2017). Obtenido de <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion6.PropiedadesCEMENTOS.pdf>.
- Quintero Blandón, C. F., & Mahecha Rico, J. D. (2016). *PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE PET RECICLADO*. Bogotá D.C.: Universidad Militar Nueva Granada.
- Ramírez, D. (2011). *Tesis Propuesta de un material compuesto con base al PET reciclado con aplicaciones en construcción*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Red Iberoamericana XV.B. "DURAR". (1998). *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado* (Tercera Edición ed.). CYTED.
- Rossi, P. (2000). *Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPFRC): A General Vision*. Rilem Proceedings 15.



- Rossi, P. (2013). Influence of fibre geometry and matrix maturity on the mechanical performance of ultra high-performance cement-based composites. *Cem. Conc. Compos*, 37, 246-248.
- Sanabria Chioino, S. A. (2016). *HORMIGÓN FIBRO-REFORZADO. FIBRAS OBTENIDAS DE ENVASES POST-CONSUMO vs FIBRAS SINTÉTICAS COMERCIALES. ESTUDIO PRELIMINAR*. Udelar, Montevideo, Uruguay: UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA URUGUAY.
- Sánchez, M. (2001). *Tesis de Maestría Factibilidad de comercialización de PET reciclado en la ciudad de Bogotá*. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes Bogotá Colombia.
- Santos Cortés, L. d. (2006). *Contribución de fibras PP provenientes de plásticos reciclados en el agrietamiento y resistencia del concreto en pavimentos portuarios de Veracruz*. Veracruz, México: Universidad Veracruzana.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2015). *El Caminero en la historia*. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2018). *Anuario Estadístico del Sector Comunicaciones y Transportes 2018*. CDMX: Dirección General de Planeación de la SCT.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (24 de julio de 2018). *GOBIERNO DE MÉXICO*. Recuperado el 14 de septiembre de 2020, de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/diferencia-entre-sustentable-y-sostenible>
- Shah, S. P., & Weiss, W. J. (Abril 1998). “Shrinkage Cracking - Can it be prevented? (Fisuración por Contracción – ¿se la puede prevenir?)”. *Concrete International, American Concrete Institute*, 51-55.
- Shannag, M. J. (2000). High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume. *Cem. Concr. Compos*, 22 (6), 399-406.



- Shetty, M. (2005). *Concrete Technology Theory and Practice*. Ram Nagar, New Dheli, India: Chand and Companu LTD.
- Shetty, M. (2005). *Concrete Technology Theory and Practice*. Ram Nagar, New Dheli, India: S. Chand and Companu LTD.
- Silva, R. V., & J. De Brito, R. K. (2014). Dhir, Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Constr. Build. Mater.* 65, 201-217.
- Slate, F. O., & Hover, K. C. (1984). Microcracking in concrete, in *Fracture Mechanics of Concrete: Material Characterization and Testing*. Eds A. Carpinteri and A. R. Ingraffea, Martinus Nijhoff, The Hague, 137-58.
- Teng et al., S. (2018). Flexural behavior and durability properties of high performance hybrid-fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 182, 504–515.
- Tomorrow's, C. T.—D. (2017). *La Densidad del Cemento*. Obtenido de Characterizing Today's Materials — Discovering Tomorrow's - See more at: http://www.quantachrome.com/materials_applications/Cement_density_spanish.htm#sthash.DpLjwE29.dpuf.
- Vidal, D. V., Torres, J., & González, L. O. (2014). CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA PARA ELABORACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN: ESTUDIO PRELIMINAR. *Revista de Física*, No. 48E, 14-23.
- Ycaza, X. (02 de 10 de 2011). *Ingeniería y Construcción*. Obtenido de Ingeniería y Construcción: <https://civilgeeks.com/2011/10/02/la-carbonatacion-el-primer-cancer-del-hormigon-i/>