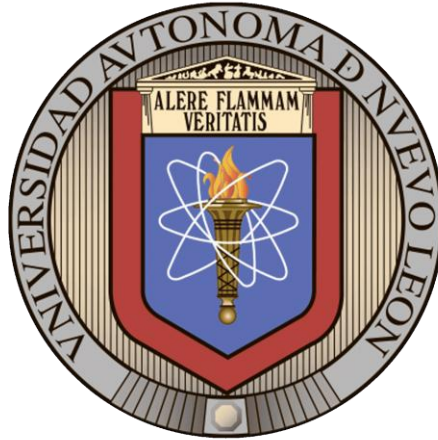


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**DESARROLLO DE UN CONCRETO DE ULTRA-ALTO
COMPORTAMIENTO LIGERO PARA APLICACIONES
ARQUITECTÓNICAS**

Por

JORGE ALFREDO XILOTL DOMÍNGUEZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE
CONSTRUCCIÓN**

Mayo 2026

Agradecimientos

A Dios, quien me ha permitido vivir y disfrutar la vida.

A mi mamá, mis hermanos y mis sobrinos, quienes me aman y están ahí para mí en todo momento.

A mi familia, que aun estando lejos, siempre me han apoyado, alentado y creído en mí

A mis amigos de la licenciatura los ingenieros Ronny, Esteban, Chacón, Maya, los cuales desde que tomé la iniciativa de entrar a la maestría me apoyaron y me motivaron para darlo todo confiando en lo que podía lograr.

A mis amigos de concreto los ingenieros Olga, Jorge Castro, Wilmer, Ávila, Hiram, Danny y Chacón, ya que nunca me dejaron morir solo cuando tenía que hacer mezclas, siempre me apoyaron, me ayudaron y fueron un punto clave para debatir y modificar las mezclas para mejorarlas, siempre encontrando un momento divertido, riendo y siendo muy felices aún estuviéramos muy cansados. Ustedes fueron muy importantes para mi estancia en el posgrado.

A la ingeniera Fernanda Calixto, quien fue clave en este proceso, me apoyó y me motivó para encontrar una meta y no darme por vencido aún en tiempos difíciles y que compartimos un mismo camino.

Al todo el dpto. de Tecnología del Concreto, el cual, fue mi segunda casa durante casi 5 años, desde que estuve en la licenciatura, en donde las horas que pasaba ahí, siempre fueron muy divertidas.

Al Laboratorio de Investigación e Innovación en Materiales de Construcción (LIIMC), quienes me abrieron las puertas para todas las pruebas que fueron necesarias, quienes me invitaban un taco, una dona, un café o algo para hacer más ameno el tiempo y la estancia ahí.

A todos los estudiantes que les impartí brigadas, servicio social y trabajadores (David Posadas, Gabriel “x”, Axel, etc.) que me ayudaron en algún momento a hacer mezclas y ensayar, y que siempre estuvieron muy atentos a todo lo que yo les decía y se volvieron mis amigos.

Al American Concrete Institute y a la Sección Noreste de México del ACI, los cuales fueron un gran soporte para mí, brindando oportunidades únicas, que me permitieron crecer, romper las barreras y encontrar un camino definido para mi futuro, así como seguir encontrando amigos y personas que les apasiona lo mismo que a mí.

A mis asesores, los Dr. Alejandro Durán Herrera, Dr. Lucio Guillermo López Yépez y la Dra. Ana Luisa Muñoz Espinosa, los cuales me brindaron una guía sólida en estos años para generar un trabajo estructurado, y con impacto en el beneficio de la sociedad y del conocimiento.

A mi primera mentora de la investigación, la Dra. Rocío, quien fue clave desde el 1er semestre de la licenciatura para adentrarme en el mundo de la ciencia, la tecnología y la innovación, que posteriormente pude enfocarla en lo que más me gusta, y quien fue mi tutora por varios semestres de la carrera brindando una mentoría para obtener el mejor desarrollo de oportunidades en la licenciatura y confiando en mí.

A mis mentores en este mundo del concreto, el M.C. José Alejandro Herrera González, el M.C. Rogelio Dávila Pompermayer, quienes fueron demasiado importantes para encontrar una pasión y motivación de aprender más, así como ser críticos, analistas y objetivos de que era lo que estaba haciendo, me apoyaron y me resolvieron dudas mientras trabajaba en el Dpto., así como todas las veces que nos tocó competir, que confiaban en nosotros y nos tocó ganar lugares nacionales e internacionales, gracias.

A la Facultad de Ingeniería Civil de la UANL, quien me aceptó cuando tenía 17 años para estudiar una licenciatura y posteriormente mi posgrado, y que fue igualmente, una segunda casa, permitiendo obtener oportunidades únicas y de mejora por los estudiantes.

A los patrocinadores, Cemex por el cemento brindado, GCC y al laboratorio de I&D por la puzolana que me ha brindado y la oportunidad de utilizar el laboratorio para pruebas, Eucomex por los aditivos brindados, así como al ing. Fabian “x” por el agregado de calcita, a Hilti, en especial a la M.I. Diana Rodríguez y al M.C. Ramón Morales por el material para la prueba de anclajes.

A todo el equipo de I&D de GCC, quienes son mis compañeros de trabajo y mis amigos, que me han abierto una puerta en sus vidas, y que confían en mí para formar un gran equipo de trabajo.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por la oportunidad y la beca que me fue otorgada para estudiar algo que siempre anhelé como lo es un posgrado.

DEDICATORIA

A mi mamá Reyna Domínguez Marquez, que ha sido el pilar principal en mi vida y que sé que está orgullosa de nosotros y de todo lo que hemos logrado como hijos.

A mi hermana Arlen Virues Domínguez, quien me apoyo en todo momento y cuidó de mí para bien.

A mi hermano Luis Oswaldo Virues Domínguez, quien me dio la oportunidad de vivir con él y afrontar nuevos retos, además de apoyarme y confiar en mí.

A mis amigos, quienes son parte de este resultado.

A mi familia, quienes me han enseñado lo valiosa que es la vida.

A mí, por el esfuerzo y la pasión invaluable en este proceso.

Índice de Contenido

Índice de Tablas	viii
Índice de Figuras	xi
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Panorama general de la construcción	1
1.2 Limitaciones del concreto convencional	1
1.3 Características técnicas y ventajas del UHPC	1
1.4 Importancia del incremento en la demanda de los UHPC	1
1.5 Necesidad de materiales avanzados de menor densidad	2
1.6 Concreto ligero	2
1.7 Desarrollo del L-UHPC.....	2
1.8 Relevancia arquitectónica y aplicaciones del UHPC y L-UHPC.....	3
1.9 Investigación reciente y oportunidad de desarrollo.....	4
1.10 Enfoque del presente trabajo	4
Capítulo 2. Contexto del problema	5
2.1 Tendencias actuales en la arquitectura e ingeniería.	5
2.2 Demanda UHPC para fachadas arquitectónicas.	5
2.3 UHPC comerciales.	6
2.4 Concretos ligeros comerciales.....	7
2.5 Motivos para realizar la investigación.	7
2.6 Limitaciones de la literatura sobre L-UHPC	8
Capítulo 3. Antecedentes y definición del problema.	9
3.1 Antecedentes	9
3.1.1 Ultra High Performance Concrete	9

3.1.2	Concreto Ligero.....	9
3.1.3	Lightweight UHPC (L-UHPC).....	10
3.1.4	Vacíos en la investigación.....	11
3.2	Definición del problema.....	12
3.3	Marco teórico	13
3.3.1	Concretos convencionales	13
3.3.2	Concretos ligeros.....	14
3.3.3	Agregados ligeros.....	14
3.3.4	Zona de transición interfacial (ITZ)	14
3.3.5	Concretos de Ultra-Alto Comportamiento (UHPC).....	14
3.3.6	Modelos de empaquetamiento.....	14
3.3.7	Tipo de cemento empleado y puzolanas	15
3.3.8	Aditivos reductores de agua de Alto Rango/ Superplastificantes.	16
3.5.7	Uso de fibras de acero y sintéticas en el UHPC.	16
3.5.8	Pruebas de durabilidad.	16
3.5.9	Resistividad eléctrica.....	17
3.5.10	Conductividad térmica	17
Capítulo 4.	Justificación.....	19
Capítulo 5.	Hipótesis y Objetivos	21
Capítulo 7.	Metodología Experimental	22
7.1	Etapa 1. Caracterización de los materiales y compatibilidad de los aditivos superfluidificantes comercialmente disponibles.	22
7.1.1	Cementantes	22
7.1.2	Agregados.....	23
7.1.3	Aditivos	23

7.2	Etapa 2. Obtención de la relación agua/cemento óptima.	26
7.3	Etapa 3. Porcentaje óptimo de puzolanas.	27
7.4	Etapa 4. Proporciones de agregados y evaluación en estado fresco.	28
7.5	Etapa 5. Evaluación de los niveles de densidad.	31
7.6	Etapa 6. Evaluación de diferentes dosificaciones de fibra sintética (PVA)	33
7.7	Etapa 7. Pruebas de durabilidad y de conductividad térmica.	36
Capítulo 8. Resultados y análisis.		40
8.1	Etapa 1. Caracterización de los materiales a emplear	40
8.2	Etapa 2. Obtención de la relación a/c óptima.	49
8.3	Obtención del porcentaje óptimo de sustitución de MK por cemento.	50
8.4	Proporciones de agregados y evaluación en estado fresco.	52
8.5	Evaluación de los niveles de densidad.	61
8.6	Evaluación de diferentes dosificaciones de fibra sintética (PVA)	66
8.7	Pruebas de durabilidad y de conductividad térmica.	74
Capítulo 9. Conclusiones.		86
Capítulo 10. Referencias bibliográficas		89

Índice de Tablas

Tabla 1. Recopilación de trabajos en el ámbito del UHPC ligero y térmico [12].....	10
Tabla 2. Clasificación de los concretos ligeros convencionales, de alto y ultra-alto comportamiento.	11
Tabla 3. Caracterización de los cementantes.	23
Tabla 4. Caracterización de agregados.....	23
Tabla 5. Protocolo de mezclado para la fabricación de pastas de cemento.	25
Tabla 6. Procedimiento de mezclado para producir mortero.	27
Tabla 7. Procedimiento de mezclado para producir el UHPC-	29
Tabla 8. Diferentes porcentajes de agregado ligero y de peso normal para adecuar la densidad objetivo.....	32
Tabla 9. Caracterización física de los cementantes y aditivos.	40
Tabla 10. Composición química de los cementantes.	42
Tabla 11. Procedimiento de mezclado para pastas.....	45
Tabla 12. Resumen de los puntos de saturación con diferentes dosis y relaciones a/c para el CPC.	45
Tabla 13. Resumen de los puntos de saturación con diferentes dosis para una relación a/c = 0.22 para el CP Tipo II.	48
Tabla 14. Valores de resistencia a la compresión con diferentes relaciones a/c para el CPC.....	49
Tabla 15. Valores de resistencia a la compresión para una relación a/c = 0.22 para el CP Tipo II.	50
Tabla 16. Resultados de las diferentes sustituciones de MK por CPC.	51
Tabla 17. Resultados de la sustitución del 15% de MK por CP Tipo II.	52
Tabla 18. Comparativa de los D10, D50 y D90 requeridos para las curvas objetivo y los valores obtenidos con las combinaciones de arena para el CPC.	53
Tabla 19. Comparativa de los D10, D50 y D90 requeridos para las curvas objetivo y los valores obtenidos con las combinaciones de arena para el CP Tipo II.	54
Tabla 20. Resultados de la comparativa de agregados calizos vs calcita.....	56
Tabla 21. Valores de flujo de revenimiento y T50 para el CPC.	57
Tabla 22. Valores de flujo de revenimiento y T50 para el CP Tipo II.	58

Tabla 23. Resistencia a la compresión en cubos de 100x100 mm para todas las sustituciones de EPP para el CPC.....	61
Tabla 24. Valores del módulo de elasticidad para las diferentes mezclas a 56 días para el CPC..	63
Tabla 25. Resistencia a la compresión en cubos de 100x100 mm para todas las sustituciones de EPP para el CP Tipo II.	64
Tabla 26. Valores del módulo de elasticidad para las diferentes mezclas a 56 días para el CP Tipo II.	65
Tabla 27. Comparativa de diferentes puntos de la gráfica en diferentes reemplazos de EPP para el CPC.	67
Tabla 28. Comparativa de diferentes puntos de la gráfica en diferentes reemplazos de EPP para el CP Tipo II.....	69
Tabla 29. Resultados de la influencia las diferentes dosis de fibra para las mezclas con CPC.	72
Tabla 30. Resultados de la influencia las diferentes dosis de fibra para las mezclas con CP Tipo II.	73
Tabla 31. Rangos para la resistividad eléctrica superficial de acuerdo con AASHTO T 358 [x]..	74
Tabla 32. Rangos para la resistividad de acuerdo con ASTM C1876 (AASHTO TP 95, 2014) [x].	74
Tabla 33. Análisis de los valores y desviación estándar de los resultados de resistividad superficial para el CPC.....	75
Tabla 34. Análisis de los valores y desviación estándar de los resultados de resistividad bruta para el CPC.	76
Tabla 35. Análisis de los valores y desviación estándar de los resultados de resistividad superficial para el CP Tipo II.	77
Tabla 36. Análisis de los valores y desviación estándar de los resultados de resistividad bruta para el CP Tipo II.	78
Tabla 37. Penetrabilidad del Ion Cloro basado en la carga que pasa [ASTM C1202].....	80
Tabla 38. Resultados y análisis de la prueba RCPT para todas las mezclas con CPC.....	80
Tabla 39. Resultados y análisis de la prueba RCPT para todas las mezclas con CP Tipo II.	81
Tabla 40. Valores de densidad, conductividad y resistencia térmicas a 7 días para el CPC.....	82
Tabla 41. Valores de densidad, VPU, conductividad y resistencia térmicas a 28 días para el CPC.	82

Tabla 42. Valores de densidad, VPU, conductividad y resistencia térmica a 28 días para el CP Tipo II.84

Índice de Figuras

Figura 1. Crecimiento del mercado global de los UHPC desde 2026 hasta 2035 [7].	2
Figura 2. Ejemplos de aplicaciones arquitectónicas con elementos fabricados de UHPC [21-27].	4
Figura 3. Ejemplo de la mejora en la matriz y en la calidad del acabado superficial del UHPC vs Concreto convencional [36].	6
Figura 4. Número de artículos relacionados con UHPC publicados desde 1990 hasta 2020 [14].	9
Figura 5. Diagrama representativo de las etapas que abarcan la metodología experimental.	22
Figura 6. Gráfico ilustrativo para la obtención de los puntos de saturación.	25
Figura 7. Batidora UNIVEX utilizada para la fabricación de pastas y morteros.	25
Figura 8. Cubos fabricados y ensayados con CPC.	26
Figura 9. Cubos fabricados con 15% de sustitución del a) CPC y del b) CP Tipo II.	28
Figura 10. Cubos ensayados mostrando falla típica tipo reloj con a) CPC y b) CP Tipo II.	28
Figura 11. Prueba de Flujo de Revenimiento para a) CPC y b) CP Tipo II.	30
Figura 12. Ensaye de cubos de 100 x 100 mm para a) CPC y b) CP Tipo II.	31
Figura 13. Colado de la pasta de cabeceo con relación a/c = 0.20.	31
Figura 14. Determinación del módulo de elasticidad mediante un micrómetro y ensaye a la compresión.	33
Figura 15. Dosificación de fibra y fabricación de los prismas de 75 x 75 x 300 mm.	33
Figura 16. Curado y montaje de las vigas con la instrumentalización para la adquisición de datos.	34
Figura 17. Colado y desmolde de las placas de 60 x 20 x 10 cm.	35
Figura 18. Perforación y colocación de la resina epóxica y anclajes en las placas.	35
Figura 19. Secuencia de pasos para el ensaye a la extracción de los anclajes post-instalados, 1) instalación del anclaje, 2) colocación del cople, 3) posicionamiento de la placa de contrapresión, 4) nivelación de la placa, 5) colocación del aditamento para ensamblar el gato, 6) extracción del anclaje, 7 y 8) ejemplos de fallas de los anclajes.	36
Figura 20. Diagrama de la medición de resistividad y conductividad térmica con y sin fibras.	37
Figura 21. Resistividad eléctrica bruta (Bulk).	38
Figura 22. Pastillas cortadas de 50x100 mm para la prueba de RCPT.	38
Figura 23. Prueba de conductividad térmica.	39

Figura 24. DTP realizado a los materiales cementantes.....	40
Figura 25. Prueba de densidad al Cemento Blanco y MK.	41
Figura 26. Densidad y contenido de sólidos del aditivo.	41
Figura 27. Difractograma mostrando las señales de los compuestos principales del del CPC 30R B.	42
Figura 28. Difractograma mostrando las señales de los compuestos principales del MK.	42
Figura 29. Micrografías con SEM del CPC 30R B (a) y b)) y MK (c) y d)) anhidros con magnificaciones de 500X y 1000X.	44
Figura 30. Micrografías de la EPP con magnificaciones de 25X y 100X [96].	44
Figura 31. Fabricación de pastas para evaluar el punto de saturación.	45
Figura 32. Punto de saturación de los 4 aditivos para un CPC 30R B a) para una relación a/c = 0.22, b) para una relación a/c = 0.25 y c) para una relación a/c = 0.28.....	47
Figura 33. Punto de saturación de los 4 aditivos para un CP Tipo II para una relación a/c = 0.22.	48
Figura 34. Resultados de resistencia a la compresión del CPC 30R B para diferentes relaciones a/c.	49
Figura 35. Resultados de resistencia a la compresión del CP Tipo II con relación a/c = 0.22.	50
Figura 36. Resultados de resistencia a la compresión de los diferentes porcentajes de sustitución de MK.	51
Figura 37. Resultados de resistencia a la compresión del CP Tipo II para una sustitución de 15% de MK.....	52
Figura 38. Comparativas de diferentes granulometrías obtenidas y la objetivo	54
Figura 39. Granulometría final optimizada con $q = 0.25$ para el cemento gris.....	55
Figura 40. Diversas iteraciones para la adecuación de la mezcla definitiva.	55
Figura 41. Comparativa entre agregados de calcita y caliza.	56
Figura 42, Influencia de la adición de EPP en el flujo de revenimiento y el T50 para el CPC.	58
Figura 43. Influencia de la adición de EPP en el flujo de revenimiento y T50 para el CP Tipo II.	58
Figura 44. Incremento de la dosis de aditivo con respecto a la dosificación de fibra para el CPC.	59

Figura 45. Correlación entre la cantidad de fibra y la cantidad de EPP para todas las mezclas con CPC.	60
Figura 46. Incremento de la dosis de aditivo con respecto a la dosificación de fibra para el CP Tipo II.	60
Figura 47. Correlación entre la cantidad de fibra y la cantidad de EPP para todas las mezclas con CP Tipo II.	61
Figura 48. Evaluación de diferentes porcentajes de EPP en la resistencia a la compresión.	62
Figura 49. Evolución de la resistencia a la compresión con el CPC.	63
Figura 50. Efecto de la adición de EPP en la RC y ME para el CPC.	64
Figura 51. Evolución de la resistencia a la compresión con el CP Tipo II.	65
Figura 52. Efecto de la adición de EPP en la RC y ME para el CP Tipo II.	66
Figura 53. Falla típica de una viga ranurada al centro del claro.	67
Figura 54. Resultados de la prueba de carga vs CMOD para las diferentes sustituciones de EPP para el CPC.	68
Figura 55. Resultados de la prueba de carga vs CMOD para las diferentes sustituciones de EPP para el CP Tipo II.	71
Figura 56. Influencia de la resistencia al anclaje con diferentes dosificaciones de fibra de PVA para el CPC.	72
Figura 57. Influencia de la resistencia al anclaje con diferentes dosificaciones de fibra de PVA para el CP Tipo II.	74
Figura 58. Resistividad eléctrica superficial para un CPC 30R B.	76
Figura 59. Resistividad Eléctrica Bruta para un CPC 30R B.	77
Figura 60. Resistividad Eléctrica Superficial para un CP Tipo II.	78
Figura 61. Resistividad Eléctrica Bruta para un CP Tipo II.	79
Figura 62. Valores de permeabilidad al ion cloro para el CPC a) todas las clasificaciones, b) enfoque en la clase más baja.	80
Figura 63. Valores de permeabilidad al ion cloro para el CP Tipo II a) todas las clasificaciones, b) enfoque en la clase más baja	81
Figura 64. Conductividad térmica para un concreto con y sin fibras con CPC 30R B.	83
Figura 65. Influencia de la densidad en la conductividad térmica y en la Velocidad de Pulso Ultrasónico para el CPC.	83

Figura 66. Correlación entre el VPU y la conductividad térmica para el CPC.....84

Figura 67. Influencia de la densidad en el coeficiente de conductividad térmica CP Tipo II.....85

Figura 68. Influencia de la densidad en el coeficiente de conductividad térmica y VPU.....85

Figura 69. Correlación entre el VPU y el coeficiente de conductividad térmica.....86

Figura 70. Correlación del VPU con el coeficiente de conductividad térmica para el CPC y el CP Tipo II.....86

Capítulo 1. Introducción

1.1 Panorama general de la construcción

La industria de la construcción ha evolucionado constantemente mediante nuevas técnicas y materiales para optimizar procesos y recursos. Dentro de este panorama, el concreto se ha consolidado como el material más utilizado por sus características de resistencia, durabilidad y versatilidad, lo que ha motivado a la comunidad científica a buscar su perfeccionamiento.

En consecuencia, diversas investigaciones tienen la finalidad de llevar estas mejoras al ámbito práctico, desarrollando productos y materiales que contribuyan a resolver las necesidades de la sociedad actual. En este sentido, el concreto, gracias a sus propiedades de resistencia y durabilidad, se ha consolidado como uno de los materiales más aplicados y competitivos en la construcción [1].

1.2 Limitaciones del concreto convencional

Sin embargo, las demandas actuales requieren concretos con propiedades superiores a las del convencional. El uso de un concreto tradicional presenta limitantes ante el crecimiento de proyectos con mayores demandas como altura y esbeltez. Para responder a estas exigencias surge el Concreto de Ultra-Alto Comportamiento (*Ultra-High Performance Concrete* en el idioma inglés, también conocido como *UHPC*), un material que ha despertado el interés de la industria y la investigación. El UHPC puede satisfacer problemáticas relacionadas con la fabricación de elementos esbeltos, la necesidad de alta durabilidad y una vida útil mayor a 100 años [1, 2]. Además, proporciona ductilidad post-agrietamiento gracias a la incorporación de fibras, principalmente de acero [3,4].

1.3 Características técnicas y ventajas del UHPC

Este compuesto cementicio se distingue por sus propiedades mecánicas superiores tanto a los concretos convencionales como a los de alto desempeño (*High Performance Concrete*), alcanzando resistencias a la compresión de al menos 120 MPa a los 28 días y hasta 150 MPa bajo curado con vapor, además de resistencias a la tensión mayores a 5 MPa [2,4]. Dichas características consolidan al UHPC como un material único dentro de los compuestos cementicios, capaz de superar las limitaciones de los concretos tradicionales y abrir nuevas posibilidades en diseño estructural y arquitectónico.

Además de sus altas resistencias, entre las características técnicas más relevantes de los UHPC se destacan las bajas relaciones agua/cementante (0.15 - 0.25), alto empaquetamiento de la matriz (0.825–0.855) y altos volúmenes de fibra de acero ($\geq 2\%$), así como una elevada fluidez por el uso de aditivos reductores de agua de alto rango o superplastificantes, alcanzando valores de flujos de revenimiento entre 475 y 780 mm [5, 43].

1.4 Importancia del incremento en la demanda de los UHPC

Debido a las excelentes características de estos concretos, el UHPC es el material para la siguiente generación, es por ello, que la demanda global es impulsada principalmente para su uso en aplicaciones de alto comportamiento, puentes, carreteras, etc., y con base en ello, la industrialización emplee y aumente la demanda de los UHPC de manera constante hasta el 2035 [6].

El mercado mundial del UHPC se ha estimado en 456.86 millones de USD en 2025, siendo que se estima que para el 2026 llegue a un valor de 486.53 millones de USD y de 763.83 millones de USD para el 2034. Se espera que la tasa de crecimiento anual compuesto (CAGR por sus siglas en inglés) sea aproximadamente del 6.4%, ya que van estimaciones que dan valores entre 5.8 y 6.8% global [6, 7, 8].

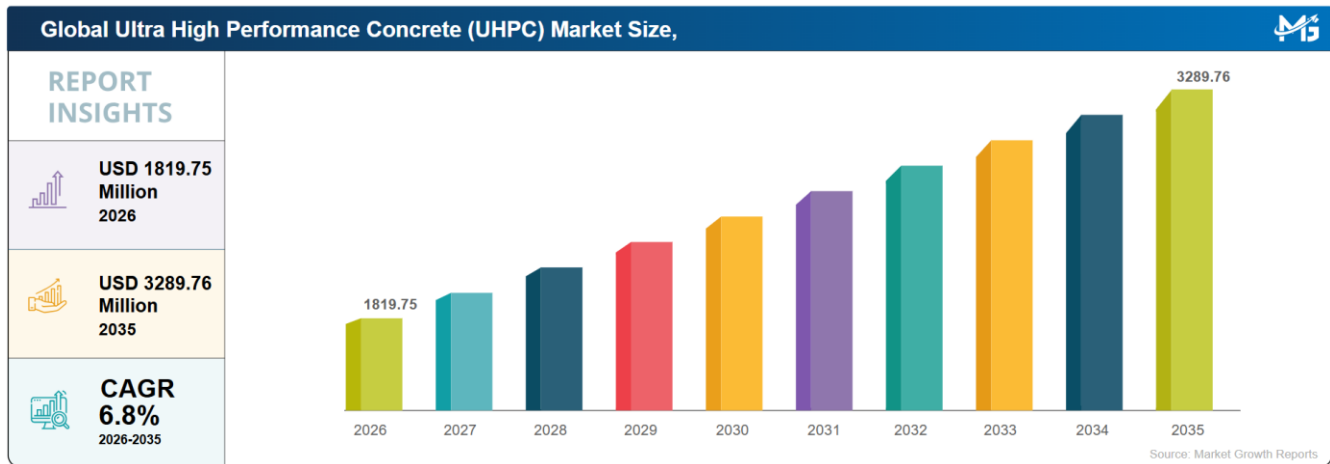


Figura 1. Crecimiento del mercado global de los UHPC desde 2026 hasta 2035 [7].

1.5 Necesidad de materiales avanzados de menor densidad

No obstante, a pesar de sus diversas ventajas, el UHPC presenta un desafío importante, el cual es su elevada densidad que puede comúnmente ronda entre valores de 2400 a 2800 kg/m³ [1]. Estos aspectos limitan sus aplicaciones en elementos arquitectónicos donde la reducción de peso es esencial que permita mejorar la eficiencia constructiva, disminuir cargas por peso propio en estructuras existentes, facilitar los procesos de fabricación y montaje, así como disminuir la conductividad térmica. Por este motivo, se ha intensificado la búsqueda de diversas alternativas que permitan conservar los beneficios mecánicos y de durabilidad del UHPC con menor peso, de esta manera, se impulsa el estudio de concretos de ultra alto comportamiento con menores densidades.

1.6 Concreto ligero

Por otro lado, el concreto ligero es un material con características diferentes a las de un concreto convencional y las de un UHPC. Sus aplicaciones principales van desde recubrimientos, paneles y fachadas de muros hasta elementos estructurales, con la finalidad de reducir el peso de las estructuras además de obtener propiedades aislantes térmicas y acústicas, incluso puede mejorar la resistencia al fuego [9]. Sin embargo, debido al uso de agregados ligeros y/o aditivos espumantes o inclusores de aire, los concretos ligeros pueden disminuir su resistencia a la compresión e incluso su durabilidad, limitando su uso estructural.

1.7 Desarrollo del L-UHPC

No obstante, las limitaciones del concreto ligero han impulsado la propuesta de combinarlo con matrices de UHPC. De esta manera surgen los Concretos de Ultra-Alto Comportamiento Ligeros (*Lightweight Ultra-High Performance Concrete* en el idioma inglés, también conocido como *L-UHPC*), una propuesta innovadora y atractiva que combina las propiedades mecánicas de un UHPC con los beneficios que brinda la incorporación de agregados ligeros para obtener propiedades mejoradas. De este modo,

mantienen características como un alto empaquetamiento de la matriz y baja relación agua/cementante (≤ 0.25) lo que permite conservar las propiedades de durabilidad incluso con la disminución de la resistencia y generar nuevas aplicaciones como las arquitectónicas [44]. A pesar de la escasa bibliografía al respecto, los rangos comparables de densidad para un L-UHPC se encuentran entre 1500-2000 kg/m³ [10, 11].

En los L-UHPC, la sustitución de agregado ligero por agregado de peso normal es un aspecto fundamental. Entre los materiales más utilizados se encuentra la arcilla expandida, esferas de vidrio expandidas, microesferas de ceniza volante y perlita expandida de poliestireno (EPP) [12]. En cuanto al refuerzo, existen diferentes fibras usadas en los UHPC convencionales, las más comunes suelen ser de acero debido a sus propiedades de resistencia a la tensión que proporciona gran ductilidad [13, 14], sin embargo, otras fibras como Polivinilo Alcohol (PVA), Vidrio, Polietileno (PE) y Polipropileno (PP) también son usadas [13, 14, 15, 16, 17]. A pesar de los avances, aún no hay consenso en parámetros estándar de L-UHPC, lo que abre una importante oportunidad de investigación y aplicación práctica.

1.8 Relevancia arquitectónica y aplicaciones del UHPC y L-UHPC

En este sentido, proyectos alrededor del mundo han buscado emplear aspectos de durabilidad en los edificios, con la finalidad de que se reduzcan los costos de mantenimiento, así como brindar una mayor durabilidad y vida útil a la estructura, además de mejorar la eficiencia en la construcción. Por ello, los UHPC se implementan en elementos que requieren alta durabilidad además de resistencia [14, 18].

Las principales aplicaciones de los UHPC van desde componentes de edificios, puentes, elementos arquitectónicos, reparación y rehabilitación, así como componentes verticales para torres eólicas. Sin embargo, los usos y aplicaciones no están limitadas, sino que también pueden incluir reforzamiento estructural, modernización, elementos prefabricados y otras aplicaciones únicas [19].

Las características superiores del UHPC permiten un diseño y fabricación de componentes de edificios esbeltos, ligeros y atractivamente estéticos. Entre las obras más representativas se encuentran el museo de las Civilizaciones Europeas y Mediterráneas, el cual, es el primer edificio con amplio uso del UHPC, construido en Marsella, Francia en 2013 [2], así como el estadio Jean Bouin en París que cuenta con una cubierta de paneles de 11,000 m² en los laterales y 10,000 m² en el techo de Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) [20].

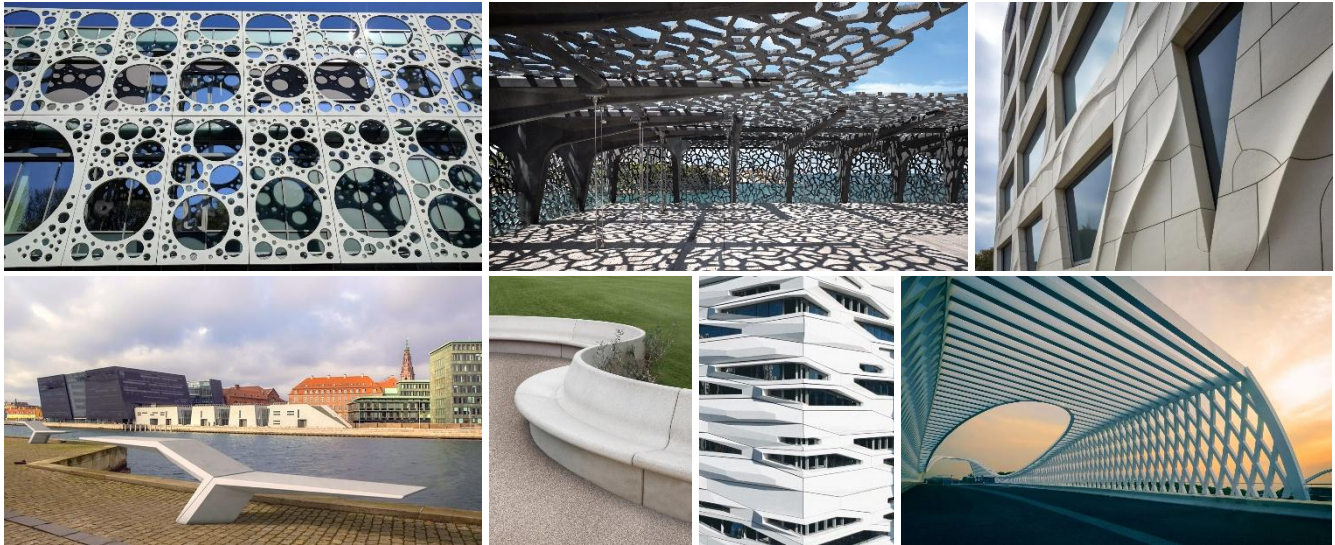


Figura 2. Ejemplos de aplicaciones arquitectónicas con elementos fabricados de UHPC [21-27].

1.9 Investigación reciente y oportunidad de desarrollo

Diversos autores han trabajado en el desarrollo de L-UHPC con objetivos específicos, como el empleo de agregados ligeros locales para reducir costos [28] o la mejora del coeficiente de conductividad térmica [12]. Estos estudios reflejan el interés creciente por adaptar el UHPC a condiciones regionales y aplicaciones arquitectónicas específicas.

1.10 Enfoque del presente trabajo

Con base en lo anterior, este trabajo se enfoca en el desarrollo de un UHPC con la incorporación de microperlita Expandida de Poliestireno (EPP) como agregado ligero, con el propósito de disminuir la densidad de los elementos arquitectónicos sin comprometer su durabilidad y resistencia mínima estructural, así como mejorar su conductividad térmica y facilitar diseños más ligeros y eficientes [29]. Esta propuesta responde a la necesidad de fabricar elementos arquitectónicos, en particular fachadas, que no siempre requieren resistencias superiores a 120 MPa, pero sí alta durabilidad, ductilidad y fluidez en estado fresco.

En el presente documento se plantean cuatro series de mezclas a partir de una mezcla de referencia (MR) con diferentes porcentajes de sustitución en masa (30, 55, 80 y 100 %) de agregado de peso normal por agregado ligero (EPP), obteniendo 5 mezclas por tipo de cemento, un total de 10 mezclas finales, las cuales fueron evaluadas mediante pruebas en estado fresco, endurecido y de durabilidad, con el fin de analizar el comportamiento de la sustitución del agregado ligero dentro de la matriz de UHPC.

Capítulo 2. Contexto del problema

2.1 Tendencias actuales en la arquitectura e ingeniería.

Con la mejora en los procesos constructivos, materiales como el concreto han tenido un incremento en la versatilidad de aplicaciones, satisfaciendo necesidades como altas resistencias, gran durabilidad y resistencia a los ataques químicos y del medio ambiente, antibacterianos, etc. Del mismo modo, se han desarrollado productos como prefabricados estructurales como vigas o sistemas de losa y arquitectónicos como elementos para fachadas.

La industria en países como China, Francia y Canadá ha implementado cada vez más el uso de cemento blanco para obtener colores específicos y brindar acabados aparentes mediante cimbras de acero, obteniendo una atracción visual mayor, esto debido a los diversos proyectos para el 2023, 2028 y 2030 que tienen los gobiernos desarrollados para mejorar la infraestructura del país y con ello el atractivo visual de las construcciones [30].

Uno de los principales motivos por los cuales se ha empezado a adoptar los UHPC en proyectos de infraestructura es el crecimiento de regiones que priorizan la durabilidad y sostenibilidad a largo plazo, por ello, es uno de los materiales que será cada vez más empleado gracias a sus diversas ventajas y así, volverlo más asequible a nivel local [31, 32].

Por tal motivo, las tendencias mencionadas han elevado la demanda de materiales con mayor desempeño, enfocándose en durabilidad, aspecto visual y una mejora en la reducción de peso.

2.2 Demanda UHPC para fachadas arquitectónicas.

Aumento del desarrollo de concretos de UHPC (contexto).

El Consejo de Edificios Altos y Hábitat Urbano (*Council on Tall Buildings and Urban Habitat* o CTBUH, por sus siglas en inglés) en su publicación de la revisión anual del 2018, muestra el gran desarrollo de edificios altos del año en todo el mundo. En ese año, se construyeron 18 edificios super altos (más de 300m de altura). Así mismo, la cantidad de edificios altos completados en América del Norte fue de 16, generando una tendencia en cuestión al crecimiento de la construcción que demandan nuevas tecnologías aplicadas a las características de concreto [33].

En México, la demanda de edificios de gran altura ha sido una tendencia desde el 2015 debido a que 9 de los 11 edificios más altos de México (mayores de 200 m) se han construido desde ese año hasta la fecha [34], brindando oportunidades al crecimiento poblacional, lo cual va de la mano con consumos elevados de materiales de construcción como el concreto en un solo edificio.

El tamaño de los sistemas de fachadas fue valuado en \$283.13 mil millones de dólares en 2022 y se espera que incremente hasta \$505.79 mil millones de dólares en 2030, exhibiendo una tasa compuesta de crecimiento anual de 7.7% desde el 2023 hasta el 2030 [35].

Los diseñadores están implementando diseños y estructuras innovadoras que requieren el uso de tecnologías adecuadas para estas aplicaciones, y es gracias a los UHPC que cuentan con propiedades mecánicas superiores y acabados dinámicos que estas estructuras son posibles [8]. Así mismo, los dueños y propietarios de los edificios se han centrado en dar a sus estructuras mayor énfasis en identidades distintas a través de la parte estética.

Durante la última década, ha ganado popularidad un mayor énfasis en estructuras de construcción ligeras y de alto comportamiento. Con ello, los diseñadores han empleado al UHPC como el material por excelencia para crear fachadas que sean estéticamente agradables y funcionales. Se espera que esta tendencia continúe durante los próximos 10 años y esto a su vez, impulse el crecimiento del mercado del UHPC [6, 7 y 8].

Así mismo, el concreto no solo busca satisfacer más necesidades como el atractivo visual mediante fachadas arquitectónicas, sino también aspectos como la durabilidad que permita mantener cualquier estructura ante diversos ataques sin daños considerables y que requiera un mínimo mantenimiento, sin la necesidad de llegar a una restauración completa como ha tenido que pasar con edificios que se vuelven patrimonio de la humanidad y que requieren cuidados extremos.

Esto ha permitido que el concreto tenga que cumplir una nueva demanda, en donde se ven involucradas las propiedades mecánicas del concreto y la versatilidad de adaptarse para generar una fachada interesante y atractiva a los usuarios, siendo así, los edificios de gran altura, algunos de las principales construcciones que involucran este tipo de enfoque en la infraestructura.

De esta manera, las necesidades han impulsado el desarrollo de materiales especializados como el UHPC, cuya presencia aumenta significativamente en el mercado internacional.



Figura 3. Ejemplo de la mejora en la matriz y en la calidad del acabado superficial del UHPC vs Concreto convencional [36].

2.3 UHPC comerciales.

Existen diversas empresas en el mundo que cuentan con UHPC en sus productos como Lafarge Holcim con su producto *Ductal* y DURA' Technology Sdn Bhd con *DURA*, lo cual es tendencia en los últimos desarrollos de éstas, volviéndolo un producto comercialmente aceptable y que cada día tiene mayor aplicación en los proyectos y demanda por los clientes.

En México empresas como Cemex y Holcim, las cuales tienen aproximadamente el 70% del mercado nacional [37, 38], cuentan con concretos de alta resistencia, que pueden llegar a tener resistencias entre 40 y 70 MPa a 28 días, no cuentan con un producto como lo sería un UHPC en su catálogo de opciones a nivel nacional [39, 40].

Lo anterior, evidencia de manera importante la ausencia de un producto como lo sería el UHPC accesible en el mercado nacional, lo cual, limita su uso en aplicaciones arquitectónicas avanzadas. Esto conlleva a tener una barrera en la adopción y desarrollo de tecnologías alrededor del mundo para comercializarlo de manera local en el país.

2.4 Concretos ligeros comerciales.

De la misma manera, existen concretos disponibles en el mercado que son aligerantes, sin embargo, no cuentan con resistencias estructurales y suelen ser usados solamente como rellenos para muros o cubiertas en losas [39, 40]. Algunos de los materiales empleados comercialmente para aligerar el concreto o mortero son la espuma preformada y la perlita expandida de poliestireno, debido a que los agregados ligeros de origen natural pueden tener una mayor variación en sus características.

La implementación de perlita expandida de poliestireno suele ser en grandes dosificaciones y el tamaño empleado suele ser irregular, además de tener diámetros promedio entre 3 y 5 mm, lo cual representa problemas al momento de la obtención de la resistencia a la compresión debido a las grandes cantidades de perlita y tamaño [16].

Con ello, diversas investigaciones han propuesto la búsqueda de nuevos concretos ligeros con mejor desempeño mecánico y de durabilidad, lo que promueve el desarrollo de materiales que contengan estas propiedades.

2.5 Motivos para realizar la investigación.

Con base en las nuevas demandas de productos que satisfagan las necesidades de un mundo cambiante, concretos que puedan tener una combinación de propiedades mecánicas y arquitectónicas, así como obtener propiedades de durabilidad, representa una alternativa hacia las empresas y los clientes que están en busca de características específicas.

Así mismo, proyectos de gran complejidad son realizados con mayor frecuencia en los últimos años, por lo que llevar a cabo un producto que tenga diversas propiedades que englobe el área ingenieril y arquitectónica, tiene mayor versatilidad de aplicaciones en los nuevos proyectos.

El UHPC es un material que cuenta con grandes características en estado fresco y endurecido, por lo que es una alternativa para elementos que serán desarrollados arquitectónicamente retadores y atractivos. Sin embargo, no todos los concretos deberán tener una densidad convencional de 2400 kg/m^3 , si están enfocados en el aspecto arquitectónico y de durabilidad, manteniendo una resistencia mínima estructural (17 MPa) [41] para fines adecuados al proyecto y al lugar donde se encuentre el elemento y/o fachada.

Otro aspecto importante, es la implementación de estos productos como fachadas arquitectónicas, que pueden proporcionar aislamiento térmico y el ahorro energético resultaría con un alto beneficio por utilizar materiales con bajos coeficientes térmicos.

La evaluación de dos tipos de cementos, da lugar a la obtención de datos para la comparativa entre sus propiedades de durabilidad en cuanto a la diferencia de composición química, así como la compatibilidad que puede tener con los aditivos base policarboxilatos, por ello, se plantea que el Cemento Blanco (CPC 30R B) puede permitir el desarrollo de un UHPC manteniendo todas las características de este concreto, debido a su baja relación agua/cementante y al alto nivel de empaquetamiento dentro de la matriz, esto ayuda a reducir la porosidad y disminuir la permeabilidad que pueda tener ante cualquier agente externo, así mismo, a pesar de ser un cemento clase 30, su resistencia no será inconveniente debido a que se buscará la mayor resistencia posible garantizando las propiedades de durabilidad.

Estos son algunos motivos por los cuales el tema presenta ventajas técnicas dentro del área del concreto, en donde se pueden ver los diferentes beneficios y ahorros de material, tiempo y recursos económicos debido a la versatilidad de la densidad, la durabilidad y la resistencia que pueden ofrecer estos productos.

A pesar de los diversos avances en los materiales como el UHPC y los concretos ligeros, aún existe una brecha importante en diversas soluciones que brinden ligereza, alta durabilidad y desempeño estructural.

2.6 Limitaciones de la literatura sobre L-UHPC

Debido a que el UHPC es un material que ha empezado a crecer en su desarrollo en los últimos años, existe escasa bibliografía acerca de los L-UHPC, esto debido a que el enfoque principal ha sido resistencia y durabilidad, sin embargo, con la implementación hacia aplicaciones arquitectónicas, el enfoque ha cambiado y tiene una alta importancia para complementar otras características en estos concretos.

Así mismo, existe la falta de parámetros que deben cumplir o tener estos concretos, ya que el mercado es limitado, por lo que su producción ha sido muy específica y aún no se encuentra un número robusto de información al respecto que pueda ayudar a garantizar las propiedades del material.

La poca disponibilidad de bibliografía genera que no se tengan tampoco valores o rangos de densidades para la versatilidad de aplicaciones que se pueden tener, esto impacta en que solo se busca una densidad convencional y no generar un material que tenga características que puedan dar mayor beneficio como la disminución del peso unitario y conductividad, que generará beneficios como facilidad en el montaje, transporte y confort térmico.

Al mismo tiempo, la implementación de la EPP como una sustitución de agregado ligero por agregado de peso normal es de suma importancia, para empezar el empleo de otro tipo de agregados, ya que no en todas las zonas se pueden encontrar agregados naturales, así como las desventajas que estos tienen, por ello, su implementación en estos concretos, toma mayor importancia para generar un producto que pueda estar al alcance y disponibilidad de las necesidades de la sociedad.

Con base en lo anterior, el realizar un estudio y análisis para generar información al respecto del uso de este tipo de agregado en los L-UHPC, tiene impacto en el conocimiento que se puede generar en México, ayudando a la implementación y que en menos tiempo el país pueda adaptar este tipo de tecnologías.

Anteriormente, el desarrollo de concretos con bajas relaciones agua/cemento era limitado y muy específico debido a los materiales que se podían utilizar, sin embargo, estudiar diferentes cementos, así como diferentes materiales como aditivos y fibras, ayuda a poder tener información de valor en la actualidad, y como estos materiales han cambiado sus fórmulas o composiciones principales para que tengan diversidad e implementación y no sean de uso único o específico.

El estudio presente no solo está enfocado en lo anterior, sino también, en la producción y obtención de conocimiento en estudios que integren pruebas de tenacidad, durabilidad y conductividad térmica, ya que algunos estudios no se han enfocado en todas las propiedades antes mencionadas, por lo que hacer un estudio que abarque toda esta gama de pruebas, tiene un aporte importante a la generación de conocimiento.

Capítulo 3. Antecedentes y definición del problema.

3.1 Antecedentes

3.1.1 Ultra High Performance Concrete

Los UHPC se desarrollaron después de la década de los ochenta, en donde la tecnología solo permitía fabricarlos en laboratorio y requería métodos especiales como mezcladoras y curados a vapor. Estos concretos tuvieron diversas intervenciones de diferentes investigaciones en donde lograron desarrollar resistencias entre 200 y 350 MPa, añadiendo diferentes materiales y fibras encontrando que se obtenían altos valores de ductilidad [1].

En la actualidad, los UHPC han tenido un gran desarrollo en los últimos años, tal es el incremento que a pesar de desarrollarse hace aproximadamente 30 años, los avances más significativos se han encontrado en literatura con menos de 6 años de ser publicada [1].

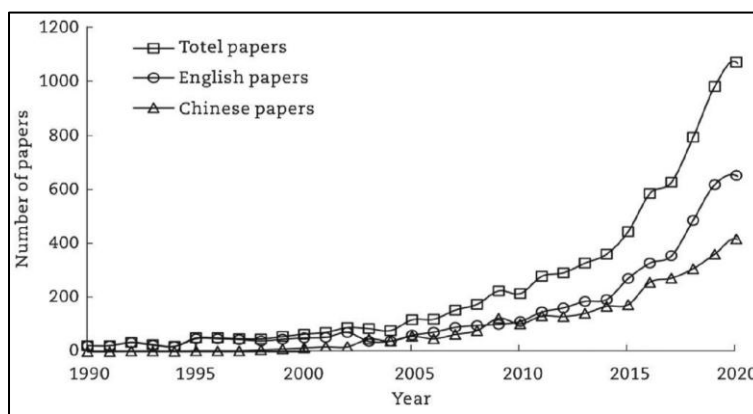


Figura 4. Número de artículos relacionados con UHPC publicados desde 1990 hasta 2020 [14].

Se espera que la creciente demanda genere nuevo conocimiento y con ello, el desarrollo local de este tipo de tecnologías, ya que los principales países que lideran su uso son EE. UU., China, India, Japón, Alemania, Francia, Emiratos Árabes Unidos (UAE) y Arabia Saudita. Se espera que los crecientes proyectos de infraestructura y construcción principalmente en EE. UU., China e India generen una importante oportunidad de expansión global para el mercado [7 y 8].

Se tiene contemplado que su segmentación del mercado va más allá de la especificación, puesto que, no solo se puede hablar del tipo de UHPC que se requiere, sino también de la aplicación, y esto genera importancia debido a que el ámbito de las aplicaciones toma mayor importancia y en este caso, el estudio tiene la finalidad de que la prescripción de estos concretos sea basada en su aplicación.

3.1.2 Concreto Ligero

El concreto ligero (LC) se puede clasificar de acuerdo con su densidad, en donde estos concretos que se pueden llamar desde el LC convencional, ultra ligero o infra ligero, el cual, es un material que cuenta con una densidad muy baja y satisface propiedades estructurales y de aislamiento térmico.

Lo más importante de los LC son los agregados, ya que de eso depende la densidad que puede tomar el material. Estos materiales pueden ser de origen natural, manufacturados de materiales naturales, manufacturados de subproductos o materiales reciclados que provienen de procesos industriales [9].

De igual manera, es importante clasificar en agregados de peso convencional o normal y agregados ligeros, por ello, su densidad se vuelve de suma importancia en la clasificación. La normativa ASTM n C330 y C331 indica valores límites de densidad volumétrica de 1120 kg/m³ y de 880 kg/m³ para el agregado fino y grueso respectivamente [9].

Con estos valores dados para el agregado, es posible generar un concreto ligero estructural, lo cual es indispensable superar los 17 MPa para poder cumplir con ese requisito. Por este motivo, la densidad de equilibrio no es menor a 1600 kg/m³ del concreto, para no disminuir demasiado la resistencia a la compresión con valores que van desde 17 hasta 28 MPa a 28 días [9].

Dentro de los materiales más comunes que se han utilizado han sido pedacería de madera o caucho, perlas de plástico o perlita expandida de poliestireno (EPP). Existen muchas posibilidades de implementación de diferentes agregados.

El ACI 213R – 14 especifica una resistencia a la compresión en cilindros que debe ser mayor a 17 MPa y debe cumplir con una densidad de equilibrio entre 1120 y 1920 kg/m³, esto generará un concreto lo suficientemente ligero para generar un impacto, y al mismo tiempo el mínimo [42].

3.1.3 Lightweight UHPC (L-UHPC)

Dixit et al. [12] han desarrollado un UHPC con Perlita Expandida de Poliestireno (EPP) con tamaños entre 3 y 5 mm con sustituciones en volumen de materiales secos por EPS de 0, 16, 25, 36 y 45%. El compuesto cementante desarrollado tiene una resistencia a la compresión de 46 MPa y una densidad de 1677 kg/m³.

La Tabla 1 muestra la comparativa de lo que se ha logrado en la literatura, esto involucra los diversos tipos de agregados ligeros empleados como cenoeferas de ceniza volante, perlita expandida (arcilla expandida), microesferas de vidrio, entre otros. Resaltando que se utilizan agregados de menor tamaño y que tienen un tamaño controlado para el beneficio del empaquetamiento además de que ningún agregado tiene absorción.

Tabla 1. Recopilación de trabajos en el ámbito del UHPC ligero y térmico [12].

Authors	Insulating/lightweight aggregate	Thermal Conductivity (W/m-K)	Density (kg/m ³)	28-days Compressive strength (MPa)
Brooks et al. (2018)	Fly-ash Cenospheres (FAC)	0.80–2.23	1396–2019	35.4–53.5
	Glass Microspheres (GM)	0.62–2.30	1344–2026	21.5–55.1
	Expanded Polystyrene (EPS)	0.71–2.50	1300–2084	12.4–43.6
Huang et al. (2018)	FAC and GM	0.18	940	41.0
Garbalinska & Strazalkowski (2018)	Sintered Fly-ash (FA)	0.80–1.35	1650–2160	11.6–42.7
	Expanded Clay (EC)	0.55–1.0	950–1270	4.2–20.5
Chung et al. (2018)	Glass Microspheres (GM)	0.24–0.30	800–950	17.0–23.0
Zeng et al. (2018)	Glass Microspheres (GM) and Aerogel	0.08–0.36	600–1250	4.0–27.5
Chung et al. (2017)	Crushed Glass (CG)	0.15–1.70	634.4–2076	7.5–36.0
Grabois et al. (2016)	Expanded Clay (EC)	1.05–1.50	1850–2000	31.7–37.0
Hanif et al. (2016)	Fly-ash Cenospheres (FAC) and Aerogel	0.32–0.41	1072–1201	18.6–23.5
Chung et al. (2016)	Aerogel	0.36–0.50	1250–1625	10.6–20.6
Wu et al. (2015)	Fly-ash Cenospheres (FAC)	0.28–1.98	966–2251	33.0–67.6
Lu et al. (2015)	Expanded Perlite (EP)	0.38–1.88	–	17.5–78.8
Wongkeo et al. (2012)	Fly-ash (FA) and Autoclaving	0.57–0.89	1457–1904	9.5–25.9
Wang and Meyer (2012)	Recycled high-impact polystyrene (HIPS)	0.27–0.61	1560–1980	20.0–37.0

De acuerdo con la revisión bibliográfica, el número de aplicaciones de los UHPC ha aumentado para satisfacer necesidades que antes eran complicadas de llevar a cabo y solo se podían con materiales de

forma independiente, es decir, su uso ha incrementado en diversas aplicaciones como soluciones arquitectónicas y prefabricadas [1, 12, 18, 29].

Con base en estas necesidades, la unión de características arquitectónicas a un UHPC además de agregados ligeros que tienen bajo costo, como la EPP, resulta en un producto interesante para el mercado nacional e internacional, debido a la aplicación del conocimiento en un material para obtener el máximo beneficio de sus propiedades y generar construcción sostenible en busca de las nuevas tendencias arquitectónicas.

3.1.4 Vacíos en la investigación

Existen dos conceptos que no se emplean juntos en el desarrollo de un concreto que son el empaquetamiento de los materiales en la matriz cementante y el otro es la reducción de la densidad de la matriz como sea permitido, esto se puede implementar para obtener una resistencia mayor a 80 MPa con una densidad menor a la de un concreto convencional y manteniendo los valores de durabilidad [46].

Diversos estudios [1, 29, 47] han intentado aprovechar las propiedades del UHPC en diversas aplicaciones gracias al incremento de sus propiedades mecánicas debido al empaquetamiento dentro de la matriz cementante. Los altos valores de empaquetamiento permiten una reducción en la porosidad de la matriz, esto repercute en aumento de las propiedades mecánicas y durabilidad. Sin embargo, para llevar a cabo un empaquetamiento óptimo, existen diversos modelos matemáticos propuestos para realizar un UHPC.

El método de Andreasen & Andersen es el método más popular como modelo de empaquetamiento, sin embargo, este método ha sido empleado con concretos de densidad normal. Una propuesta para el desarrollo de un UHPC ligero es el modelo matemático llamado Diseño Compuesto Central (CCD, por sus siglas en inglés) [46].

Las nuevas tendencias en el mercado en edificios que brinden un atractivo visual han generado que los UHPC se empleen en zonas específicas dentro de los proyectos. Por estos motivos, se destaca su empleo debido a que puede obtener propiedades arquitectónicas como curvaturas, textura, sistemas de paneles y/o prefabricados, acabados aparentes y diversidad de colores sin la necesidad de sacrificar valores de resistencia. Así mismo, se han llevado a cabo productos arquitectónicos con las mismas propiedades estructurales [29].

Según algunos autores, algunas de las características de durabilidad de los concretos ligeros de acuerdo con sus características mecánicas se enlistan en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de los concretos ligeros convencionales, de alto y ultra-alto comportamiento.

Clasificación de los concretos ligeros	Convencionales [49, 50]	Alto Comportamiento [44, 48]	Ultra-Alto Comportamiento [51]
Densidad, kg/m ³	1600 – 1800	1500 – 2000	1500 – 1980
Resistencia a la compresión, MPa	20.68 – 27.58	40 – 80	47.6 – 96.0

Carbonatación, mm	0.8 – 2.0	0.5-1.2	≤ 0.5
Resistividad Eléctrica Superficial ($k\Omega\text{-cm}$)	10 – 30	50 – 100	80 – 150
Resistividad Eléctrica Bruta ($k\Omega\text{-cm}$)	5 – 15	20 – 50	40 – 100
Conductividad Térmica ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)	0.3 - 0.5	0.35 – 0.5	0.4, 1.1 para la mayor densidad*

3.2 Definición del problema

La demanda de fachadas de concreto arquitectónicas ha incrementado en los últimos años debido a su atractivo visual que la infraestructura ofrece y va ligado con la demanda de edificaciones de gran altura y construcciones únicas en el mundo. Sin embargo, estas alternativas tienen limitaciones que van relacionadas con el peso y las dimensiones de los elementos. Estos requieren grandes secciones transversales y una mayor cantidad de acero de refuerzo, lo que incrementa el peso del conjunto y permite elementos de menor longitud.

Hoy en día el conocimiento acerca de materiales que pueden atender estas necesidades no se desarrolla en México y principalmente se produce en países con alto desarrollo económico como China, Malasia y Catar [4, 12], por lo que su producción es limitada y costosa, además de no atender todas las necesidades.

Las soluciones a estas necesidades no son eficientes, demandando grandes volúmenes de concreto, acero de refuerzo, mano de obra, tiempo y recursos económicos, además de ser susceptibles a requerir mantenimiento por el empleo de características convencionales.

Estos productos son complejos de llevarlos a cabo con un concreto convencional, debido a los tamaños de agregado y poca fluidez que algunas mezclas pueden obtener, por lo que resulta en elementos estéticamente inadecuados y que no se pueden colar.

Dentro de la diversidad de productos ofrecidos dentro del mercado nacional, no existe alguno que sea un concreto ligero estructural, además de contar con propiedades de durabilidad como la resistencia a diversos ataques externos como químicos y ambientales.

Los productos con propiedades arquitectónicas brindan un atractivo visual al elemento final, sin embargo, aún no se emplea con frecuencia la característica arquitectónica en la construcción y el mercado nacional.

Cada día se muestra mayor relevancia hacia el diseño y construcción de fachadas arquitectónicas mediante la innovación para el desarrollo de un nuevo producto y con ello su producción, con una visión hacia un futuro más eficiente y sostenible debido a que se puede mejorar el confort térmico de los edificios a un costo más accesible en el mercado [35].

Diversas investigaciones han desarrollado L-UHPC, obteniendo los diversos beneficios antes mencionados, sin embargo, existe una brecha en la literatura con respecto a diferentes aspectos como los requisitos de diseño de mezclas, las características de desempeño y las etapas de producción [52]. Una

de las limitantes es el uso de diferentes agregados ligeros, ya que la disponibilidad de algunos es limitada, por ello, desarrollar un L-UHPC con agregados comercialmente disponibles en México brinda la oportunidad de acceder a este tipo de productos y sus beneficios.

La mayoría de los estudios se han centrado en la influencia de los agregados ligeros en estado fresco, así como la hidratación, y pruebas de durabilidad, sin embargo, en este estudio se ha centrado en encontrar la influencia también de las fibras de PVA como una alternativa a las fibras de acero, las cuales son las más empleadas y la sinergia con la matriz, así como pruebas de conductividad térmica.

Algunos estudios se han centrado en diferentes agregados ligeros, sin embargo, no existe mucha información acerca de L-UHPC con EPP, debido a que principalmente se emplean agregados ligeros como ceniza volante, arcilla expandida o vidrio, así mismo, agregados naturales como arena de río [12, 43, 44, 45]

En este sentido, el agregado comercialmente disponible es la Perlita Expandida de Poliestireno (EPP), permitiendo la evaluación de este material en la incorporación de matrices cementantes de UHPC desde su estado fresco hasta endurecido, incluyendo pruebas de durabilidad y conductividad térmica.

Este estudio abarca el uso de la EPP con tamaños menores a 1 mm, siendo que diversos estudios [12, 47] han utilizado tamaños mayores a 3 mm, siendo que el tamaño del poro es más grande teniendo una mayor influencia en la mejora de las propiedades térmicas, pero reduciendo significativamente la resistencia.

A pesar de la incorporación de agregados ligeros, algunos criterios para considerar que el concreto es ligero, el ACI 213 [42] define el concreto ligero como un material que tiene una densidad inferior a 1920 kg/m³, mientras que BS EN 206 [54] y Eurocódigo 2 [55] consideran 2000 y 2200 kg/m³ como la densidad máxima para el concreto ligero, respectivamente.

La mayoría de los estudios, exploran rangos aproximados que van de 1500 hasta 2000 kg/m³, siendo que la investigación explora rangos más amplios de densidad (desde 1150 hasta 2100 kg/m³), lo cual, permite generar unas curvas más completas de datos de los valores que se pueden obtener en este tipo de concreto [12].

Por estos motivos, los proyectos requieren de productos con mayor versatilidad y características, esto incluye materiales y elementos que relacionen la arquitectura con la ingeniería y sigan las especificaciones del proyecto. De este modo, materiales con gran desempeño en cuanto a propiedades mecánicas, durabilidad, y una adecuada densidad de acuerdo con el proyecto, permite elementos de mayor esbeltez y/o dimensiones, mejorando costos y dando una mayor satisfacción a los clientes.

3.3 Marco teórico

3.3.1 Concretos convencionales

Los concretos son materiales elementales dentro del área de la construcción, su uso es tan común que se emplea en cimentaciones, muros, losas, vigas, columnas, etc., los cuales tienen características como densidad normal (2400 kg/m³) y una resistencia a la compresión (f'_c) que va desde 20 hasta 40 MPa en cualquier tipo de construcción convencional.

3.3.2 Concretos ligeros

Así mismo, existen los concretos ligeros, los cuales son alternativas para rellenos en muros o como recubrimientos en losas, de manera que el concreto ligero brinda propiedades de aislamiento térmico y acústico, beneficiando en zonas donde el clima es extremo o se requiere para aplicaciones como cines, auditorios, teatros, etc. Estos concretos pueden rondar entre los 800 a 1000 kg/m³, lo cual es una densidad baja comparada con la convencional, pero disminuye la resistencia a la compresión, obteniendo resistencias por debajo de 15 MPa.

3.3.3 Agregados ligeros

Una forma de lograr los concretos ligeros es mediante el uso de agregados ligeros, y suele hacerse con agregados naturales, el problema son las características de ese agregado, que demanda valores altos de agua de absorción y su tamaño es irregular.

El uso de la micro perlita expandida de poliestireno también es común para darle propiedades de ligereza y aislantes, además de no tiene problemas de absorción como un agregado natural, sin embargo, tampoco se ha realizado el análisis de la implementación de un tamaño menor al empleado usualmente que ronda entre 3 y 5 mm en una matriz de un UHPC [12].

Por ello, el uso de la EPP en el UHPC ayudaría al empaquetamiento y reduciría el diferencial que se tiene normalmente en la resistencia a la compresión por el uso de agregados ligeros.

3.3.4 Zona de transición interfacial (ITZ)

En los concretos ligeros, un término que es indispensable analizar y tener en cuenta, es la zona de transición interfacial (ITZ), la cual, es la zona alrededor de los agregados y la pasta de cemento. De este modo, se puede analizar la sinergia entre la matriz cementante con la adherencia del agregado.

Debido a que tenemos diferentes agregados, esto se vuelve importante porque puede tener un efecto directo en las propiedades en estado fresco y mecánicas, por ello, se vuelve un sistema complejo en donde todas las variables interactúan y fungen un papel importante. Es decir, mejorar la distribución granulométrica es importante, así como el tipo de agregado, la cantidad y la forma, así como la densificación de la matriz con respecto a la relación a/c de la pasta [9, 13].

Otros autores han mencionado que añadir materiales cementantes suplementarios incrementa el tiempo de hidratación y con ello mejora la ITZ y la microestructura de la matriz [56].

3.3.5 Concretos de Ultra-Alto Comportamiento (UHPC)

Debido a la versatilidad de los concretos, existen los UHPC, los cuales son concretos con mejores características con respecto a un concreto de peso convencional, las cuales son altas resistencias (mayores a 120 MPa), ductilidad, gran durabilidad, etc. Estos surgen como solución a las demandas en donde elementos de acero no son un material adecuado para esa aplicación, pero tiene igual o mejores propiedades que el acero dependiendo del caso.

3.3.6 Modelos de empaquetamiento

Uno de los parámetros más importantes para el diseño y la optimización de los UHPC es la densificación de la matriz cementante mediante la pasta y los agregados, y este factor afecta las propiedades del concreto.

Una manera de evaluar los factores de compactación del concreto es usar los modelos de empaquetamiento de partícula (PPM por sus siglas en inglés), los cuáles son considerados como efectivos y permiten reducir los consumos de cemento, por lo que benefician la sustentabilidad de las mezclas.

Los modelos de empaquetamiento o también conocidos como modelos de distribución granulométrica son aquellas herramientas matemáticas que ayudan a predecir como se distribuyen las partículas en una mezcla de concreto.

Cuando se habla de UHPC, está involucrado un modelo de empaquetamiento que involucre los diversos tamaños de partícula de los materiales y se reduzca la cantidad de huecos que puedan generarse. Esto se realiza con un software matemático que permite hacer la estadística de todos los tamaños de partícula y hacer una curva granulométrica ideal.

Uno de los modelos más conocidos es el método de Andreassen y Andersen modificado [57-66], el cual, está basado en la incorporación de las granulometrías de todos los materiales involucrados en el diseño de concreto (cemento, puzolanas, agregados, fillers, etc.), con la finalidad de formar una granulometría en conjunto y poder realizar el mejor empaquetamiento en conjunto de todos los materiales.

Otro modelo es el Diseño Compuesto Central (CCD), siendo éste, el único en el desarrollo de un UHPC con arcilla expandida como agregado ligero obteniendo un adecuado comportamiento de este, es decir, resistencias mayores a 120 MPa y densidades entre 1800 y 2000 kg/m³ [17].

Por este motivo, se utilizará un modelo de empaquetamiento de los dos mencionados, el cual permita mejorar las propiedades en estado fresco y endurecido del concreto, por lo cual, su selección deberá ser evaluada mediante el que mejor se adecue a las características que se buscan.

3.3.7 Tipo de cemento empleado y puzolanas

El cemento gris es el más comercial, pero suele no ser un material atractivo a la vista, al implementar el uso de cemento blanco es con la finalidad de que puedan generarse elementos con mejores vistas al público y al cliente, de manera que, este concreto se emplee en construcciones que puedan tener versatilidad en el color y acabado, incluso se pueden colocar pigmentos para cambiar el color del concreto.

Del mismo modo, se busca el desarrollo de un UHPC con cemento blanco con la finalidad de ver su comportamiento y las propiedades que este puede tener comparado con UHPC con cementos gris convencionales.

Estos concretos conllevan altos consumos de cemento (800 a 1000 kg/m³), sin embargo, la investigación ha permitido que se empleen material cementantes suplementarios sin sacrificar la resistencia, disminuyendo los consumos de cemento hasta 500 kg/m³ y sustituyendo porcentajes entre 20 y 25 % de puzolanas como escorias granuladas de alto horno, polvo de vidrio molido y metacaolín, en donde se han visto que estos materiales tienen grandes propiedades puzolánicas y adecuado comportamiento en los UHPC [47].

Los UHPC se caracterizan por llevar sustituciones de puzolanas y la más común es el Humo de Sílice, sin embargo, para mantener un color blanco, se ha optado por incluir Metacaolín que tiene diversidad de

colores dependiendo de la obtención de la materia prima, con ello, se puede incluir en el uso para el cemento gris y el cemento blanco.

Sin embargo, el índice de actividad del MK no es igual al del Humo de Sílice, y los valores según la literatura van desde el 15 al 25% de sustitución del cemento en masa [67, 68], por ello, se tiene que realizar la sustitución del 15, 20 y 25 % del cemento por MK en masa para encontrar la sustitución óptima del material cementante por cemento y que se mantenga la menor disminución de resistencia encontrando el punto óptimo para mantener una referencia de 120 MPa a 28 días.

3.3.8 Aditivos reductores de agua de Alto Rango/ Superplastificantes.

Para lograr la producción de un UHPC se requiere el uso de Aditivos reductores de agua de alto rango o superplastificantes, lo cual, es de suma relevancia, puesto que no todos los aditivos funcionan igual con todos los tipos de cemento, lo que conlleva a dosis elevadas de aditivo [1, 5, 12, 56].

Por ello, existe una compatibilidad debido a la composición química del cemento y el aditivo, de manera que se tiene que evaluar el comportamiento de fluidez del cemento blanco, ya que antes no se tenía la tecnología de los aditivos modernos (base policarboxilatos) y el cemento blanco no se empleaba en muchas aplicaciones debido a la incompatibilidad de este tipo de cemento con los aditivos.

3.5.7 Uso de fibras de acero y sintéticas en el UHPC.

Los UHPC se caracterizan por tener grandes propiedades mecánicas, y una de ellas es la ductilidad, la cual, se obtiene mediante el uso de fibras de acero en la matriz del concreto. Estas fibras normalmente son de 13 mm de longitud y 0.5 mm de diámetro, lo cual, es característico de estas fibras para no generar segregación y lograr un adecuado empaquetamiento [3].

Sin embargo, debido a la implementación del agregado ligero en el UHPC, si se usa la fibra de acero puede dañar el color y debido a la densidad del acero, se tendrá que sustituir mayor cantidad de EPP para obtener la densidad requerida, por ello, se sustituirá la fibra de acero por fibra sintética de polivinilo alcohol.

Esta fibra tiene la característica de ser estructural a pesar de su longitud que aproximadamente es de 12 mm y un diámetro aproximado de 200 μ m, además de no tener absorción y ser resistente a ácidos y álcalis, y por tener un color amarillo claro casi transparente, se adapta de manera adecuada al diseño del concreto blanco [69]. Otro punto importante es la ligereza con la que cuenta esta fibra, debido a que, al tratarse de un polímero, su densidad ronda los 1.3 g/cm³ comparadas contra las fibras de Polipropileno que suelen rondar valores de 0.91 g/cm³ y las de acero con valores de 7.85 g/cm³ [69].

Así mismo, esta fibra está diseñada específicamente para UHPC y una de las principales aplicaciones es para fachadas de concreto, de esta manera, se logra una buena sinergia entre la especificación y la aplicación de la fibra y el concreto.

3.5.8 Pruebas de durabilidad.

Al involucrar un tema como lo es el UHPC, hablar de las propiedades de este, como lo son la alta resistencia a la compresión, ductilidad y durabilidad, sin embargo, se puede comprobar que el concreto es adecuado para durar la cantidad de años que se estima o se requiere (70 – 100 años o más), esto se realiza mediante la implementación de pruebas de durabilidad.

Es decir, se someterá a ambientes agresivos que aceleren el proceso de los años y nos pueda indicar en tiempos menores, la durabilidad estimada del concreto y que eso se relaciona con los años útiles que puede tener el elemento. Las pruebas por realizar dentro de la investigación es resistividad eléctrica superficial y bruta, así como la prueba rápida a la penetración de Ion Cloro (RCPT).

3.5.9 Resistividad eléctrica.

Por último, la resistividad eléctrica se realiza con la finalidad de poder tener un indicador del fraguado y de la resistencia mecánica, del grado de saturación del concreto y por ello del grado de curado y de la impermeabilidad o resistencia al ingreso de sustancias agresivas en el concreto.

Finalmente tiene una relación directa con la velocidad de corrosión al indicar el grado de humedad del concreto. Por todo ello es un parámetro que permite relacionar la microestructura con el comportamiento durable del concreto [70].

3.5.10 Conductividad térmica

La conductividad térmica (k) es una propiedad física fundamental que describe la capacidad de un material para transferir calor mediante la conducción. Esta propiedad cuantifica la facilidad con la que el calor fluye a través de un material cuando existe un gradiente de temperatura. Entre más denso y homogéneo sea el material, transmite de manera eficiente el calor y su conductividad aumenta, por ello, una disminución en la conductividad térmica implica disminuir la densidad del material y controlar la transferencia de calor a través de este, logrando que el material sea aislante.

La ley de Fourier de conducción de calor es el fundamento de la conductividad térmica, en donde se establece que el flujo de calor es proporcional al gradiente de temperatura. Con los valores de conductividad, se puede calcular la resistencia térmica (R), la cual es una magnitud relacionada inversamente proporcional con la conductividad y representa como un material se opone al flujo de calor.

A valores bajos de R indica una conductividad alta, sin embargo, cuando los valores de R aumentan, muestran como el material se vuelve más aislante.

Dentro de los aspectos más importantes que se relacionan con la conductividad térmica en el concreto son:

1. Densidad
2. Porosidad
3. Contenido de humedad
4. Microestructura
5. Tipo de agregado

Por ello, todos estos factores tienen influencia en las mediciones de conductividad térmica, ya que están directamente relacionados con los poros dentro de una matriz.

En un concreto convencional, los valores de conductividad pueden ir desde 1.6 hasta 1.8 $\text{W/m}\cdot\text{K}$, siendo que en los UHPC, estos valores gracias a su baja porosidad y alta densificación de la matriz, además del uso de fibras de acero (que puede aumentar el valor debido a la densidad de las fibras), los valores pueden ir hasta 2.1 $\text{W/m}\cdot\text{K}$ [12].

Por este motivo, la investigación de la conductividad térmica en materiales modernos como el UHPC con agregados ligeros, genera nuevos valores en la literatura, así como nuevas aplicaciones de estos materiales [.

Capítulo 4. Justificación

El desarrollo de un concreto de ultra-alto comportamiento con agregados ligeros es una alternativa a un producto que atiende las diferentes características como lo son un concreto con alta ligereza, arquitectónico, durable y resistente, teniendo la oportunidad de mejorar el campo de aplicación.

El UHPC es una excelente alternativa para desarrollar concretos con finalidades arquitectónicas debido a la facilidad que tiene para la colocación y obtener diferentes formas, texturas, colores, entre otros gracias a su alta fluidez y mínima o nula necesidad de vibración.

Además, los UHPC tienen altos valores de durabilidad, por lo que, el beneficio de la durabilidad genera ahorros en la construcción debido a temas como mantenimiento, esto también se relaciona con la gran resistencia a los ataques del medio ambiente y químicos, por lo que, resultan en grandes opciones para aplicaciones en zonas con ambientes agresivos.

Con las propiedades del UHPC, se realizó el diseño de una mezcla de concreto que cumpla con las características de ligereza (densidades entre 1200 y 2000 kg/m³), además de ser capaz de absorber la disminución en la resistencia a la compresión del concreto de manera gradual por el empleo de agregados ligeros.

Un problema de los agregados ligeros son las características que tienen de absorción, a pesar de que algunos tienen la capacidad de realizar una función de curado interno (desorción), son complicados de controlar por los elevados valores de absorción y las correcciones por humedad de obra, que obligan a los diseños de mezclas de concreto a considerar y realizar un elevado número de correcciones por el agua de absorción con la posibilidad de modificar su relación a/c.

Del mismo modo, si se desea realizar una disminución de la densidad mediante aditivos químicos, la espuma preformada que se añade, en ocasiones no mantiene la formación de la burbuja o los tamaños pueden ser inestables por el tipo de mezclado empleado (mezcladoras de contracorriente). De modo que se altera las propiedades deseadas, obteniendo una mezcla diferente de lo esperado.

Por estos motivos, se analiza la implementación de la micro perlita expandida de poliestireno, que brinda propiedades de ligereza, además de ser bien empaquetada en la matriz cementante por el tamaño uniforme. Este producto no tiene absorción debido a que es un agregado artificial y por su tamaño (>1.0 mm de diámetro), y al ser distribuida de manera uniforme en la matriz evita vacíos de gran tamaño, por lo que brinda propiedades mecánicas mejores comparadas con el uso de otro tipo de agregado ligero. Estas características que brinda la perlita son destacables y con gran diversidad de aplicaciones.

El beneficio de emplear un concreto ligero se ve reflejado en diferentes aspectos y que tienen gran relación con ahorros de personal, tiempo, materiales, etc., y que tienen como resultado la reducción en los costos finales de la obra a realizar, incluso cuando las inversiones son mayores, las ventajas del uso de estos materiales son justificables.

Los volúmenes de concreto se reducen debido al empleo de un UHPC que brinda mejores propiedades mecánicas, requiriendo una menor sección transversal o realizar claros de mayor longitud en los edificios. Esto involucra menor mano de obra, menor demanda de materiales y mayor rapidez de colocación y fabricación de los elementos.

Así mismo, la reducción de peso en las estructuras se ve relacionada directamente con la disminución de cargas muertas, lo que conlleva la disminución de las secciones transversales y del acero de refuerzo. Esto suma una doble reducción en la demanda de concreto, haciendo edificaciones atractivas visualmente por tener claros de mayor longitud o columnas de mayor esbeltez.

Poder cumplir con la misma demanda de resistencia, pero con menores dimensiones de los elementos estructurales, son de suma importancia en la distribución de espacios en los edificios, volviendo más eficientes la reducción de alturas de plafones (generalmente para ocultar las alturas de vigas y losas), sin la necesidad de tener alturas mayores de entre piso.

Los motivos por los cuáles se plantea el uso de un Cemento blanco y un Tipo II es debido a las diferencias de composición química, debido a las diferencias en la cantidad de C_3A , siendo que son 2 tipos de cementos completamente opuestos, es decir, el cemento blanco contiene altos valores de C_3A siendo que el Tipo II es un cemento con características de química estables, teniendo la característica de reducir el C_3A a un contenido menor al 8%, el concreto fabricado con un cemento Tipo II permite estructuras más durables a los sulfatos y otros ataques químicos.

Debido a su composición química, el cemento Tipo II entra en una clasificación como un CPO 40, por lo que su contenido de Clínter es mayor, con base en esto, el cemento blanco es un CPC 30R, siendo un cemento compuesto y con contenidos de Clínter menores, por lo que mantener propiedades mecánicas y de durabilidad con un cemento de clase 30R vuelve más interesante para el mercado el producto desarrollado. Del mismo modo, las investigaciones más recientes en el desarrollo de UHPC se han realizado con cementos Tipo II, por lo que es necesario realizar esa comparativa entre cementos que permita ver la factibilidad ante el mercado de seguir el desarrollo con cementos Tipo II o poder emplear otras alternativas de cementos con menor contenido de clínter y menos especificaciones.

Otro objetivo de utilizar dos cementos es permitir comparar la durabilidad del cemento blanco comercial mediante la reducción de la relación agua/cementante y un máximo desarrollo del empaquetamiento de la matriz, así mismo, podemos ver las diferencias en la compatibilidad de los cementos con los aditivos y cementantes suplementarios actuales comercialmente disponibles para la producción de un UHPC.

El desarrollo de un producto con materiales como la EPP, el cual, no se ha trabajado para ser incluido dentro de los UHPC para mejorar múltiples beneficios como un acomodo uniforme de las partículas y con ello una reducción en la pérdida de resistencia a la compresión debido al uso de agregados ligeros, por lo que, puede generar atractivo por las empresas a nivel nacional e internacional y ser ofrecido comercialmente para aplicaciones arquitectónicas con la mínima resistencia estructural.

Los beneficios se ven reflejados en la obtención de datos para la fabricación y producción del concreto con materiales comercialmente disponibles, así como la implementación de las materias primas que se tienen en el país, permitiendo abrir un campo de aplicaciones y una mayor demanda en la industria local e internacional.

Con lo anterior, podemos extraer y analizar datos como la compatibilidad entre dos tipos de cemento con diferentes aditivos y los diferentes porcentajes óptimos para la sustitución de la puzolana que en este caso será un Metacaolín.

Capítulo 5. Hipótesis y Objetivos

5.1 Hipótesis

La sustitución parcial del agregado fino triturado de caliza típico del área metropolitana de Monterrey por micro perlita expandida de poliestireno (EPP) con tamaño promedio de partícula de 1.0 mm en conjunto con una fibra de polivinilo alcohol (PVA) en una matriz cementante de UHPC, permitirá el desarrollo de concretos de ultra-alto comportamiento ligero (L-UHPC) con propiedades en estado fresco, mecánicas, de durabilidad y conductividad térmica dentro de los rangos característicos de estos concretos.

5.2 Objetivo general

Desarrollar un concreto de ultra-alto comportamiento ligero (L-UHPC) con sustitución del 30, 55, 80 y 100% del agregado fino natural por micro perlita expandida de poliestireno (EPP), mediante la caracterización de su comportamiento en estado fresco, endurecido, durabilidad, conductividad térmica y flexión, con el fin de optimizar su aplicación en elementos arquitectónicos de menor densidad manteniendo sus propiedades estructurales.

5.3 Objetivos específicos

- Diseñar mezclas para producir UHPC's optimizadas por fluidez y resistencia a la compresión en cubos de 50 mm, con cemento portland blanco y gris, y sustituciones parciales del agregado fino de caliza triturada por micro perlita expandida de poliestireno (EPP) en porcentajes del 30, 55, 80 y 100%.
- Evaluar las propiedades mecánicas del L-UHPC con diferentes niveles de sustitución de EPP mediante ensayos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad, analizando el efecto de la densidad y del agregado ligero en el comportamiento mecánico del material.
- Para todos los L-UHPC optimizados, determinar el efecto de la incorporación de diferentes porcentajes de fibra de PVA (1.0, 1.5 y 2.0 %), en la ductilidad y la resistencia post-agrietamiento (tenacidad) mediante ensayos de flexión y resistencia a la extracción de anclajes embebidos.
- Para todos los L-UHPC optimizados con y sin fibra de PVA, evaluar algunos indicadores de durabilidad y la conductividad térmica mediante ensayos de resistividad eléctrica superficial y bruta, permeabilidad rápida al ion cloruro (RCPT) y conductividad térmica.

Capítulo 7. Metodología Experimental

En este capítulo se presenta de forma detallada la metodología experimental que se llevó a cabo en cada etapa, con la finalidad de evaluar las propiedades de los diferentes concretos realizados con las diferentes sustituciones de EPP.

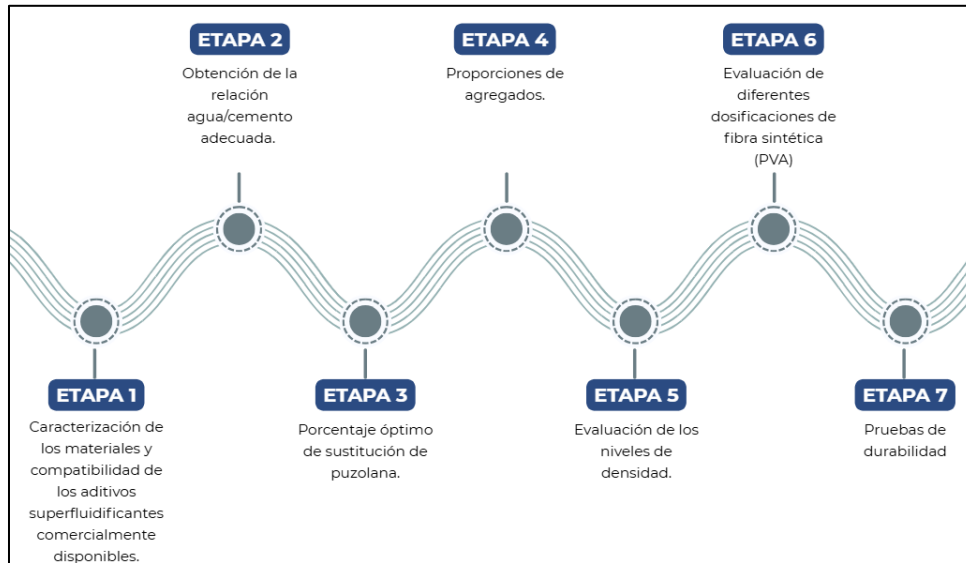


Figura 5. Diagrama representativo de las etapas que abarcan la metodología experimental.

A continuación, se presentan las diferentes etapas necesarias, las cuales están enfocadas en atender un orden adecuado para el desarrollo del proyecto.

7.1 Etapa 1. Caracterización de los materiales y compatibilidad de los aditivos superfluidificantes comercialmente disponibles.

7.1.1 Cementantes

Los cementantes empleados en el proyecto serán dos sistemas binarios a partir de un Cemento Portland Compuesto clase 30R Blanco (CPC 30R B) de acuerdo con la NMX-C-414 [71] y un cemento Tipo II de acuerdo con la ASTM C 150 [73], así como el uso de una puzolana que será metacaolín (MK).

A los cementantes se les realizará una caracterización fisicoquímica, la cual proporciona la información necesaria para encontrar las propuestas de dosificaciones en el diseño de mezcla a evaluar.

Las pruebas consideradas en la Tabla 3 se eligieron con base en la caracterización completa de los materiales cementantes, sin embargo, el realizar pruebas como la Difracción de Rayos X (DRX), Fluorescencia de Rayos X (FRX) y el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) nos ayuda a complementar el análisis de los materiales cementantes, debido a que son materiales con altos controles de calidad, el análisis de fases minerales y composición química nos permite ampliar el panorama del comportamiento de los cementos así como el de la puzolana.

De igual manera, el MEB nos ayudará a conocer la morfología de nuestros cementantes y obtener el máximo beneficio del conocimiento de ellos para mejorar las propiedades del UHPC-L que se tiene como objetivo.

Tabla 3. Caracterización de los cementantes.

Prueba de Caracterización	CPC 30R B	Tipo II	MK
Distribución de Tamaño de Partícula (DTP) (ASTM C114) [73]	✓	✓	✓
Densidad (Ds) (ASTM C188) [74]	✓	✓	✓
Pérdida por Ignición (PPI) (ASTM C144) [73]	✓	✓	✓
Determinación de fases minerales por Difracción de Rayos X (DRX) (ASTM C114) [73]	✓	✓	✓
Determinación de la composición química por Fluorescencia de Rayos X (FRX)	✓	✓	✓
Análisis morfológico mediante el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)	✓	-	✓

7.1.2 Agregados

Los agregados por emplear son calcita por ser un agregado de color blanco y agregado de caliza de tamaños como la arena #4 y #5 respectivamente, así como el polvo de calcita y caliza para complementar la parte fina del agregado. La EPP será caracterizada de igual manera debido a la incorporación de este material en diferentes porcentajes dentro de la matriz cementante y serán caracterizados para obtener sus granulometrías y poder emplear el tamaño para la curva granulométrica optima en el diseño del concreto. La caracterización del agregado se muestra en la Tabla 3.

Tabla 4. Caracterización de agregados

Prueba de Caracterización	Arena #4	Arena #5	EPP
Densidad (Ds) (ASTM C128) [75]	✓	✓	✓
Absorción del agregado (% ABS) (ASTM C128) [75]	✓	✓	-
Granulometría (ASTM C136) [76]	✓	✓	✓
Módulo de Finura (ASTM C136) [76]	✓	✓	-

7.1.3 Aditivos

Se utilizarán aditivos químicos para concreto con el nombre Reductores de Agua de Alto Rango o comúnmente llamados superplastificantes (Tipo F según la normativa ASTM C494 [77]) base éter policarboxilatos de diferentes marcas comercialmente disponibles. Se les realizó una caracterización de densidad mediante el uso de un picnómetro de 50 mL de capacidad a una temperatura de 20°C, el cual se pesó seco y vacío, se registró el peso, posteriormente se colocó el aditivo de forma gradual utilizando una pipeta de 5 mL para evitar la generación de burbujas dentro del picnómetro, una vez llenó el picnómetro, se limpió el exterior, y se llevó a un baño de agua a 20°C, se dejó el picnómetro el tiempo necesario para que no hubiera cambios de volumen y se obtuvo su peso, durante este periodo, se retiraba

el picnómetro del baño de agua, se secaba y se pesaba, se registró el peso para el cálculo de densidad, utilizando la siguiente fórmula de densidad:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

En donde:

ρ = Densidad, g/cm³

m = Masa del aditivo, g (siendo la masa la diferencia del peso final del picnómetro lleno menos el peso del picnómetro vacío).

v = Volumen del picnómetro, mL

Así mismo, su contenido de sólidos adaptado de la norma ASTM C494, utilizando el método gravimétrico modificando el protocolo, ya que estos se llevaron a cabo mediante el secado del aditivo en horno. Es decir, se pesó una cantidad de aditivo líquido en un crisol, posteriormente se dejó en un horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ por un tiempo de 24 a 36 horas (ya que algunos aditivos requerían más de 24 horas para obtener un peso constante), se dejaba enfriar y se pesaba el restante de material que quedaba en el crisol tomando este como el peso final. Posterior, se realizaba el cálculo del porcentaje que contenía de agua el aditivo con la siguiente fórmula:

$$C. \text{solidos} = (w_i - w_f) \times 100$$

En donde:

$C. \text{solidos}$ = Contenido de sólidos, %

w_i = Peso del aditivo líquido

w_f = Peso del aditivo seco

Este procedimiento se realizó para ajustar la cantidad de agua en el proporcionamiento y mantener un control de las mezclas de concreto con relación a/c fija y que no se vea modificado por la adición de aditivo.

Así mismo, se evaluará la compatibilidad entre aditivos superfluidificantes comercialmente disponibles para la producción de UHPC evaluado mediante pruebas de fluidez (ASTM C939 [78]).

Para ello, se evaluarán diferentes dosis de aditivo con una misma relación a/c y cuatro aditivos diferentes de marcas comerciales, a manera de poder obtener un gráfico que indique la dosis óptima y la mejor compatibilidad del aditivo con el cemento blanco y gris, así como su estabilidad visual porque dosis altas de aditivo incluso pueden generar segregación.

En esta parte de la etapa 1, se realizaron 4 diseños de mezclas (uno para cada aditivo), variando las dosis desde 4 hasta 10 cc/kg de cemento, siguiendo una metodología de mezclado similar a la que indica la norma ASTM C305 [79], sin embargo, se extendieron los tiempos para que el mezclado fuera completamente homogéneo y que el aditivo pudiera tener la máxima efectividad al tener más tiempo de mezclado.

Para tener un mejor entendimiento de la influencia de las dosis de aditivos y su efecto con relaciones agua/cemento bajas, se hará con tres relaciones diferentes: 0.22, 0.25 y 0.28, así mismo para definir cuál es la dosis adecuada para cada relación y ser utilizado en la etapa 2.

La Figura 1 ilustra como al añadir más dosis de aditivo, el tiempo que tarda en pasar la pasta a través del cono es menor, es decir, mayor dosis tiene mejor efecto sobre la pasta, sin embargo, se tiene que llegar al tiempo más bajo, pero con la dosis mínima, debido a que incluso incrementar la dosis ya no disminuirá el tiempo, por lo que seleccionar esa dosis nos permite saber que ese es el punto de saturación.

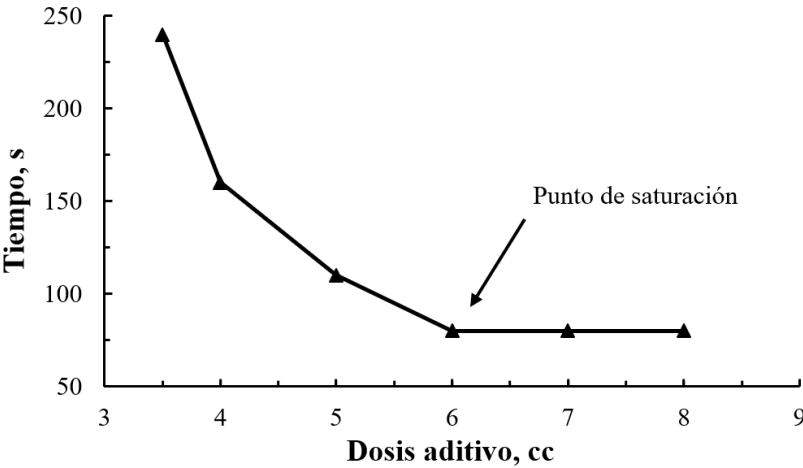


Figura 6. Gráfico ilustrativo para la obtención de los puntos de saturación.

La Tabla 5 muestra el procedimiento a seguir para el mezclado de las pastas para cada aditivo y dosis, utilizando una mezcladora UNIVEX (Figura 7), el cual cuenta con un movimiento de la paleta en forma epicíclica, la cual propicia un mejor mezclado. El equipo cuenta con 7 velocidades, de las cuales 3 son intermedias y 4 en velocidades con valores enteros. Las velocidades pueden ir desde las 110 hasta 480 revoluciones por minuto (rpm). El tazón utilizado tiene una capacidad de 12 litros.

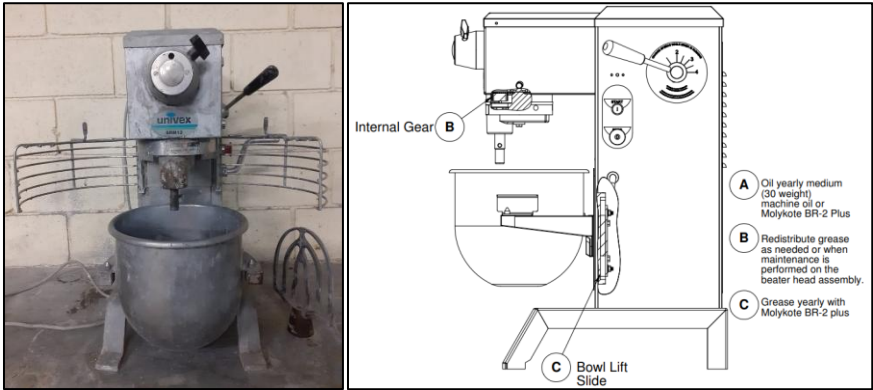


Figura 7. Batidora UNIVEX utilizada para la fabricación de pastas y morteros.

Tabla 5. Protocolo de mezclado para la fabricación de pastas de cemento.

Proceso	Tiempo, hh:ss	
	Parcial	Acumulado

1	Adicionar el agua + aditivo al tazón.	---	---
2	Adicionar el cementante.	---	---
3	Reposar.	00:30	00:30
4	Mezclar velocidad baja (Vel. 1).	02:00	02:30
5	Raspar el tazón.	01:00	03:30
6	Mezclar velocidad media (Vel. 2).	03:00	06:30
7	Raspar el tazón.	01:00	07:30
8	Remezclar con velocidad media (Vel. 2).	04:00	11:30
9	Hacer el procedimiento de prueba colocando la pasta en el cono de fluidez hasta completar un volumen de 1.75L.	---	---
10	Determinar el tiempo de escurrimiento equivalente a 1L de volumen.	---	---
11	Se recupera el material dentro de la batidora para remezclar (Vel 2) y se repite el paso 9 y 10.	01:00	---
12	Se recupera el material nuevamente dentro de la batidora para remezclar (Vel 2) y se repite el paso 9 y 10.	01:00	---
13	Se determina el promedio aritmético de 3 pruebas para cada dosis de aditivo.	---	---

7.2 Etapa 2. Obtención de la relación agua/cemento óptima.

Una vez que se obtuvieron el aditivo y su dosis encontrados en la Etapa 1 que muestre la mejor compatibilidad para cada cemento mediante los puntos de saturación considerando el contenido de sólidos nos permite reducir el número de pruebas, permitiendo enfocarse en las demás etapas solo con el aditivo de mejor desempeño.

Para encontrar la relación agua/cemento óptima, se determinó con la elaboración de diversas mezclas con diferente relación a/c mediante la fabricación de cubos de 50 x 50 mm (ASTM C109 [80]) para analizar su resistencia en morteros, esto debido para ver cuál es la relación mínima posible que puede realizarse y que brinde la mayor resistencia (>120 MPa a 28 días), ya que no se deberá disminuir demasiado la relación a/c, a modo de que se sacrificara la fluidez y la correcta homogenización.



Figura 8. Cubos fabricados y ensayados con CPC.

El procedimiento de mezclado fue basado en la ASTM C305 [79], sin embargo, así como en el procedimiento de pastas, los tiempos fueron modificados para generar una correcta homogenización del material y poder realizar que la mezcla fluyera debido a la baja relación a/c.

Los tiempos de mezclado son mostrados en la Tabla 6 que se muestra a continuación.

Tabla 6. Procedimiento de mezclado para producir mortero.

Proceso		Tiempo, hh:ss	
		Parcial	Acumulado
1	Adicionar los materiales en seco (arena y cemento) y mezclar en velocidad baja (Vel 1).	01:00	01:00
2	Añadir el agua + aditivo SP y mezclar en velocidad baja (Vel 1).	03:00	04:00
3	Raspar el tazón con la espátula.	01:00	05:00
4	Mezclar a velocidad media (Vel 2).	03:00	08:00
5	Reposo de la mezcla durante 1 min.	01:00	09:00
6	Mezclar a velocidad media (Vel 2).	01:00	10:00
7	Realizar la evaluación de la fluidez.	---	---
8	Remezclar durante 30 seg.	00:30	---
9	Fabricación de cubos.	---	---

Fueron evaluadas las tres relaciones a/c antes mencionadas (0.22, 0.25 y 0.28) mediante morteros con arena silica estándar, ensayados a 3, 7 y 28 días con la finalidad de ver la evolución de la resistencia a diferentes edades, y así, seleccionar la relación que mejor comportamiento mecánico muestre, así como la mejor consistencia del mortero.

7.3 Etapa 3. Porcentaje óptimo de puzolanas.

Una vez encontrada la relación a/c que permite tener la mínima resistencia (120 MPa a 28 días), se realiza la sustitución de la puzolana (MK) por Cemento Portland para encontrar el porcentaje óptimo y ser evaluado mediante pruebas de resistencia a la compresión en cubos de 50 x 50 mm (ASTM C109 [80]).

Serán utilizados diferentes porcentajes, entre ellos 15, 20 y 25% de acuerdo con la literatura encontrada para la fabricación de UHPC [67, 68] en donde ese rango ha sido el adecuado para la sustitución del CP por el MK siguiendo el mismo procedimiento de mezclado mencionado en la Tabla 6.

Esta etapa consta de la fabricación de 9 cubos por bachada, en donde serán 27 cubos por los diferentes porcentajes de sustitución para evaluarlos a 3, 7 y 28 días y ver la evolución de la resistencia a la compresión, con base en ello, poder determinar el porcentaje óptimo de sustitución.



Figura 9. Cubos fabricados con 15% de sustitución del a) CPC y del b) CP Tipo II.



Figura 10. Cubos ensayados mostrando falla típica tipo reloj con a) CPC y b) CP Tipo II.

7.4 Etapa 4. Proporciones de agregados y evaluación en estado fresco.

Una vez obtenido un diseño final preliminar de las proporciones cementantes a emplear, se definirán las proporciones del esqueleto granular (calcita y caliza) mediante el modelo de empaquetamiento de Andreasen y Andersen modificado [57-66], utilizando los siguientes tamaños de agregados:

- Arena #4
- Arena #5
- Polvo de calcita y caliza

Esto servirá para mejorar el nivel de empaquetamiento y la densificación máxima de la matriz cementante con todos los materiales, de este modo, se logra obtener el mayor beneficio de todo el conjunto de materiales para el diseño y evaluación de este.

La fórmula del modelo de empaquetamiento de A&A que se emplea es la siguiente:

$$P(D) = \frac{D^q - D^{qmin}}{D^{qmax} - D^{qmin}}$$

En donde:

$P(D)$ = Fracción acumulativa de partículas de tamaño más pequeño que D para una curva objetivo y una curva compuesta

D = Tamaño de partícula empleado a sustituir para generar la curva

D_{min} = Partícula de menor tamaño

D_{max} = Partícula de mayor tamaño

Q = Módulo de distribución de A&A

Los valores que se sustituyen en D es el tamaño que se va obteniendo de la distribución de tamaño de partícula (DTP) en mm, con esto, se traza la curva granulométrica desde el valor mínimo hasta el máximo con todos los valores objetivos de la distribución, los cuales son los siguientes en 4760, 2380, 1408, 1184, 995.6, 837.2, 704, 592, 497.8, 418.6, 352, 296, 248.9, 209.3, 176, 148, 124.5, 104.7, 88, 74, 62.23, 52.33, 44, 37, 31.11, 26.16, 22, 18.5, 15.56, 13.08, 11, 9.25, 7.78, 6.54, 5.5, 4.62, 3.89, 3.27, 2.75, 2.312, 1.945, 1.635, 1.375, 1.156, 0.972, 0.818, 0.688, 0.578, 0.486, 0.409.

Para determinar la curva objetivo, se requiere utilizar un módulo de distribución que comúnmente va de 0.25 hasta 0.40 (dependiendo de que tan gruesa o fina se requiere la granulometría).

De esta manera, con todas las etapas anteriores, se fabricará un UHPC de peso convencional y tener una mezcla de referencia, mezclado en una batidora Hobart, para realizar las primeras iteraciones y no requerir alta demanda de volumen de material, haciendo modificaciones en el mezclado de pastas para obtener mejores resultados en el mezclado.

Posteriormente, una vez ajustado el mezclado, se generó un UHPC trasladado a una mezcladora estacionaria para mezclas secas con un movimiento de aspa de 25 rpm con capacidad de 20L para ser evaluados mediante estado fresco y endurecido.

El procedimiento de mezclado fue basado en la ASTM C305 [79], sin embargo, así como en el procedimiento de pastas, los tiempos fueron modificados para generar una correcta homogenización del material y poder realizar que la mezcla fluyera debido a la baja relación a/c.

Los tiempos de mezclado son mostrados en la Tabla 7 que se muestra a continuación.

Tabla 7. Procedimiento de mezclado para producir el UHPC-

Proceso		Tiempo, hh:ss	
		Parcial	Acumulado
1	Adicionar todos los materiales en seco (arena, cemento y MK) y mezclar en velocidad baja (Vel 1).	01:00	01:00
2	Añadir el agua + aditivo SP y mezclar en velocidad baja (Vel 1).	03:00	04:00
3	Raspar el tazón con la espátula y añadir aditivo EST.	01:00	05:00

4	Mezclar a velocidad media (Vel 2).	03:00	08:00
5	Reposar durante 1 min y añadir aditivo EA.	01:00	09:00
6	Mezclar a velocidad media (Vel 2).	01:00	10:00
7	Realizar la evaluación del flujo de revenimiento y T50.	---	---
9	Fabricación de cubos de 100 x 100 mm.	---	---

Las pruebas que fueron evaluadas para estado fresco fueron Flujo de revenimiento y T50 (ASTM C1611 [81]) y contenido de aire en morteros (ASTM C185 [82]).



Figura 11. Prueba de Flujo de Revenimiento para a) CPC y b) CP Tipo II.

La fabricación de especímenes para resistencia a la compresión fue evaluada mediante cubos de 100 x 100 mm por triplicado. Las edades por evaluar fueron 3, 7, 28 y 56 días, debido a que la referencia tiene que cumplir con una resistencia mínima a la compresión de 120 MPa a los 28 días, dando un total de 12 especímenes

Este ajuste de hacer cubos de 100 x 100 mm surge como una alternativa de la norma ASTM C1856 [83], debido a que es complicado por el cabeceo de los especímenes de 7.5 x 150 mm, y hacer cubos de 50 x 50 mm pueden ser más susceptibles a variaciones por el tamaño del espécimen, por ello, realizar cubos para evitar el cabeceo, pero aumentar las dimensiones fue una manera adecuada de su evaluación en estado endurecido para la resistencia a la compresión, de este modo, se siguió la velocidad de carga marcada por la ASTM C39 [84] (2.5 ± 0.5 MPa) para el ensaye de los cubos en una máquina de compresión automática con capacidad de 200 toneladas marca ELE.



Figura 12. Ensayo de cubos de 100 x 100 mm para a) CPC y b) CP Tipo II.

Así mismo, se realizó la evaluación del módulo de elasticidad estático para el concreto de referencia, en donde solo se evaluará a 56 días en cilindros de 100 x 200 mm por triplicado siguiendo la norma ASTM C469 [85]. Debido a la alta resistencia a la compresión de los cilindros de referencia, un cabeceo con mortero de azufre no es suficiente para la carga máxima, por lo que se procedió a seguir la norma ASTM C617 [86], la cual nos indica que se pueden generar pastas de cemento o yeso de alta resistencia, por lo que se procedió a generar una pasta con alta viscosidad (slurry) de una relación menor a la del cilindro (0.20), para dejarla endurecer por un día y un curado de 1 día y posterior a ello, se ensayaba el cilindro. De esta manera, se obtenía una pasta de una resistencia a la compresión que permitiera la distribución de cargas durante el ensaye.



Figura 13. Colado de la pasta de cabeceo con relación a/c = 0.20.

7.5 Etapa 5. Evaluación de los niveles de densidad.

Con la mezcla de referencia, se diseñaron 4 diferentes niveles de densidades (entre 1200 a 2100 kg/m³) que involucren diferentes porcentajes de EPP, para empezar a realizar las sustituciones de agregado ligero por el agregado de peso normal, con la finalidad de analizar y comparar el comportamiento de la mezcla en estado fresco y poder seleccionar los porcentajes de EPP para los diseños finales.

A continuación, se presenta en la Tabla 8 los diferentes rangos aproximados de sustitución de agregado ligero por agregado de peso normal para la obtención de las diferentes densidades.

Tabla 8. Diferentes porcentajes de agregado ligero y de peso normal para adecuar la densidad objetivo.

Densidad objetivo, kg/m ³	Agregado de peso normal, %	Agregado ligero, %
2300-2400	100	0
2000-2100	70-75	25-30
1700-1800	45-50	50-55
1400-1500	20-25	75-80
1200-1300	0	100

Esto será evaluando las siguientes pruebas y haciendo una comparativa en los resultados para poder tener datos que indiquen la disminución de la resistencia y el módulo de elasticidad con respecto a su densidad.

- Resistencia a la compresión (ASTM C39 [84]) – Densidad (ASTM C642 [87])
- Módulo de elasticidad (ASTM C469 [85]) – Densidad (ASTM C642 [87])

Al tener todos los resultados de las diferentes fabricaciones de las mezclas, se obtendrá una serie de mezclas que tendrán múltiples resultados de los comportamientos de la mezcla, logrando así, seleccionar las mezclas con el mejor comportamiento y llevar a cabo la fabricación de los especímenes destinados para la ejecución de pruebas posteriores.

Para cada nivel de densidad, la resistencia a la compresión se realizará mediante el ensaye de 3 especímenes por edad (3, 7, 28 y 56 días), es decir, 12 especímenes por mezcla, quedando un total de 24 especímenes para compresión en cubos de 100 x 100 mm.

El módulo de elasticidad se evaluará a 56 días mediante 3 especímenes de 100 x 200 mm por nivel de densidad (15 especímenes en total por tipo de cemento), debido a que se busca la determinación del comportamiento mecánico a la edad establecida como óptima.

El módulo de elasticidad se evaluó con base en la norma ASTM C469 [85], la cual indica el uso de un aditamento de 3 anillos alrededor del cilindro que contendrá un micrómetro en sentido vertical con una precisión 0.001 mm, haciendo 2 precargas con mediciones del micrómetro cada 500 kgf hasta 2000 kgf en los cilindros de 55, 80 y 100% de sustitución de EPP por agregado de peso normal, y precargas de 6000 kgf en los de 30% y referencia, y para la corrida del ensaye se determinó la deformación hasta el 40% de la carga máxima estimada del cilindro registrando la carga en los incrementos de las precargas y registrando su correspondiente deformación medida en el micrómetro.

Con los valores obtenidos se procedió a calcular el valor del Módulo de Elasticidad mediante la curva esfuerzo-deformación, que nos permite calcular la pendiente de la recta que se traza entre 0 y el 40% de la carga máxima.



Figura 14. Determinación del módulo de elasticidad mediante un micrómetro y ensaye a la compresión.

7.6 Etapa 6. Evaluación de diferentes dosificaciones de fibra sintética (PVA)

Por último, se evaluarán los diferentes porcentajes de fibra sintética en lugar del uso de la fibra de acero convencional para estos concretos, con la finalidad de determinar el porcentaje óptimo. Serán evaluados los diseños mediante las siguientes pruebas:

- Tenacidad en vigas (EN 14651 [88]).
- Prueba de anclaje (ASTM E1512 [89], ASTM E488 [90]).

Las pruebas mostradas se realizarán con la finalidad de poder evaluar el porcentaje optimo de fibra sintética en el concreto de referencia a 28 días, así como el comportamiento en los concretos de menores densidades con los diferentes porcentajes de fibra sometido a diferentes esfuerzos como los mencionados. Se seleccionó y se empleó una fibra sintética de Alcohol Polivinílico (PVA) empleando 3 dosificaciones (1.0, 1.5 y 2.0% en volumen) para ambas pruebas.



Figura 15. Dosificación de fibra y fabricación de los prismas de 75 x 75 x 300 mm.

Se seleccionaron vigas de 75 x 75 x 300 mm, estas vigas son de la mitad de las secciones que se utilizan en la norma, sin embargo, equivalen a 1/8 del volumen de la misma y se emplearon para no generar una alta demanda de volumen de material. Para cada porcentaje de fibra se realizaron un total de 5 especímenes por cada mezcla de concreto, siendo 15 ensayos por cada valor de densidad, teniendo en total, una cantidad de 75 vigas para un solo tipo de cemento, es decir más de 100 probetas utilizando ambos tipos de cemento para las pruebas de tenacidad.

Se determinó el valor de estas pruebas mediante especímenes prismáticos los cuales fueron fabricados y colados en una sola capa y compactados mediante una mesa vibratoria, con la mínima intensidad de vibración y durante un periodo de 10 segundos, solo para mejorar la compactación. A una edad de entre 24 y 30 horas, los especímenes se desmoldaron y se sumergieron en agua saturada con cal bajo condiciones estándar de curado ($T = 23.0 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$, $\text{HR} = \geq 95\%$) hasta su edad de ensayo a flexión a los 28 días.

Las resistencias máximas de ruptura y residuales post-agrietamiento se determinaron mediante el ensayo de flexión de vigas reforzadas con fibras, las cuales, durante su preparación, fueron ranuradas con una sierra diamantada en el centro de su longitud, conforme al procedimiento descrito en UNE-EN 14651-2007 [88]. En este ensayo se midieron los valores de carga mediante una celda de carga y las aperturas progresivas de fisura (CMOD) correspondientes, así mismo, se midió la deflexión vertical con un dispositivo colocado al centro de la viga, justo donde se encuentra la ranura que es el punto donde se tiene la mayor deflexión vertical mediante un LVDT.

La adquisición progresiva de las aperturas de fisura (CMOD) se realizó con un extensómetro tipo clip de la marca Epsilon, modelo 3541, y una unidad de adquisición de datos (DAQ) de la marca National Instruments, la cual se vinculó a una computadora durante el ensayo mediante el software LabVIEW. Con los datos obtenidos, se trataron y se utilizaron los valores más relevantes para obtener así un promedio de las gráficas generadas.

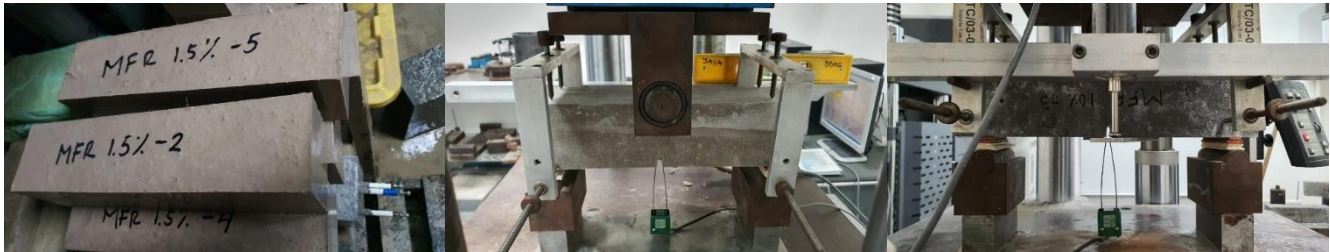


Figura 16. Curado y montaje de las vigas con la instrumentalización para la adquisición de datos.

Por último, la realización de pruebas al anclaje, se realizarán probetas de 600x200x100 mm, teniendo así un panel en dimensiones pequeñas que simula el comportamiento de un anclaje en un panel real. Esto se realiza mediante la fabricación de 3 paneles por mezcla cambiando la dosificación de fibra (1.0, 1.5 y 2.0%), teniendo 15 paneles por mezcla, en donde serán probados 3 anclajes por panel, de esta manera se pueden tener suficientes datos estadísticos del comportamiento bajo este tipo de esfuerzos.



Figura 17. Colado y desmolde de las placas de 60 x 20 x 10 cm.

Cada panel tendrá 3 anclajes post instalados con una separación entre anclaje de 200 mm; cada varilla de anclaje es roscada con un diámetro de 3/8" o el equivalente a 6/16" (9.5 mm) y una longitud de 4-3/8" (111 mm), con una profundidad de 75 mm dentro del panel de concreto, la cual es la mínima indicada por el modelo que se generó en el software PROFIS Engineering. La perforación para los insertos se realizó con una broca de 1/16" mayor que el diámetro del inserto, dando una broca de 7/16", marcándola a la profundidad adecuada para que la perforación sea lo más precisa posible.

Una vez haciendo las 3 perforaciones, se realizó una limpieza con un cepillo de cerdas de metal y se utilizó un soplador de aire comprimido para eliminar todo el polvo generado por la perforación para que se tenga la mejor adherencia entre el concreto y el anclaje.

Para el anclaje se utilizó una resina epóxica de nombre comercial HIT-RE 500 V3, el cual endurece aproximadamente de 6 a 8 horas, por lo que, una vez instalado el anclaje, se tiene que dejar endurecer un día y al día posterior realizar la extracción.

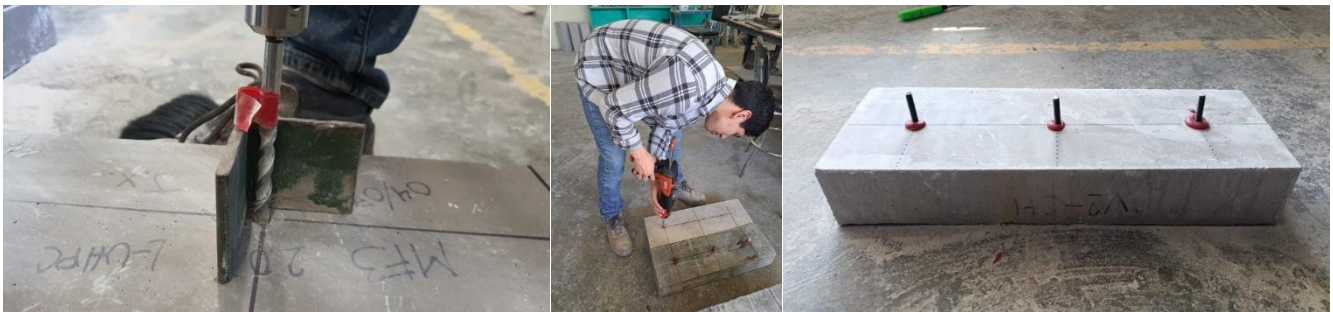


Figura 18. Perforación y colocación de la resina epóxica y anclajes en las placas.

La extracción se realiza con un aditamento tipo cople (ver Figura 19 2)), para que se pueda conectar el anclaje de 3/8" (9.5 mm) a una salida de 1/2" (13 mm), posteriormente se engancha con un anillo que conecta al gato utilizado con una capacidad de 100 kN con precisión de 0.1 kN y se apoya en una placa que simula el anillo de contrapresión original del equipo, sin embargo, este tuvo que sustituirse por la placa debido a que el cono de extracción es mayor para estos anclajes, ya que la prueba está diseñada para un cono de extracción de aproximadamente 2 in, siendo que el del anclaje es de aproximadamente 150 mm.

Una vez instalado todo, se procede a realizar el procedimiento siguiendo la normativa ASTM C900 [91], la cual indica una velocidad de extracción de 0.5 ± 0.2 kN/s, hasta que el material falle.

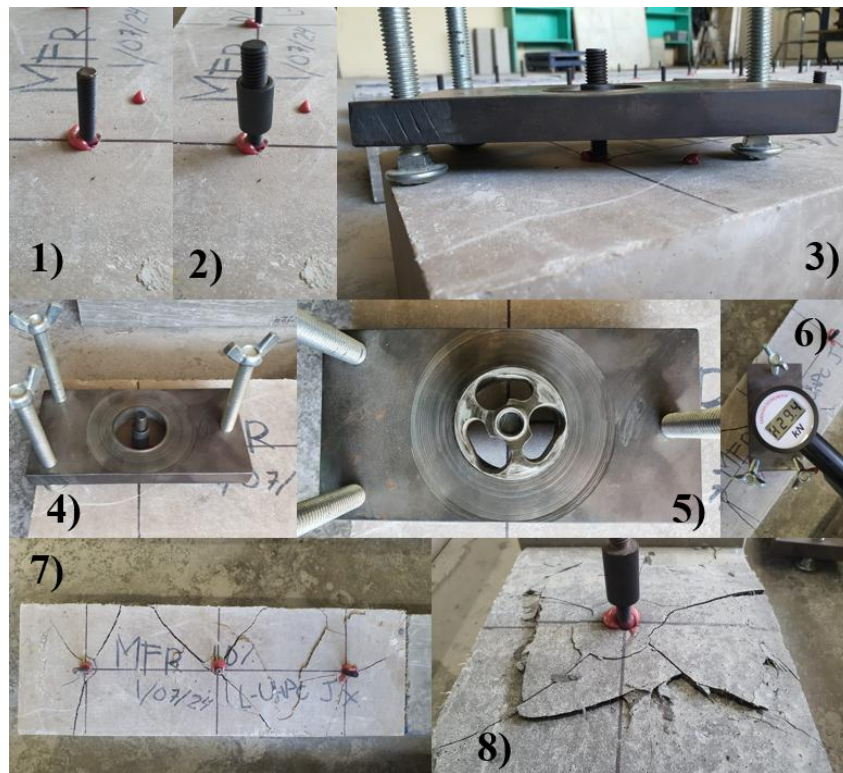


Figura 19. Secuencia de pasos para el ensaye a la extracción de los anclajes post-instalados, 1) instalación del anclaje, 2) colocación del cople, 3) posicionamiento de la placa de contrapresión, 4) nivelación de la placa, 5) colocación del aditamento para ensamblar el gato, 6) extracción del anclaje, 7 y 8) ejemplos de fallas de los anclajes.

7.7 Etapa 7. Pruebas de durabilidad y de conductividad térmica.

Para evaluar una de las propiedades fundamentales de los UHPC, se realizaron diferentes pruebas que nos indican la densificación de la matriz y, por ende, podemos conocer la permeabilidad del concreto, lo cual está relacionado con su capacidad de transporte y con ello, su durabilidad.

Para esto, se midieron la resistividad eléctrica superficial (Wenner) y bruta o bulk, así como la prueba de penetración rápida al ion cloro. Del mismo modo, fue evaluada la conductividad térmica, debido a que forma parte fundamental del análisis y valorar como influye la EPP en los valores de conductividad, así como en la durabilidad. Esto fue realizado para las mezclas sin fibras (MR, M3, M5, M8 y M10) y con fibras al 2% de sustitución en volumen (MFR, MF3, MF5, MF8 y MF10).

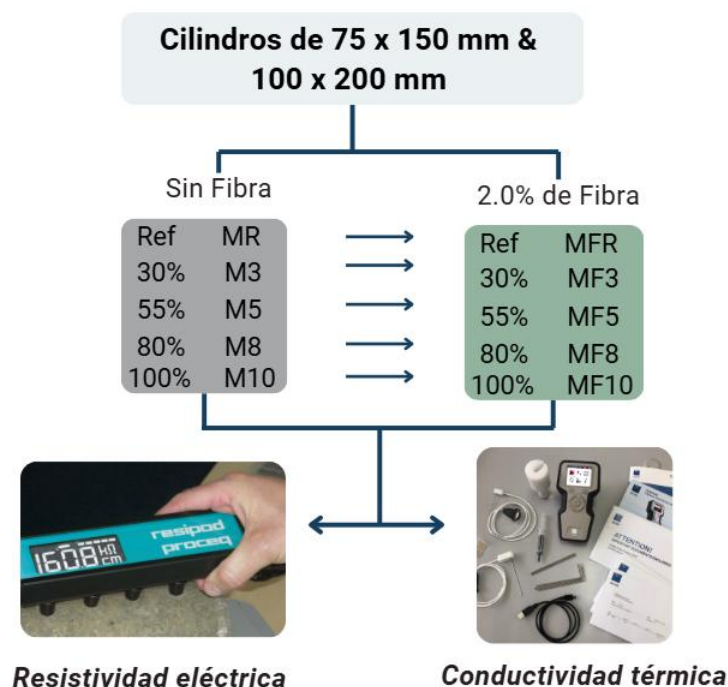


Figura 20. Diagrama de la medición de resistividad y conductividad térmica con y sin fibras.

Se realizó la prueba de resistividad bruta (AASHTO T 358 [92]) y en 4 puntos o Wener (ASTM C1876 (AASHTO TP 95 [93])) a cilindros de 100 x 200 mm, los cuales fueron fabricados con la finalidad principal de las pruebas de durabilidad. Estas pruebas serán evaluadas a diferentes edades, en donde se tienen como principales edades 7, 28 y 56 días para resistividad. Con esto, se puede ver la influencia de la EPP y fibra sintética en las lecturas y como se puede correlacionar las medidas obtenidas con la sustitución del agregado ligero.

Las lecturas de la resistividad superficial se realizaron alrededor del cilindro a cada 90° para aplicar de manera uniforme contacto de los 4 electrodos sobre el cilindro, dando un total de 4 lecturas por cilindro y utilizando un promedio para los valores, y realizando este procedimiento para generar lecturas a 3 cilindros, promediando los promedios individuales por cilindro y por triplicado para generar las gráficas correspondientes.

Para medir la resistividad bruta fue necesario sacar los cilindros del cuarto de curado y colocarlos retirar el exceso de agua para colocarlos sobre 2 electrodos metálicos y una esponja húmeda entre el cilindro y el electrodo para generar un adecuado montaje del equipo y de esta manera, se obtienen los valores mediante un solo valor por cilindro realizado a 3 cilindros para generar un promedio.



Figura 21. Resistividad eléctrica bruta (Bulk).

La prueba rápida a la penetración de Ion Cloro (RCPT por sus siglas en inglés) (ASTM C1202 [94]) se realizó con la finalidad de poder confirmar los valores obtenidos en las pruebas de resistividad, y con ello, encontrar una correlación para este tipo de concretos.

La prueba fue realizada a cilindros y núcleos (obtenidos de las pruebas de las placas), ensayados a la edad de 56 días siguiendo el procedimiento de la normativa, en donde se procedió a ponerlos en vacío 4 horas, después 1 hora sumergidos en agua y vacío, 18 horas en reposo, se armaban las celdas correspondientes con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) y cloruro de sodio (NaCl) en una concentración de 0.3M y 3% respectivamente, para dejar la prueba durante 6 horas con un voltaje de 60V. El valor obtenido de la carga total transferida (coulombs) se utiliza como un indicador de la permeabilidad del concreto al ion cloruro.



Figura 22. Pastillas cortadas de 50x100 mm para la prueba de RCPT.

Para las pruebas de conductividad térmica, se determinó por triplicado en especímenes de 75 x 150 mm y de 100 x 200 mm secos al aire a la edad de 7 y 28 días, mediante el método del calor transitorio de acuerdo con el procedimiento descrito en ASTM D5334-2 [95]. Se utilizó el equipo TEMPOS Thermal Properties Analyzer. El sensor utilizado fue el RK-3 thick single needle con un diámetro del sensor de 3.9 mm y una longitud de 60 mm para ello, los cilindros se perforaron con una broca de 3/16" (4.76 mm) para después introducir una pasta que permitió la transferencia de calor entre el sensor y el cilindro.

Se permitió que el equipo midiera por un tiempo de 10 minutos, en donde realizó primero un calentamiento y después un enfriamiento del sensor para calcular el valor de conductividad térmica.

Posterior a ello, se guardaron los valores y los promedios de los resultados se emplearon para construir las gráficas mostradas en la Figura 64. Se elaboraron y emplearon los mismos especímenes para determinar la resistividad eléctrica, y posteriormente la conductividad térmica.

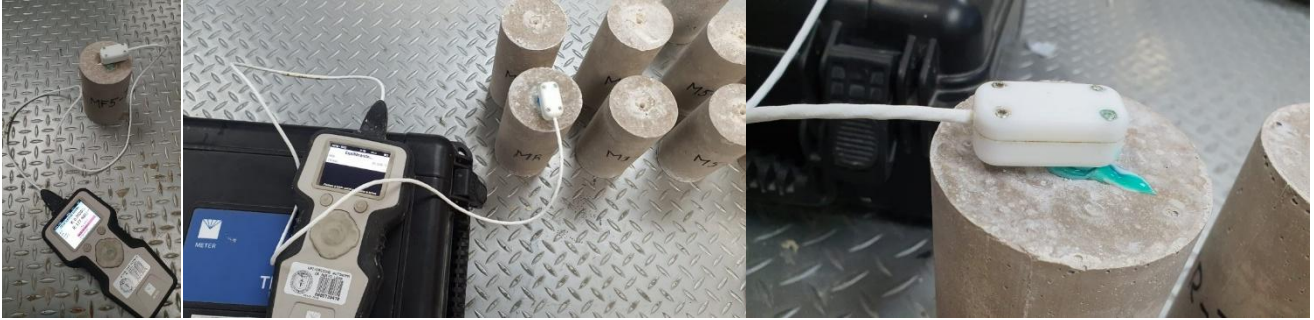


Figura 23. Prueba de conductividad térmica.

Capítulo 8. Resultados y análisis

8.1 Etapa 1. Caracterización de los materiales a emplear

Como parte de los primeros resultados se tienen la caracterización de los cementantes y los aditivos, como principales materiales a utilizar en la primera etapa.

Se determinó la densidad para ambos cementantes (CPC 30R B, CP Tipo II y MK) mediante la normativa ASTM C188 [74], con el frasco de Le Chatelier, en donde se encontró una densidad promedio de cada material. De igual manera, se realizó la caracterización física de cada uno de los aditivos mediante un picnómetro calibrado de 50 mL a una temperatura de 20 °C (ver Tabla 9).

También se determinó la distribución de tamaños de partículas de los cementantes para poder generar una curva granulométrica y ver el impacto que tiene a diferentes diámetros en porcentaje, como lo son el D10, D50 y D90.

Tabla 9. Caracterización física de los cementantes y aditivos.

Identificación del material	Densidad del material, g/cm ³	D10, μm	D50, μm	D90, μm	Contenido de sólidos, %
CPC 30R B	3.02	3.24	16.83	41.51	--
CP Tipo II	3.05	5.33	18.16	47.62	--
MK	2.577	2.89	16.66	57.27	--
Aditivo 1	1.106	--	--	--	43.260
Aditivo 2	1.124	--	--	--	47.588
Aditivo 3	1.112	--	--	--	46.325
Aditivo 4	1.119	--	--	--	50.105

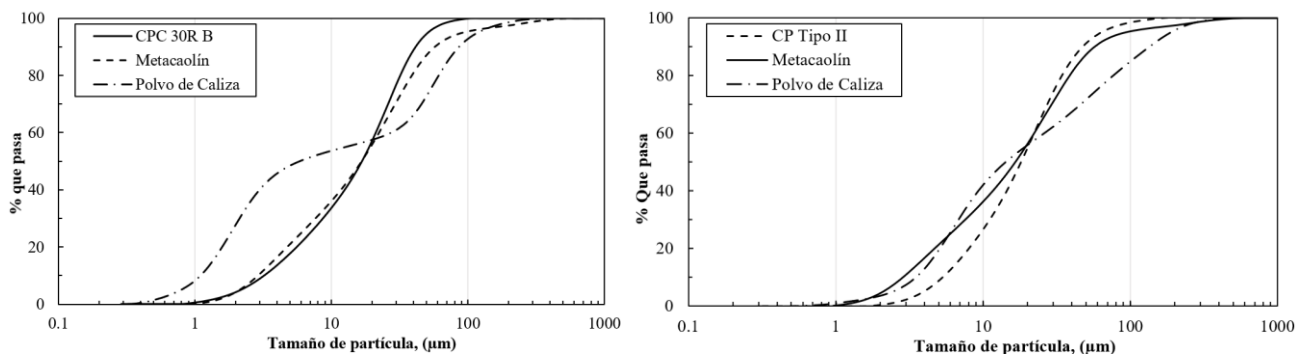


Figura 24. DTP realizado a los materiales cementantes.

En la Figura 26, se observa el procedimiento seguido por la normativa en donde se tuvo que pesar 64 g de cementante y después realizar el método de desplazamiento de volumen con queroseno.

Con los valores obtenidos, se puede observar que ambos cementos son más finos en la parte gruesa (D90) comparado contra el MK, sin embargo, el CP Tipo II es casi 2 μm más grueso en la parte central (D50) y casi 3 μm más grueso en la parte fina (D10) que los otros materiales. Destacando que el material más fino de los cementantes si es el MK.

De igual manera, se colocaron los polvos correspondientes de calcita y caliza, siendo el de calcita un material muy fino, comparado contra el polvo de caliza que se asemeja a una distribución de los cementantes.



Figura 25. Prueba de densidad al Cemento Blanco y MK.

En la Figura 27 se ilustran la obtención de la densidad y del contenido de sólidos de los aditivos superplastificantes con la finalidad antes mencionada.

Estas pruebas son indispensables para la evaluación en pastas de los aditivos, ya que se necesita para la dosificación del aditivo en masa, ya que, por ser dosis pequeñas, es más preciso dosificar y pesar en masa comparado contra volumen, en donde se puede medir con mayor error. Lo mismo sucede con el contenido de sólidos, la información es importante para hacer el ajuste del material y ver cuanto agente activo contiene cada uno, ya que lo demás es agua, y esa agua se considera agua del diseño de mezcla, para no alterar la relación a/c y que siempre se realice el ajuste dependiendo de la dosis requerida, buscando mantener fija la relación.

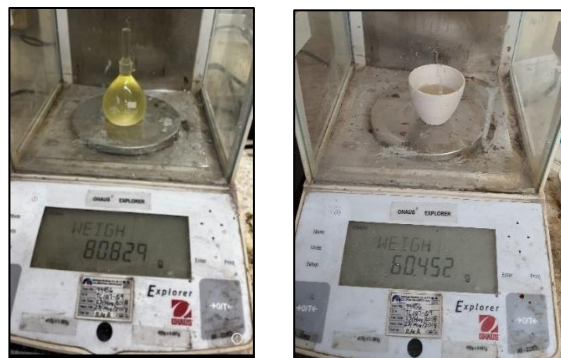


Figura 26. Densidad y contenido de sólidos del aditivo.

Como parte de la caracterización química de los cementantes, se realizó un análisis de DRX, FRX y SEM al cemento blanco y al Metacaolín que se muestran a continuación.

En el análisis de DRX de los materiales cementantes, se pueden identificar diversas fases de los cementantes y cómo éstas tendrán su relación directa con el proceso de hidratación del cemento (ver Figura 28 y 29).

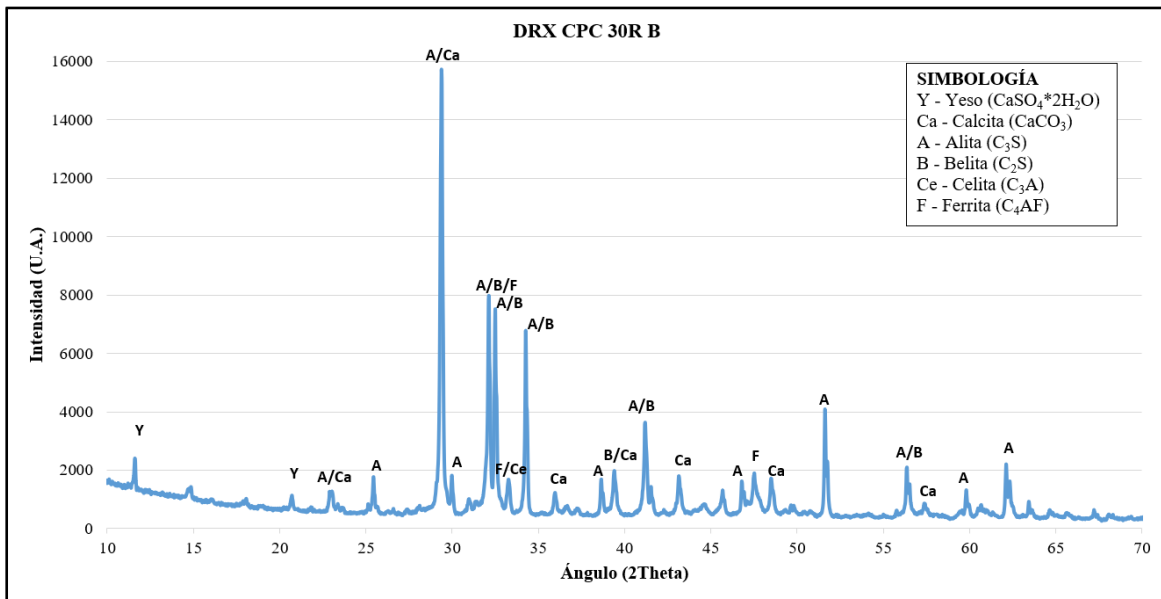


Figura 27. Difractograma mostrando las señales de los compuestos principales del CPC 30R B.

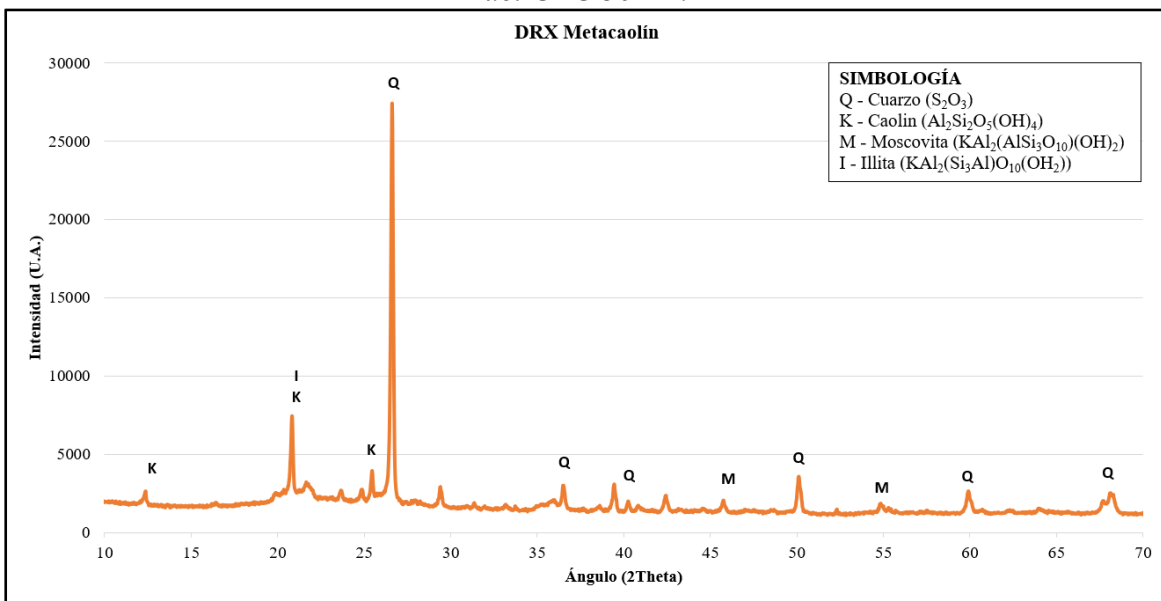


Figura 28. Difractograma mostrando las señales de los compuestos principales del MK.

Los valores que se obtuvieron mediante el análisis del FRX nos proporcionan las características químicas y así determinar la cantidad principal de cada compuesto de los cementos y del MK (ver Tabla 10), por lo que es de gran utilidad para posteriores análisis.

Tabla 10. Composición química de los cementantes.

Composición	CP Tipo II	CPC 30R B	Metacaolín
SiO_2 , %	18.971	18.499	62.518
Al_2O_3 , %	4.084	3.614	25.906
Fe_2O_3 , %	2.929	0.194	1.333

CaO, %	62.284	62.755	2.278
MgO, %	0.972	0.775	0.502
SO₃, %	3.434	4.355	0.895
Na₂O, %	0.181	0.077	0.075
K₂O, %	0.371	0.180	0.275
SrO, %	0.050	0.041	0.030
TiO₂, %	0.120	0.026	0.385
P₂O₅, %	0.057	0.065	0.147
ZnO, %	0.116	0.003	0.060
Mn₂O₃, %	0.058	0.001	2.665
Cr₂O₃, %	0.014	0.006	0.020
PPI, %	6.360	13.270	2.910

De los resultados de FRX se puede destacar la diferencia significativa en la alúmina (Al₂O₃) y el óxido de hierro (Fe₂O₃) en el CPC comparados contra el MK y el CP Tipo II. Aunque a partir de este análisis no podemos calcular los compuestos potenciales de Bogue, por un valor mínimo de Fe₂O₃, el contenido de C₃A en el CPC 30R B, será mayor, lo que típicamente conduce a afectar la reología y en consecuencia a demandar más aditivo para dar la fluidez objetivo.

Se destaca las cantidades de Si₂O y Al₂O₃ que tiene el MK, presentando una composición principalmente con óxidos de sílice y aluminio para generar las reacciones puzolánicas correspondientes. Las pérdidas por ignición (PPI) se distinguen mucho entre materiales, ya que el MK tiene el valor más bajo debido a que proviene de un material que se calcinó previamente, sin embargo, a pesar de que los cementos pasan por un proceso de clinkerización, pueden emplear pequeñas adiciones de caliza como filler en la molienda, lo que normalmente reduce el factor de clinker, pero al mismo tiempo disminuye la resistencia en algunos casos. Lo que indica que aproximadamente el CPC tiene un valor de caliza que ronda 22 a 25% y el CP Tipo II un valor que ronda 10% de caliza, indicando que el CPC tiene menos clinker comparado contra el CP.

De la misma manera, calculando el contenido de álcalis equivalentes con la siguiente fórmula:

$$\%Na \text{ equivalentes} = 0.658 * \%K_2O + \%Na_2O \quad \text{Ecuación 1}$$

Nos da un valor de 0.425 y 0.196% para el CP Tipo II y el CPC, lo cual, indica que el CP Tipo II puede cumplir con la especificación de la norma ASTM C150 que tiene un límite de 0.60%.

Para completar las caracterizaciones químicas de los cementantes, se realizó un análisis de Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) para ver las formas y la característica física del CPC, CP Tipo II y del MK (ver Figura 30).

Así mismo, se puede observar como las partículas del cemento, suelen ser más gruesas que las del MK (15 vs 3 μm aproximadamente), siendo este un factor importante, ya que la finura del material afecta la demanda de agua para la lubricación (fluidez) y en consecuencia la reología de la mezcla de concreto (ver Figura 4).

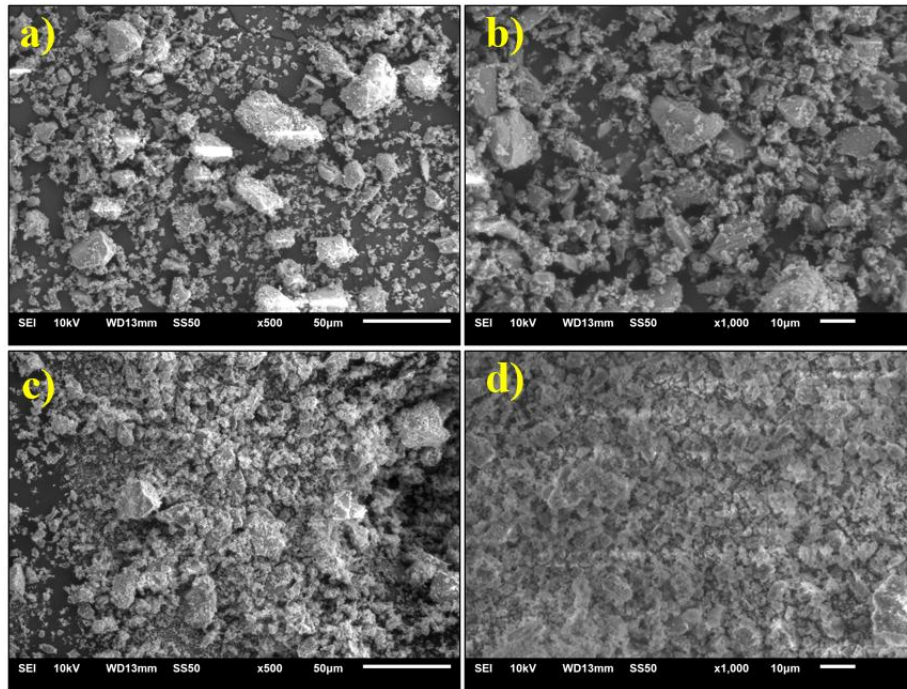


Figura 29. Micrografías con SEM del CPC 30R B (a) y b)) y MK (c) y d)) anhidros con magnificaciones de 500X y 1000X.

Así como fue importante realizar un SEM para el CPC y el MK, también se realizó un análisis para la EPP, el cual se muestra en la Figura 31 y fue de suma importancia para ver la forma de manera microscópica y determinar cómo es la superficie de este material.

Esto toma relevancia con lo mencionado anteriormente acerca del ITZ, siendo la forma un aspecto importante a tomar en cuenta, y en donde se han mencionado que incluso, con los agregados ligeros, los productos de hidratación crecen dentro del agregado, lo que no sucede en este caso, ya que la esfera es completamente cerrada, incluso no permitiendo el paso de algún agente a través de la EPP, lo que indica que el agente externo tendrá que rodear la superficie para poder avanzar, ya que hay autores que mencionan que si el agregado es triturado y muy poroso, que agentes como agua pueden pasar a través del agregado [43].

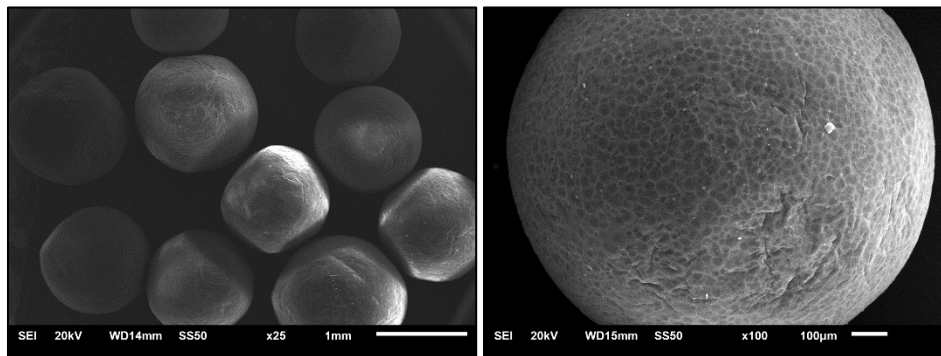


Figura 30. Micrografías de la EPP con magnificaciones de 25X y 100X [96].

La etapa 1 incluye también la evaluación de cuatro aditivos en pastas con las diferentes relaciones a/c (0.22, 0.25 y 0.28), en donde se ven las diferencias entre la compatibilidad de los aditivos con el tipo de cemento.

En la Figura 32, se ilustra el procedimiento realizado para determinar los diferentes valores de fluidez en donde es necesario aproximadamente 11 minutos de mezclado (ver Tabla 11) para lograr el mayor efecto del aditivo.

Tabla 11. Procedimiento de mezclado para pastas.

Proceso		Tiempo, hh:ss	
		Parcial	Acumulado
1	Adicionar el agua + aditivo al tazón	---	---
2	Adicionar el cementante	---	---
3	Reposar	00:30	00:30
4	Mezclar velocidad baja (Vel. 1)	02:00	02:30
5	Raspar el tazón	01:00	03:30
6	Mezclar velocidad media (Vel. 2)	03:00	06:30
7	Raspar el tazón	01:00	07:30
8	Remezclar con velocidad media (Vel. 2)	04:00	11:30
9	Hacer el procedimiento de prueba	---	---



Figura 31. Fabricación de pastas para evaluar el punto de saturación.

A continuación, se muestran las gráficas de las diferentes relaciones a/c para el CPC y CP Tipo II (ver Tabla 12) con sus respectivos aditivos comercialmente disponibles denominados como aditivo 1, 2, 3 y 4, encontrando los tiempos de flujo a través del cono en el eje vertical y la dosificación (en mL/kg de cemento) en el eje horizontal.

En la determinación de los puntos de saturación, los resultados muestran una disminución del tiempo conforme aumenta la dosis, sin embargo, solo uno muestra la mejor compatibilidad, debido a que incluso con dosis bajas (4 mL de aditivo/kg de cemento) tiene menos tiempo que los otros tres aditivos incluso con dosis elevadas (8 y 10 mL/kg de cm) (ver Figura 32).

Tabla 12. Resumen de los puntos de saturación con diferentes dosis y relaciones a/c para el CPC.

# Aditivo	Dosis, mL/kg de cemento	Tiempo de flujo para diferentes relaciones a/c, seg		
		0.22	0.25	0.28
1	4	240	125	58
	5	139	109	--
	6	116	109	48
	8	116	109	47
	10	119	103	46
2	4	240	116	58
	6	112	89	55
	8	114	76	51
	10	117	91	49
3	4	188	98	53
	6	124	85	48
	8	112	79	45
	10	109	78	45
4	4	117	76	53
	6	103	72	50
	8	100	66	46
	10	100	65	43

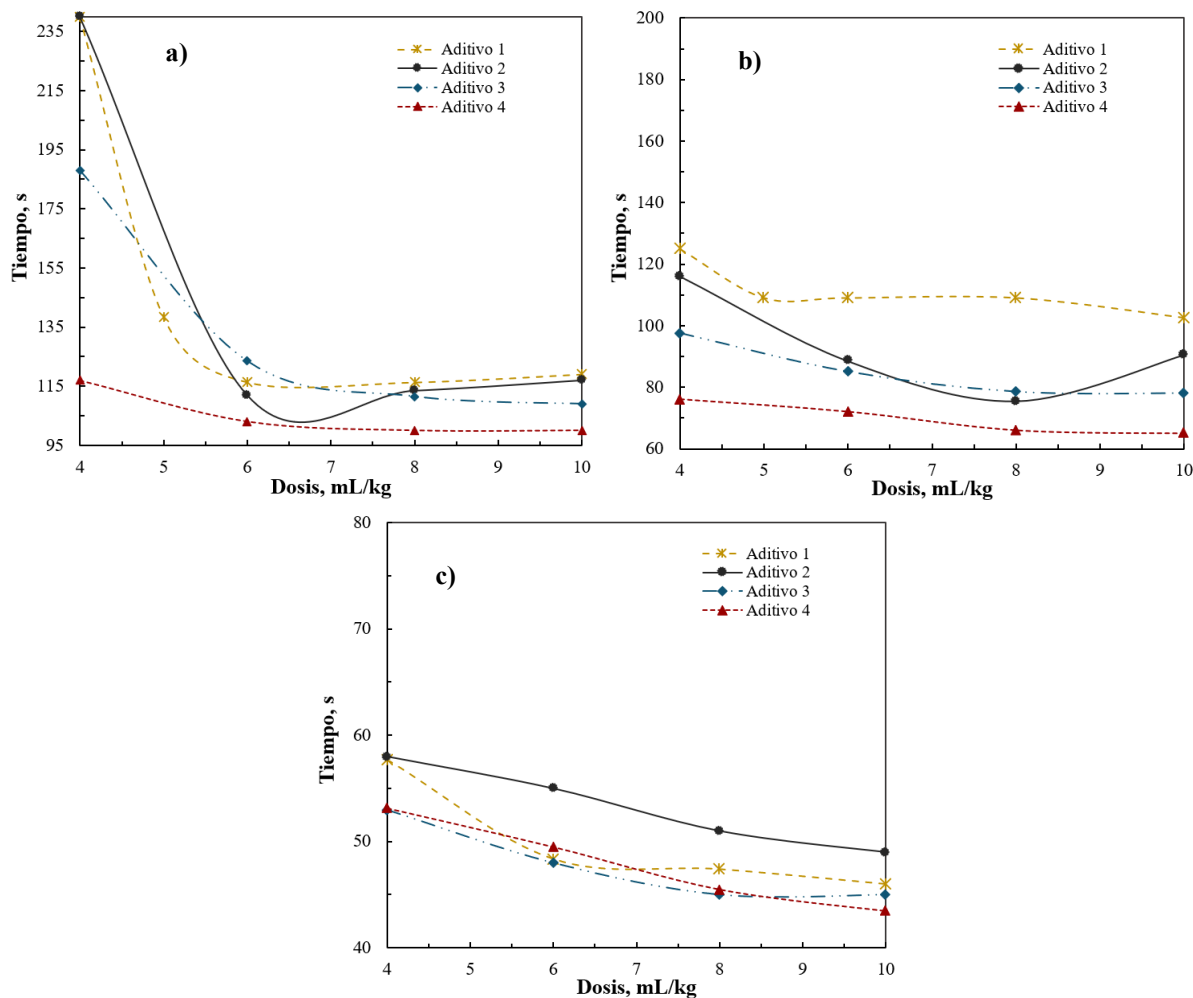


Figura 32. Punto de saturación de los 4 aditivos para un CPC 30R B a) para una relación $a/c = 0.22$, b) para una relación $a/c = 0.25$ y c) para una relación $a/c = 0.28$.

Los resultados mostraron que la mejor compatibilidad se obtuvo con el aditivo 4, siendo que incluso con dosis altas de los demás aditivos, este obtuvo mejores tiempos de fluidez. Sin embargo, la dosis que se marcaba en un punto donde no generaba cambio sería entre 6 y 8 mL, por lo que se seleccionó 8, 7 y 6 mL para las relaciones de 0.22, 0.25 y 0.28 respectivamente para fabricar los cubos de la etapa 2.

Con los valores obtenidos en las diferentes relaciones a/c y viendo la tendencia de los aditivos, solo se replicaron los aditivos con la relación más baja (0.22) debido a que marcaba mayor diferencia entre la compatibilidad de cada aditivo para el CP Tipo II (ver Tabla 13).

Los resultados fueron obtenidos desde los 4 hasta los 8 mL/kg de cemento y se pudo obtener los puntos de saturación, sin embargo, se destaca los bajos valores de tiempo del CPC vs el CP Tipo II, ya que incluso con una dosis de 4 mL, el tiempo para el CPC fue de 117 vs 148 del CP Tipo II, y que incluso con 8 mL, el CP Tipo II no iguala el tiempo que tiene con 6 mL el CPC.

Esto es importante ya que normalmente la compatibilidad entre aditivos SP con cementos blancos era limitada, pero en este caso, el CPC muestra una mejor sinergia entre aditivos y requiere menos aditivo para generar la misma fluidez que demanda con el CP Tipo II.

Tabla 13. Resumen de los puntos de saturación con diferentes dosis para una relación a/c = 0.22 para el CP Tipo II.

Aditivo #	Dosis, cc/kg de cemento	Tiempo de flujo para diferentes relaciones a/c, seg
		0.22
1	4	240
	5	125
	6	112
	8	112
2	4	240
	5	205
	6	192
	8	192
3	4	188
	5	158
	6	124
	8	116
4	4	148
	5	115
	6	106
	8	105

Con lo mencionado anteriormente, la Figura 33 solo muestra la gráfica correspondiente con los valores para una relación a/c = 0.22 y solo con valores que van desde 4 hasta 8 mL/kg de cemento. Para este cemento, se determinó que obtener una fluidez similar a la del CPC fue requerido una dosis de 8 mL, de esta manera poder tener valores que pudieran ser comparables en cuanto a medidas de fluidez.

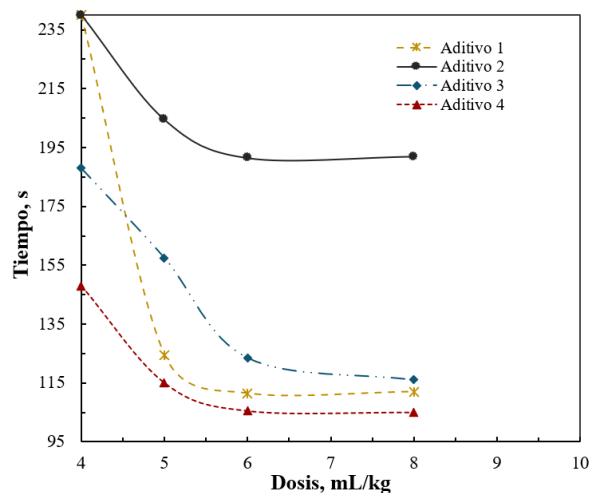


Figura 33. Punto de saturación de los 4 aditivos para un CP Tipo II para una relación a/c = 0.22.

8.2 Etapa 2. Obtención de la relación a/c óptima.

Posterior a terminar la Etapa 1, se inició con la Etapa 2 que es la fabricación de los morteros en donde se evaluarán las diferentes relaciones a/c, y así poder definir la dosis óptima de aditivo y la relación a/c.

Se realizaron 3 mezclas con diferentes relaciones a/c con cada dosis de aditivo seleccionada previamente, en donde la relación de 0.22 es la única que permitió obtener una resistencia superior a los 120 MPa a la edad de 28 días (Figura 34), por lo que será seleccionada para las siguientes fases. Los valores se muestran en la Tabla 14.

Los morteros realizados contaron con la misma cantidad de volumen de pasta dentro del mortero, esto con la finalidad de mantener este valor constante y no variar la proporción que cubrirá a la misma cantidad de arena.

Tabla 14. Valores de resistencia a la compresión con diferentes relaciones a/c para el CPC.

Mezcla	Edad	Resistencia, MPa	Desviación estándar, MPa	CV, %
0.22	3	98.9	2.0	2.0
	7	106.3	7.7	7.3
	28	120.8	2.3	1.9
0.25	3	87.0	0.3	0.3
	7	93.1	2.1	2.3
	28	113.7	3.2	2.8
0.28	3	69.0	1.3	1.9
	7	74.3	1.5	2.0
	28	81.5	0.6	0.8

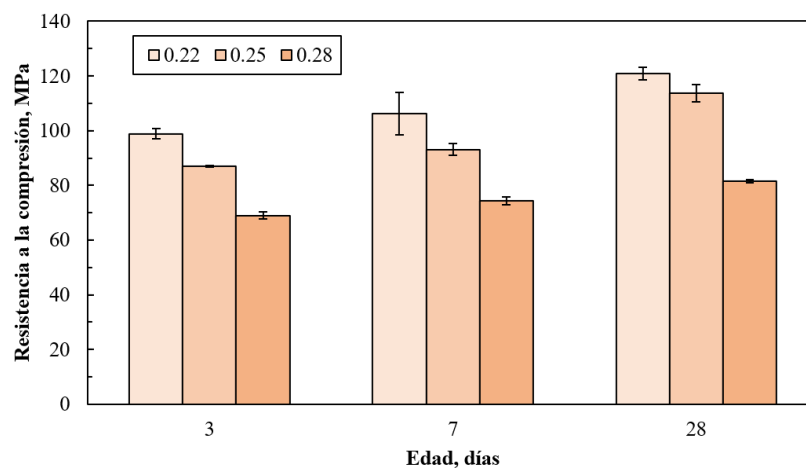


Figura 34. Resultados de resistencia a la compresión del CPC 30R B para diferentes relaciones a/c.

Los valores obtenidos muestran una alta resistencia inicial a 3 días, que van desde 69.0 hasta 98.9 MPa, comparado contra la resistencia a 28 días, los resultados rondan entre 82 y 85% de la resistencia final,

por lo que su ganancia de resistencia después de los 3 días es menor comparado contra la ganancia en las edades tempranas.

De igual manera, con base en los resultados del cemento blanco, se estableció únicamente evaluar la relación que cumplía con el mínimo de 120 MPa a 28 días para evaluarse con el cemento gris (Figura 36), de esta manera no era necesario evaluar todas las relaciones, puesto que se está comparando la misma relación a/c. Los valores individuales para esta mezcla se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Valores de resistencia a la compresión para una relación a/c = 0.22 para el CP Tipo II.

Mezcla	Edad	Resistencia, MPa	Desviación estándar, MPa	CV, %
0.22	3	94.8	3.4	3.6
	7	107.6	6.7	6.2
	28	118.0	8.4	7.1
	56	125.1	5.1	4.1

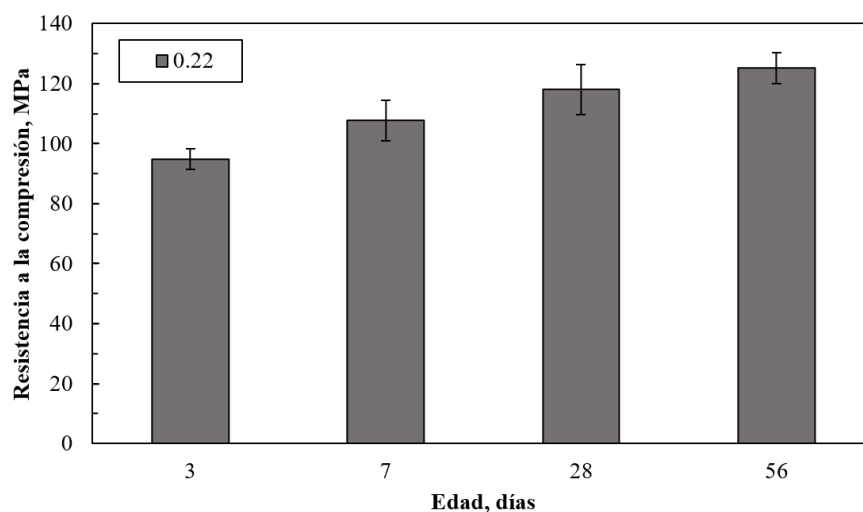


Figura 35. Resultados de resistencia a la compresión del CP Tipo II con relación a/c = 0.22.

El CP Tipo II tiene una ganancia de resistencia menor a 3 días, siendo que su valor de 3 días comparado contra la resistencia a 28 días es de aproximadamente 80%, sin embargo, ambos concretos tienen resistencias iniciales, lo que es atribuido directamente a la baja relación a/c. Esto presenta ventajas en aplicaciones como los elementos prefabricados, en donde el desmolde es un factor importante y que incluso desde los 3 días, el material se pudiera colocar y/o instalar, ya que la ganancia de resistencia a esa edad es superior al 80% beneficiando en tiempo de producción e instalación.

8.3 Obtención del porcentaje óptimo de sustitución de MK por cemento.

Como parte de la etapa 3, se realizaron las diferentes sustituciones de MK por el CPC, de manera que se realizaron 15, 20 y 25 %, dando resultados destacables a los 28 días.

Estos valores se muestran en la Tabla 16 y se grafican en la Figura 37, siendo no solo la resistencia el factor mas importante de la mezcla, sino, la fluidez y consistencia de la misma. Es por ello, que se seleccionó la sustitución de 15%, cumpliendo con los valores de resistencia y dando un buen comportamiento reológico.

Tabla 16. Resultados de las diferentes sustituciones de MK por CPC.

Mezcla	Edad	Resistencia, MPa	Desviación estándar, MPa	CV, %
15%	3	90.0	7.1	7.9
	7	104.5	5.2	5.0
	28	135.1	7.3	5.4
20%	3	89.5	4.3	4.8
	7	102.1	4.4	4.3
	28	122.6	7.6	6.2
25%	3	82.9	4.8	5.8
	7	90.0	3.0	3.3
	28	128.6	4.5	3.5

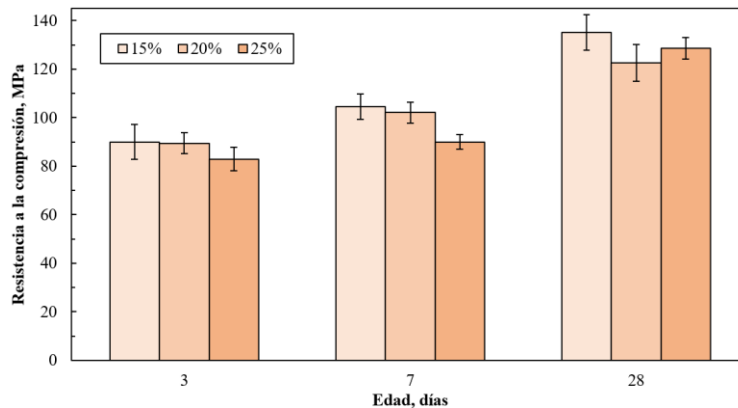


Figura 36. Resultados de resistencia a la compresión de los diferentes porcentajes de sustitución de MK.

Se puede observar como la ganancia a edades tempranas disminuye entre 9 y 16% con la sustitución de 15 a 25 % de MK por CPC, a la edad de 7 días la sustitución de 15 y 20% están similares a la referencia, pero el valor más afectado es el de 25% disminuyendo 15%, sin embargo, observando que en esas edades el efecto puzolánico todavía no se genera. Para los valores a 28 días, todas las sustituciones de MK fueron superiores a la referencia con aumentos de 11.8, 1.5 y 6.5% para los valores de 15, 20 y 25% de MK respectivamente. Esto indica un gran desarrollo puzolánico, en donde podemos ver que en todas las sutituciones se supera el 100% de Índice de actividad puzolánica (SAI).

Con la sustitución óptima del cemento blanco, se planteó la misma sustitución pero con el CP Tipo II, debido a que una menor o mayor cantidad de sustitución pudiera dar resultados diferentes y el objetivo

es comparar las matrices cementantes lo más semejantes posibles. La Tabla 17 muestra los valores en la evolución de la resistencia a la compresión hasta 56 días del CP Tipo II.

Tabla 17. Resultados de la sustitución del 15% de MK por CP Tipo II.

Mezcla	Edad	Resistencia, MPa	Desviación estándar, MPa	CV, %
15%	3	89.3	1.5	1.7
	7	108.7	0.9	0.8
	28	122.9	6.6	5.4
	56	128.6	3.5	2.8

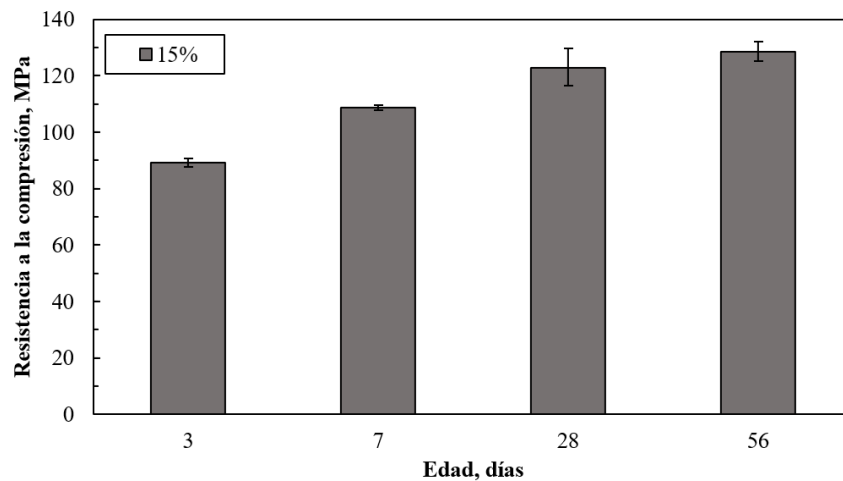


Figura 37. Resultados de resistencia a la compresión del CP Tipo II para una sustitución de 15% de MK.

La resistencia a la compresión a la edad de 28 con el 15% de sustitución de MK por CP Tipo II fue de 122.6, lo que indica un 4.15% más que la resistencia con 100% de CP, y para la edad de 56 días tiene un incremento de 2.8%, dando un valor superior con la adición por encima del 100% del SAI, lo que muestra una buena sinergia entre los cementos y el MK. El valor que se obtuvo con el CPC es superior comparado con el CP Tipo II, esperando que fuera mayor con el CP debido mayor contenido de clínker que tiene el cemento, sin embargo, pueden darse reacciones adicionales con la caliza que tiene el CPC y formar productos de hidratación de carboaluminatos, los cuáles pueden ser los responsables de ese incremento de resistencia entre cementos.

8.4 Proporciones de agregados y evaluación en estado fresco.

Para realizar la selección adecuada de la granulometría del agregado para la fase 4, se debe emplear el uso de un modelo de empaquetamiento de partículas (PPM por sus siglas en inglés), utilizando el modelo de Andreasen y Andersen Modificado, para lo cual como dato de entrada se utilizan las distribuciones de tamaño de partículas obtenidas por difracción laser, se sustituye en la Ecuación 1 y posterior a ello, se obtienen los porcentajes que pasan para graficar y poder realizar la curva objetivo, es decir se obtiene el gráfico ideal.

$$P(D) = \frac{D^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q}$$

Ecuación 2

En donde:

P(D): es una fracción del total de sólidos que son menores que el tamaño D,

D: es el tamaño de partícula en micrómetros (μm),

D_{máx}: es el tamaño máximo de partícula en micrómetros (μm),

D_{mín}: es el tamaño mínimo de partículas en micrómetros (μm),

q: es el módulo de distribución.

Los valores del módulo de distribución $q = 0.5$ vuelven las mezclas más gruesas y valores menores a 0.25 vuelve la mezcla con alto contenido de finos. En la revisión de la literatura, el coeficiente encontrado como el más óptimo es el de 0.37 [31], sin embargo, el máximo modelo de empaquetamiento no es el más adecuado, sino uno ligeramente menor que siga manteniendo un alto valor de empaquetamiento de la matriz, lo cual nos permita lograr mezclas más trabajables y no tan rocosas.

Se probaron diferentes valores de q entre 0.25, 0.30, 0.35 y 0.37 para ver cual se adaptaba mejor al agregado y la granulometría que se podía obtener, de manera que se realizaron diferentes iteraciones para llegar a los óptimos y se probó la fluidez y la cantidad de aditivo que demandaba cada mezcla, por lo que se decidió que la mezcla que contenía un valor de $q = 0.37$ era la más adecuada por la menor cantidad de aditivo y mayor trabajabilidad que permitía.

A continuación, se explica la manera de lograr la iteración mediante diferentes porcentajes de arena #4 y polvo de calcita para llegar a la granulometría objetivo de 0.25 (Figura 38), sin embargo, la denominada óptima de 0.37 requirió un menor grado de complemento o modificación de la gráfica y su implementación es más rápida.

La Tabla 18 muestra una comparativa de los valores obtenidos en fracciones como el D10, D50 y D90 para las diferentes curvas (objetivo vs reales), con ello, ver el acercamiento de las curvas ajustadas mediante el modelo de A&A modificado en estos puntos específicos.

Tabla 18. Comparativa de los D10, D50 y D90 requeridos para las curvas objetivo y los valores obtenidos con las combinaciones de arena para el CPC.

Identificación del material	D10, μm	D50, μm	D90, μm
Granulometría obj 0.25	6	430	3408
Granulometría obj 0.37	18	796	3741
Arena triturada #4	162	1345	3696
Granulometría obtenida	51	1006	3455

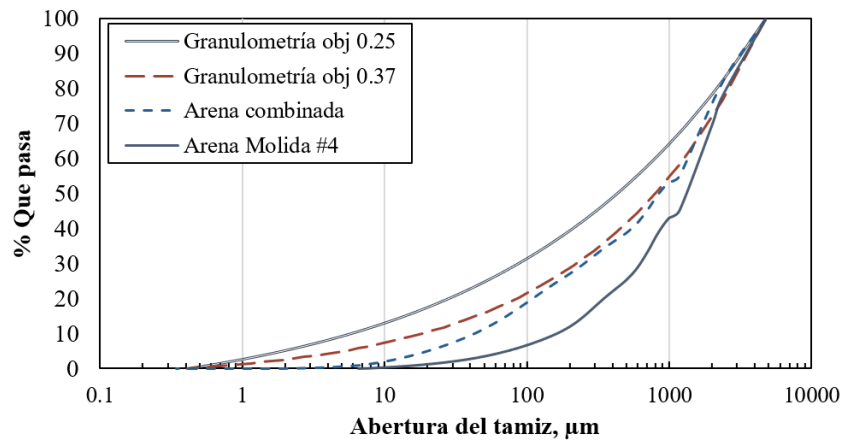


Figura 38. Comparativas de diferentes granulometrías obtenidas y la objetivo

La Figura 38, muestra la curva objetivo, en donde se comparan las diferentes arenas obtenidas, lo cual nos lleva a utilizar un material que pueda compensar la cantidad de finos que demanda la curva objetivo, modificando los porcentajes de estos materiales para adecuar un óptimo.

El agregar un material muy fino para compensar la granulometría demandaba mayor área superficial, por lo que fue requerido aumentar la cantidad de cementante y con ello, obtener una mejor fluidez del material.

Además, mediante la adición del polvo de calcita, se llegó a la conclusión que el 18% era el máximo que podía adicionarse, debido a que con mayor cantidad de este material, la mezcla no fluía, del mismo modo, era la combinación más cercana a la curva objetivo con un valor de $q = 0.37$ que permitía un adecuado comportamiento en estado fresco.

Con ello, se obtiene la curva granulométrica combinada y así se obtiene una granulometría final con la que se adecuaba más al objetivo y con ella se realizaron diferentes mezclas de prueba para determinar el comportamiento de las diferentes adiciones de los materiales para adecuar la curva y como afectan la parte mecánica y de fluidez.

Lo anterior realizado fue para el cemento blanco, debido al uso de agregado de calcita por su característica de gran blancura, sin embargo, la modificación o iteración que se tuvo con el cemento gris al usar agregado convencional de caliza, el procedimiento fue el mismo pero el agregado “grueso” que se utilizó fue una arena #5, la cual tenía gran finura, y con ello, solo requirió el 7% de material de polvo de caliza para llegar a una curva objetivo con un valor de $q = 0.25$ y con esto, una mezcla con mayor fluidez en cuanto a su comportamiento en estado fresco.

De la misma manera, la Tabla 19 muestra los valores de D10, D50 y D90 para las diferentes curvas granulométricas (objetivo vs reales).

Tabla 19. Comparativa de los D10, D50 y D90 requeridos para las curvas objetivo y los valores obtenidos con las combinaciones de arena para el CP Tipo II.

Identificación del material	D10, μm	D50, μm	D90, μm
Granulometría obj 0.25	5.8	430	3408

Arena triturada #5	6.6	637	3360
Granulometría obtenida	7.0	475	3255

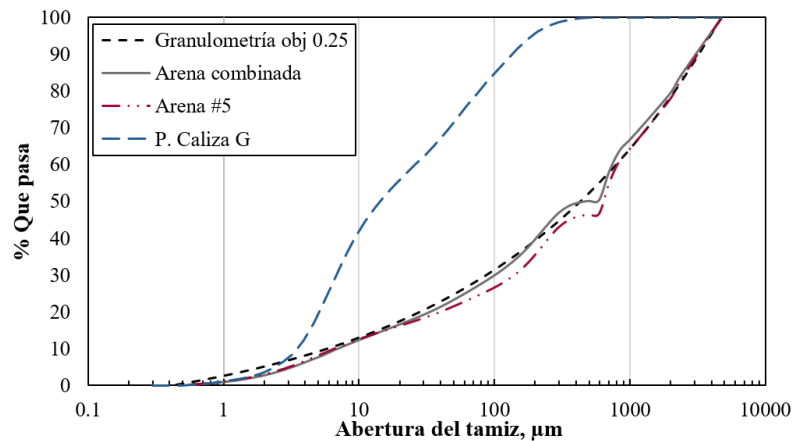


Figura 39. Granulometría final optimizada con $q = 0.25$ para el cemento gris.

La Figura 39 muestra la distribución de la arena #5, la combinación de arena más polvo y la objetivo con un $q = 0.25$ y el 7% de ajuste de polvo de caliza.

Con estos resultados de granulometrías, se determinaron diferentes resultados de resistencia a la compresión para finalizar lo correspondiente a la fase 4, para ello, la Figura 40 muestra las diversas iteraciones que se realizaron y su evaluación a 3 y 7 días para ver la evolución de la resistencia.

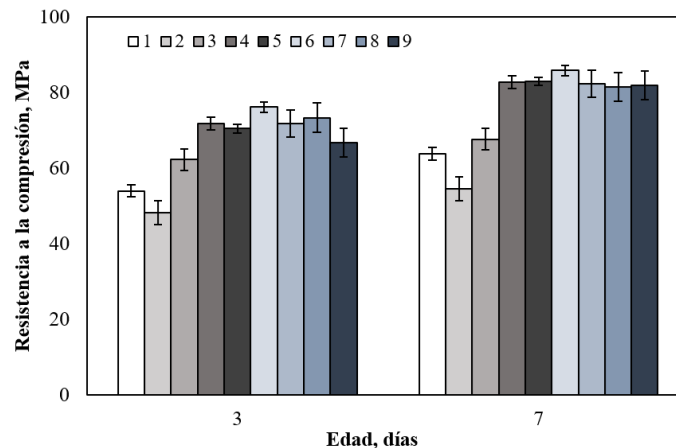


Figura 40. Diversas iteraciones para la adecuación de la mezcla definitiva.

La propiedad principal que define si un concreto puede clasificarse como UHPC es su resistencia a la compresión, pero esto depende en gran medida de la contribución del agregado, característica que cambia de manera importante alrededor del mundo, ya que esto depende de su clasificación y origen geológico. En este estudio, las mezclas evaluadas se diseñaron con base en proporciones típicas de UHPC utilizando cemento blanco y gris, arena y filler calizos provenientes del área metropolitana de Monterrey, México. Sin embargo, para cumplir con objetivos estéticos y obtener un concreto lo más blanco posible, la arena y el filler calizos fueron reemplazados por calcita blanca con tamaños de partícula equivalentes para el CPC.

Después de realizar diversas iteraciones con la mezcla de referencia del CPC, se determinó que la mezcla no estaba llegando a los valores de resistencia a la compresión obtenidos en la etapa 2, por lo que se realizaron dos mezclas, pero con agregado de caliza convencional, para ver el comportamiento del agregado de calcita comparado contra la caliza, alcanzando resistencias entre 130 y 140 MPa a los 28 días.

En la Figura 41, se tiene una comparativa de los diversos agregados y llegando a la determinación de que el agregado de calcita tiene una menor dureza dentro de la matriz comparada contra el agregado de caliza, siendo que el agregado de calcita tiene una estructura cristalina y el de caliza tiene una estructura amorfa.

Esto tiene mucha influencia para la ITZ, con base en los resultados, se puede observar una mejora significativa solo por la estructura del material, ya que ambos en cuanto a composición son carbonatos de calcio, lo que cambia es su estructura y con ello, se esperaría una mayor resistencia mecánica en las mezclas con arena caliza que fue utilizada para el CPC.

Tabla 20. Resultados de la comparativa de agregados calizos vs calcita.

Mezcla	Edad	Resistencia, MPa	Desviación estándar, MPa	CV
Calcita	3	71.8	1.3	1.9
	7	82.7	1.7	2.1
	28	84.5	2.4	2.8
Caliza 1	3	89.4	0.4	0.4
	7	105.3	6.0	5.7
	28	140.5	4.0	2.8
Caliza 2	3	84.3	3.1	3.7
	7	103.0	6.4	6.2
	28	130.3	8.0	6.1

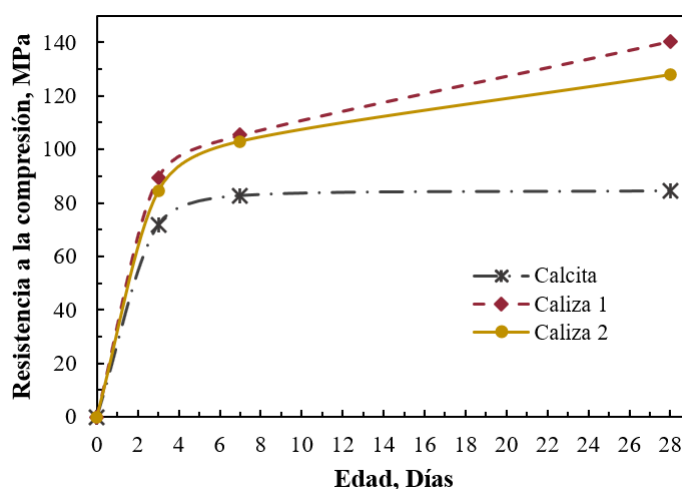


Figura 41. Comparativa entre agregados de calcita y caliza.

Siendo estos los resultados que se obtenían con el agregado de calcita y como se seleccionó este agregado por temas de color, se desarrollaron los concretos de referencia definitivos y se empezaron con las sustituciones de EPP correspondientes para la fase 5 en cada porcentaje.

Se realizaron ajustes diferentes ajustes de aditivo para las mezclas y obtener los valores objetivos de flujo de revenimiento, que se estableció para el CPC un valor de 85 ± 2.5 cm para la referencia y de 75 ± 5 cm para las mezclas con EPP y para el CP Tipo II un flujo de revenimiento de 90 ± 2.5 cm para la referencia y de 85 ± 5 cm para las mezclas con EPP.

Estos valores establecidos fueron con base en las mezclas preliminares que se realizaron, ya que las diferentes distribuciones granulométricas que tenía cada mezcla, influía en las dosis de aditivo y la fluidez que generaba, por lo que aunque la mezcla con el CPC tenía menos aditivo, el agregado generaba una mezcla muy cohesiva, comparada contra la mezcla del CP Tipo II, que aunque tenía mayor demanda de aditivo, la distribución granulométrica permitía que tuviera mayor flujo de revenimiento y agregar más aditivo a la mezcla de CPC no era viable, ya que generaba segregación en las mezclas de referencia y por ende en las mezclas con EPP.

Con las adiciones de EPP, fue necesario ajustar cada dosificación de aditivo de acuerdo al incremento de EPP, por lo que se obtuvieron los siguientes datos que generan una gráfica para poder obtener una aproximación de valores entre el flujo de revenimiento y T50 para cada dosificación de EPP, esto debido a que la forma de la partícula de la EPP es redondeada, lo que ayuda a la fluidez, así como mantener una viscosidad adecuada que permitiera obtener una mezcla homogénea y no se generara una segregación inversa (ver Tabla 21 y 22).

Tabla 21. Valores de flujo de revenimiento y T50 para el CPC.

ID	EPP, %	Dosis de aditivo, mL/kg de cemento	Flujo de revenimiento, cm	T50, seg
Referencia	0	9	82	6.7
M3	30	8.5	78	19.3
M5	55	7.5	73	29.7
M8	80	6.8	70	36.0
M10	100	5.2	69	42.8

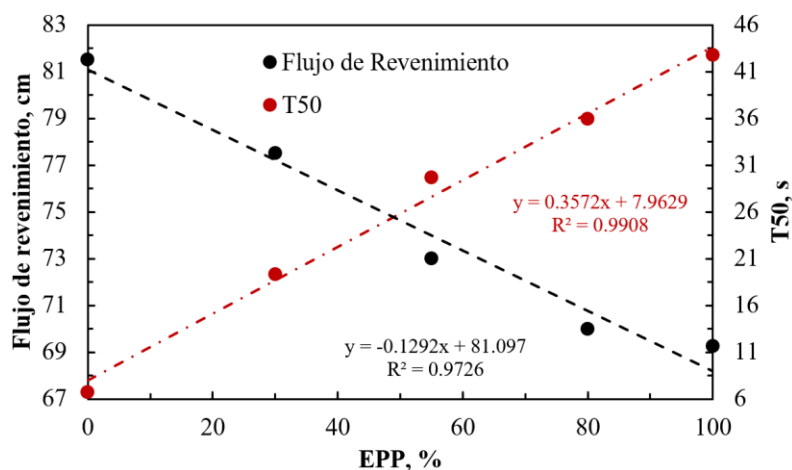


Figura 42, Influencia de la adición de EPP en el flujo de revenimiento y el T50 para el CPC.

Con los valores obtenidos en la Tabla 21, se logró generar una correlación lineal con base en la influencia de la cantidad de EPP en el flujo de revenimiento y el T50, con lo que se obtienen valores de R^2 de 0.9726 y de 0.9908 respectivamente. En ambas correlaciones, la influencia de la cantidad de EPP juega un papel importante para la disminución del flujo de revenimiento y el aumento en el T50 que indica también un aumento en la viscosidad relativa.

Tabla 22. Valores de flujo de revenimiento y T50 para el CP Tipo II.

ID	EPP, %	Dosis de aditivo, mL/kg de cemento	Flujo de revenimiento, cm	T50, seg
Referencia	0	10	90	17.7
M3	30	8.0	89	24.8
M5	55	6.5	88	29.3
M8	80	6.0	86	31.0
M10	100	5.5	87	31.3

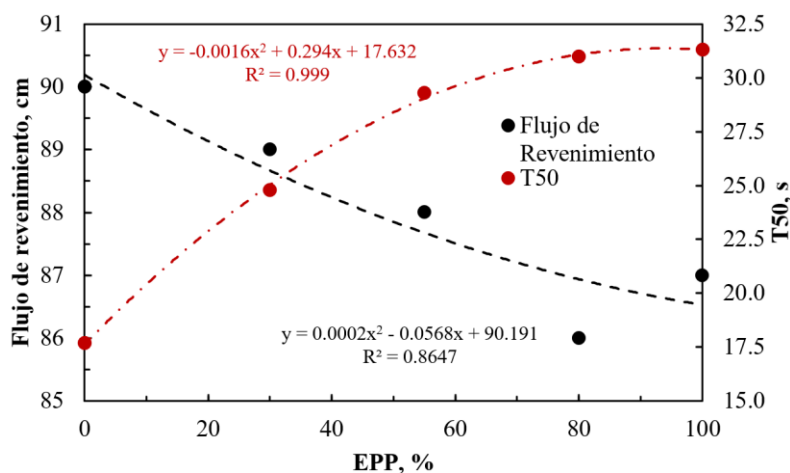


Figura 43. Influencia de la adición de EPP en el flujo de revenimiento y T50 para el CP Tipo II.

Con los valores obtenidos en la Tabla 22, se logró generar una correlación exponencial con base en la influencia de la cantidad de EPP en el flujo de revenimiento y el T50, con lo que se obtienen valores de R^2 de 0.8647 y de 0.999 respectivamente, destacando como en ambas gráficas, conforme incrementas el valor de EPP, se tiene que disminuir la dosis de aditivo, por lo cual, el flujo de revenimiento disminuye y la viscosidad aumenta.

Así mismo, el diseño que se tenía sin fibras fue adecuado bajo la misma premisa de obtener una fluidez adecuada, para ello, con cada adición de fibra se incrementó la dosis de aditivo SP a razón de 0.5 mL/kg de cementante en la mayoría de las dosis, sin embargo, el incremento o ajuste no fue necesario para todas las mezclas, por lo que se muestran los valores obtenidos de cada ajuste y como repercutía el incremento de fibra en 0.5% y con ello, la dosis de aditivo.

Se puede observar que la Figura 44 muestra una linealidad casi en todas las mezclas, a excepción de la mezcla M8 que demanda más aditivo en la dosificación de 1.0% de fibra, siendo que, de ahí en adelante todas tienen un incremento lineal y paralelo espaciado equitativamente entre ellas, observando que el incremento de fibra de 0.5% incrementa el aditivo de manera lineal.

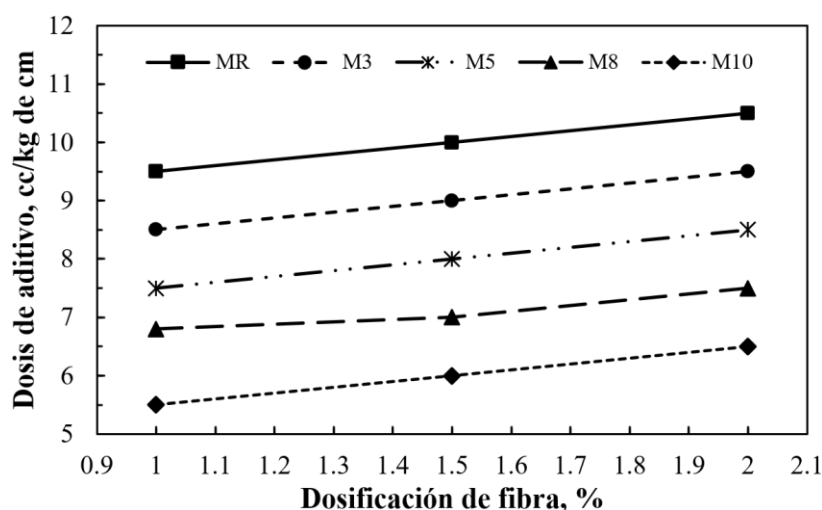


Figura 44. Incremento de la dosis de aditivo con respecto a la dosificación de fibra para el CPC.

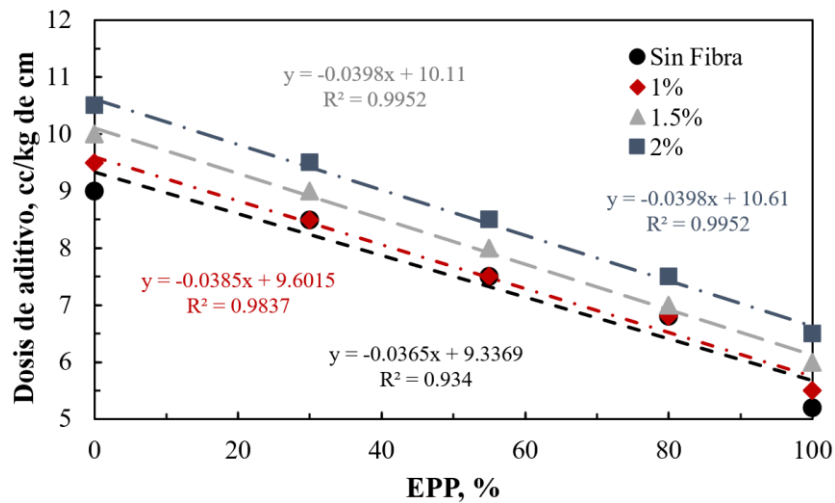


Figura 45. Correlación entre la cantidad de fibra y la cantidad de EPP para todas las mezclas con CPC.

La Figura 45 muestra una correlación para las diferentes mezclas (sin fibra y con 1.0, 1.5 y 2.0% de fibra), en donde se tiene una influencia principal por el incremento de EPP, pero al mismo tiempo, el incremento de fibra demanda mayor dosis de aditivo en casi todas las mezclas comparadas contra el diseño que no tiene fibra.

En la Figura 46, podemos observar como la dosis para la MFR demanda una dosis de aditivo superior a la MF3, siendo esto importante, porque indica como la influencia de tan solo el 30% de EPP en la mezcla, ayuda a reducir la demanda de aditivo en 2.5 mL/kg de cementante. Lo mismo ocurre para la mezcla MF8 con 80% de EPP, la cual disminuye 1.5 mL de aditivo comparado contra la mezcla MF5.

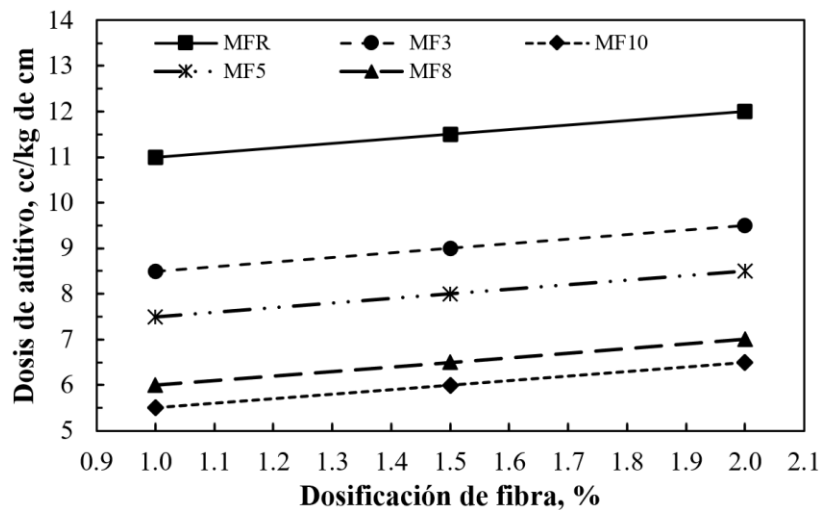


Figura 46. Incremento de la dosis de aditivo con respecto a la dosificación de fibra para el CP Tipo II.

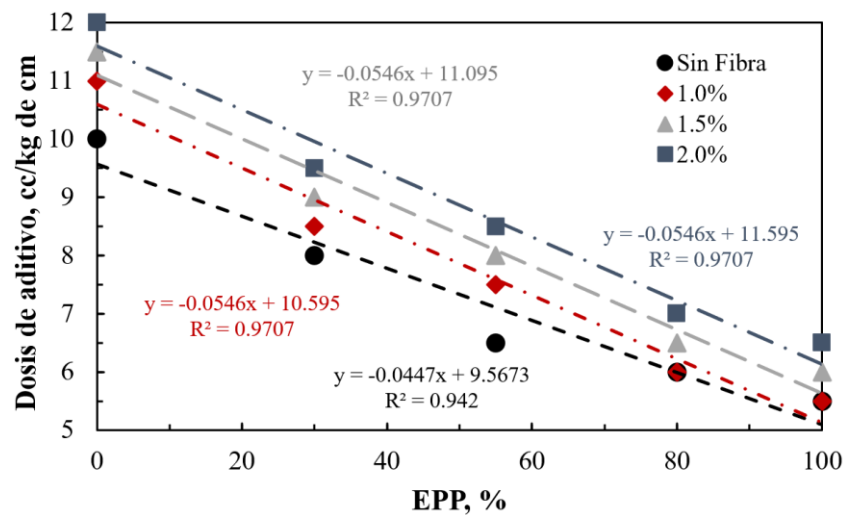


Figura 47. Correlación entre la cantidad de fibra y la cantidad de EPP para todas las mezclas con CP Tipo II.

La Figura 47 muestra una correlación para las diferentes mezclas (sin fibra y con 1.0, 1.5 y 2.0% de fibra) para el CP Tipo II, en donde se tiene una influencia principal por el incremento de EPP, pero el incremento de fibra demanda mayor dosis de aditivo en casi todas las mezclas comparadas contra el diseño que no tiene fibra, sin embargo, podemos observar que el comportamiento con fibras es paralelo y equidistante entre las correlaciones, sin embargo, los valores sin fibras demandan menos aditivo, y esto puede deberse a que adicionar valores como 2.0 % de fibra puede incrementar hasta 2 mL de aditivo a la mezcla gracias a la demanda de área superficial de la mezcla y la misma distribución de la fibra.

Un aspecto relevante en la dosificación del aditivo es la demanda de este por m^3 , siendo que algunos autores usan dosis muy altas de SP [43], la dosis más alta empleada para el CPC fue de 12 mL/kg de cementante, el cual, da un valor de 11.8 kg/ m^3 , logrando reducir de manera significativa el costo del concreto por m^3 , ya que el aditivo es uno de los aspectos que eleva el precio debido a su gran demanda.

8.5 Evaluación de los niveles de densidad.

El desarrollo de los diferentes niveles de densidad de UHPC-L tiene como principal característica que se mantengan las características de durabilidad, por lo que la disminución de la resistencia fue notable (ver Tabla 23), pero se pudo conservar el aspecto de durabilidad, esto permite generar más información para clasificar este tipo de concretos como materiales innovadores que todavía no existe mucha información al respecto.

Tabla 23. Resistencia a la compresión en cubos de 100x100 mm para todas las sustituciones de EPP para el CPC.

Mezcla	Edad	Resistencia, MPa	Desviación estándar, MPa	CV, %
Referencia	3	61.9	1.3	2.1
	7	69.0	0.3	0.4
	28	73.0	0.5	0.6

	56	76.6	6.7	8.7
30%	3	46.5	1.1	2.4
	7	48.8	2.0	4.1
	28	52.2	1.3	2.4
	56	58.0	0.6	1.0
55%	3	33.0	0.5	1.4
	7	40.2	0.5	1.1
	28	44.4	0.3	0.8
	56	50.0	1.2	2.4
80%	3	16.3	0.3	1.9
	7	20.0	0.5	2.7
	28	23.8	0.3	1.1
	56	27.0	2.3	8.7
100%	3	13.4	1.8	13.8
	7	17.0	0.3	1.9
	28	19.5	0.4	2.0
	56	22.0	1.0	4.7

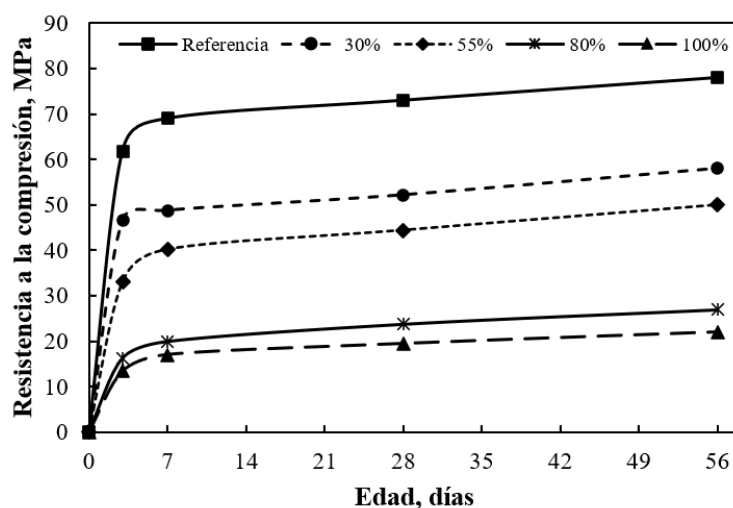


Figura 48. Evaluación de diferentes porcentajes de EPP en la resistencia a la compresión.

La Figura 48 muestra la disminución de la resistencia a la compresión en función de la adición de EPP, por lo que una sustitución del 100% (M10) representa una cuarta parte de la resistencia con la mezcla de referencia.

Otro aspecto importante para destacar es la mínima evolución de la resistencia que puede generar este concreto con el CPC, ya que al ser una clase R, alcanza una resistencia de 10 MPa menos de la resistencia especificada a 28 días (30 MPa), por lo que su resistencia inicial es elevada. Sumado a esto la dureza del agregado, podemos ver que el incremento de la resistencia se limita, sin embargo, se tienen grandes resultados incluso con la sustitución de 100% de EPP.

Los valores a 3 días representan aproximadamente el 80% de la resistencia que se obtendrá a 56 días (ver Figura 49), por lo que, si tiene una alta resistencia inicial, típica de este tipo de concretos debido a la baja relación a/c.

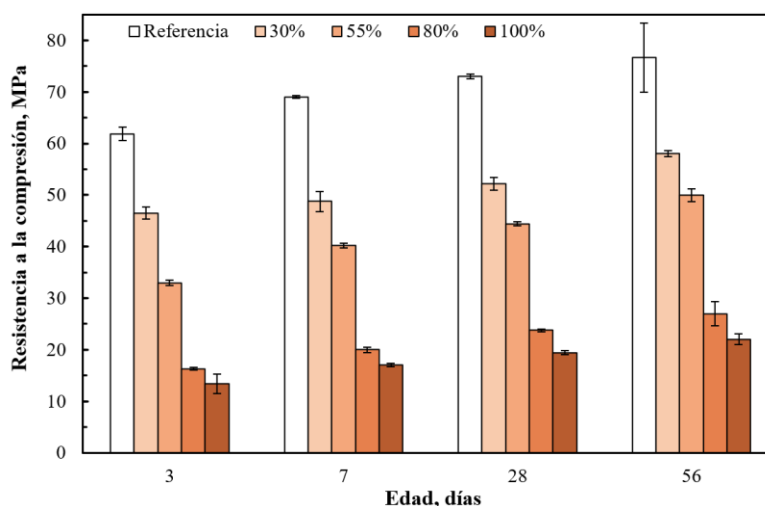


Figura 49. Evolución de la resistencia a la compresión con el CPC.

Como se muestra en la Figura 49, la mayor disminución de la resistencia a la compresión se presentó en la mezcla con 100% EPP, que alcanzó 22 MPa a los 56 días. Cabe destacar que esta mezcla cumplió con el requisito estructural mínimo de 17 MPa, que establece el reglamento de construcción ACI 318-19 [41], para aplicaciones estructurales.

Los resultados de resistencia a la compresión a diferentes edades tienen un mayor cambio en la mezcla de referencia, siendo que conforme se adiciona la EPP el incremento de resistencia es menor, lo que puede indicar que la adición de EPP en la matriz permite que la resistencia a la compresión no se desarrolle como lo haría con un agregado de peso normal. Esto sucede en la resistencia a la compresión que reporta Dixit et. Al. [12], ya que tiene un comportamiento similar en donde la variación es mínima entre los resultados de 7 y 28 días en las mezclas con mayor sustitución de EPP.

Así mismo, se obtuvieron los resultados del módulo de elasticidad y resistencia a la compresión comparados con la adición de EPP. La Figura 51 muestra la correlación obtenida y que el comportamiento es similar ante ambas pruebas.

A los 56 días, la mezcla de referencia (0% EPP) alcanzó un módulo de elasticidad estático de 72.3 GPa para el CPC, y como era de esperarse, la incorporación de EPP condujo a reducciones significativas. Como se muestra en la Figura 51, el módulo disminuyó de manera lineal, con una reducción promedio de 0.57 GPa por cada 1% de reemplazo de calcita por EPP.

Tabla 24. Valores del módulo de elasticidad para las diferentes mezclas a 56 días para el CPC.

Mezcla	Edad	Módulo de elasticidad, GPa
Referencia	56	72.3

30%		50.1
55%		29.9
80%		23.6
100%		15.1

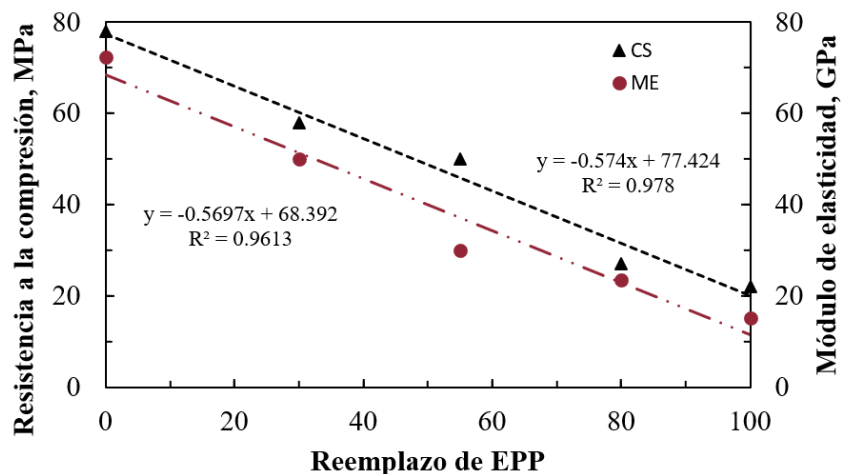


Figura 50. Efecto de la adición de EPP en la RC y ME para el CPC.

La Figura 50 muestra el efecto de la adición de EPP en diferentes valores y como afecta la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad estático, sin embargo, el decremento es lineal y cuenta con valores de R^2 de 0.978 y de 0.9613 respectivamente.

Al mismo tiempo, se caracterizó el CP Tipo II con las mismas proporciones de sustitución de EPP por agregado calizo, con lo que se pudieron obtener los siguientes resultados mostrados en la Tabla 25.

El CP Tipo II tiene una menor resistencia a edades tempranas, pero su ganancia de resistencia a edades posteriores es superior a la del CPC, pero entre los 7 y 56 días, se observa claramente la contribución puzolánica del metacaolín (MK) (ver Tabla 25), con incrementos graduales en la resistencia de 0.2 y 0.1 MPa respectivamente.

Tabla 25. Resistencia a la compresión en cubos de 100x100 mm para todas las sustituciones de EPP para el CP Tipo II.

Mezcla	Edad	Resistencia, MPa	Desviación estándar, MPa	CV, %
Referencia	3	89.9	2.9	3.2
	7	104.1	1.9	1.8
	28	113.8	7.5	6.6
	56	124.0	5.6	4.5
30%	3	43.4	2.1	4.9
	7	55.6	0.6	1.2
	28	58.7	2.3	3.9

	56	61.2	1.9	3.0
55%	3	26.9	0.2	0.7
	7	33.9	1.5	4.5
	28	35.8	0.8	2.1
	56	35.7	2.5	6.9
80%	3	16.4	0.5	2.8
	7	20.1	0.7	3.7
	28	23.9	0.4	1.8
	56	25.7	1.9	7.4
100%	3	10.5	0.8	7.3
	7	14.4	1.0	7.0
	28	17.6	0.8	4.7
	56	19.6	0.6	2.9

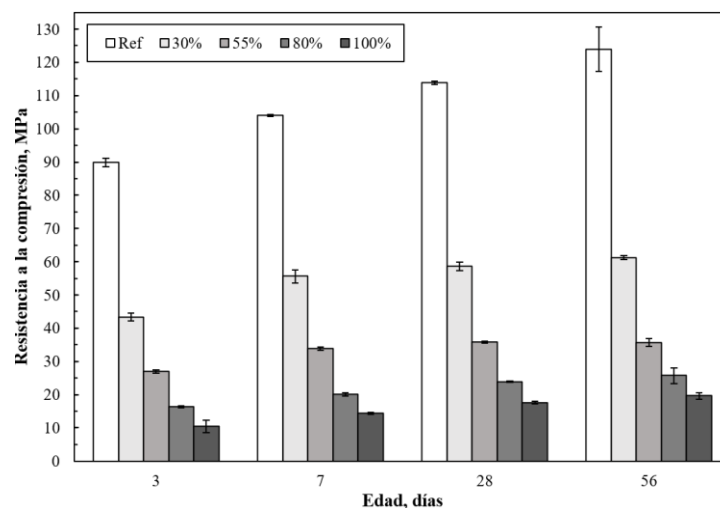


Figura 51. Evolución de la resistencia a la compresión con el CP Tipo II.

En la Figura 51 se puede apreciar como la mezcla de referencia si permitió obtener <120 MPa, pero algo que es destacable es la diferencia que se genera entre la mezcla de referencia y la mezcla con 30% de EPP, ya que los demás valores tienen una disminución gradual, pero la principal diferencia se ve en esas mezclas.

Lo anterior se destaca debido a que a pesar del buen resultado de la resistencia a la compresión de la mezcla de referencia, lo máximo que puede obtenerse con 30% de EPP es de 61.2 MPa, lo cual permite seguir obteniendo concretos de alto comportamiento, sin embargo, no tiene una disminución significativa en la densidad para poder obtener un resultado que beneficie en términos de conductividad térmica.

Tabla 26. Valores del módulo de elasticidad para las diferentes mezclas a 56 días para el CP Tipo II.

Mezcla	Edad	Módulo de elasticidad, GPa
Referencia	56	55.3
30%		40.6
55%		26.4
80%		17.1
100%		11.5

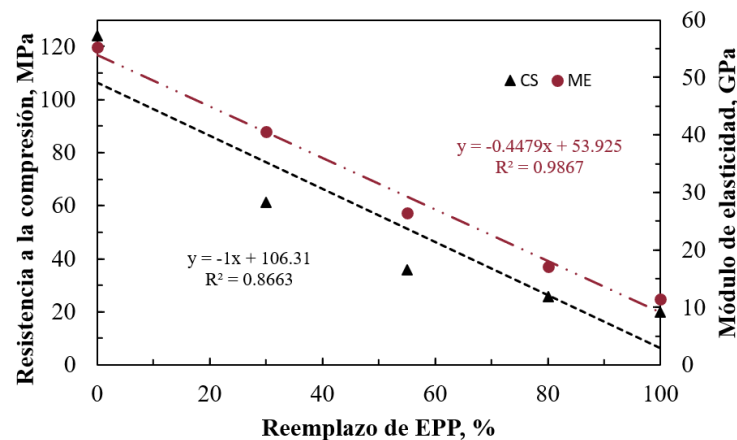


Figura 52. Efecto de la adición de EPP en la RC y ME para el CP Tipo II.

El decremento del módulo de elasticidad es de 0.45 GPa por cada 1% de incremento de EPP, comparado contra el CPC, el cuál tiene un decremento mayor, indicando que las mezclas con CPC tienen una mayor rigidez, que no necesariamente proviene de la resistencia a la compresión debido a la influencia del agregado, pero puede atribuirse al contenido de cemento que este puede tener, el cual, generará una mayor rigidez y fragilidad en la matriz comparada contra el CP Tipo II.

Así mismo, la Figura 52 muestra las correlaciones entre el reemplazo de EPP y la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad, obteniendo valores de R^2 de 0.8663 y 0.9867 respectivamente para el CP Tipo II. El valor de la correlación con el CPC es mayor que con el CP Tipo II debido a que el valor de la mezcla de referencia juega un papel importante dentro de la estimación, sin embargo, podemos ver como el módulo de elasticidad mantiene una buena correlación en ambos cementos con valores de $R^2 > 95\%$.

8.6 Evaluación de diferentes dosificaciones de fibra sintética (PVA)

8.6.1 Resistencia a la flexión

Una vez obtenidos los valores mecánicos de resistencia a la compresión y ME para un concreto sin fibras, se determina el comportamiento y la óptima dosis de fibra para las diferentes matrices a través de la prueba de tenacidad y anclaje que se evalúan en la fase 6.

En pruebas de vigas de concreto fibro-reforzado a flexión, durante la etapa de esfuerzos residuales, tras la aparición de la primera fisura, pueden observarse dos tipos de comportamiento conocidos como:

ablandamiento por deformación, típico en concretos convencionales reforzados con fibras, y endurecimiento por deformación, característico de concretos de alta resistencia reforzados con fibras. En estos, la mecánica de fractura involucrada depende de factores como el tipo de fibra, el volumen dosificado, la relación de aspecto y la adherencia con la matriz. En este sentido, al tratarse de concretos de ultra-alta resistencia, las curvas carga–deformación que aparecen en las Figuras 54 y 55 muestran tres fases claramente diferenciadas: la primera fase muestra la carga máxima correspondiente a la primera fisura, en la segunda fase inicia una etapa de endurecimiento por deformación atribuible a la acción sinérgica por adherencia entre las fibras y la matriz cementante en el plano de la fisura inducida por la carga de prueba (ver Figura 53); y la tercera fase el inicio cuando termina la segunda fase y en el cual, el esfuerzo es principalmente conducido por la resistencia de los filamentos de la fibra que cierran la fisura, y el módulo de elasticidad del material del que están fabricadas las fibras.



Figura 53. Falla típica de una viga ranurada al centro del claro.

En la Tabla 27 y 28 se colocan los valores de las tres fases para el CPC y el CP Tipo II respectivamente, en donde A es la carga a la primera grieta, B es el máximo esfuerzo en la fase de endurecimiento por deformación y C es el último punto de deformación medido cuando ya existe un ablandamiento por deformación.

Tabla 27. Comparativa de diferentes puntos de la gráfica en diferentes reemplazos de EPP para el CPC.

% de EPP	ID Mezcla	A		B		C	
		P, N	CMOD, mm	P, N	CMOD, mm	P, N	CMOD, mm
0 (Referencia)	MFR 1.0%	6818	0.06	2135	1.50	882	4.00
	MFR 1.5%	5915	0.07	3235	0.98	1262	
	MFR 2.0%	6379	0.09	4660	0.95	1288	
30 %	MF3 1.0%	4439	0.07	2754	0.97	749	4.00
	MF3 1.5%	4613	0.08	3660	1.32	1881	
	MF3 2.0%	4250	0.09	4654	1.43	2462	

55 %	MF5 1.0%	2589	0.09	2623	1.41	1289	4.00
	MF5 1.5%	2925	0.10	3124	1.58	1741	
	MF5 2.0%	3707	0.11	4503	1.79	2825	
80 %	MF8 1.0%	2486	0.10	2172	1.72	1255	4.00
	MF8 1.5%	2177	0.11	2106	1.53	1487	
	MF8 2.0%	2300	0.07	4485	1.85	2921	
100 %	MF1 1.0%	1667	0.07	1756	0.21	947	4.00
	MF1 1.5%	1904	0.07	2763	0.62	1855	
	MF1 2.0%	2003	0.09	3122	0.55	2355	

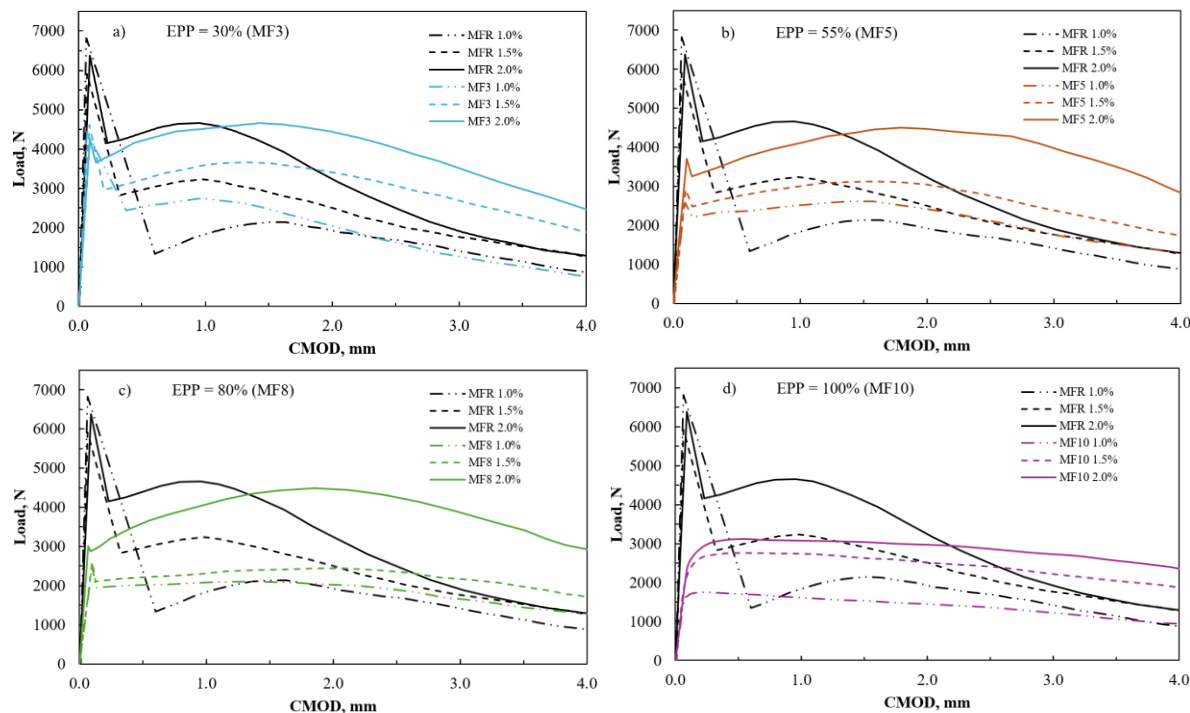


Figura 54. Resultados de la prueba de carga vs CMOD para las diferentes sustituciones de EPP para el CPC.

Las Figuras 54 y 55 presentan las comparaciones del desempeño a flexión entre la mezcla de referencia (R, 0% EPP) y las cuatro mezclas con sustituciones de calcita y caliza por EPP (de 30, 50, 80 y 100 %, identificadas como MF3, MF5, MF8 y MF10). Para las tres dosificaciones de fibras (1.0, 1.5 y 2.0% en volumen), las cargas promedio correspondientes a la primera fisura ocurrieron en valores de CMOD de 0.06–0.11 mm. El promedio de las cargas en la primera grieta fue de 6,371 N (R, 0% EPP), 4,434 N (MF3, 30% EPP), 3,074 N (MF5, 55% EPP), 2,232 N (MF8, 80% EPP), y 1,858 N (MF10, 100% EPP), con variaciones de ± 450 N, ± 180 N, ± 500 N, ± 155 N, y ± 165 N, respectivamente. Estos resultados

mostraron reducciones progresivas de 30%, 52%, 64%, y 71% para MF3, MF5, MF8, y MF10, en comparación con la mezcla de referencia (R), lo cual es directamente atribuible a la nula contribución de la EPP en la resistencia a la compresión.

Para las dosificaciones de 1.0% de fibra, las cargas correspondientes al final de la etapa de endurecimiento por deformación muestran un comportamiento superior para las mezclas MF3, MF5 y MF8, que presentaron resultados superiores a los de la mezcla de referencia, con incrementos del 29.0 %, 23.0 % y 1.7 %, respectivamente. Por otro lado, la mezcla M10 presentó una disminución del 17.8 %. En esta etapa de la prueba y para esta dosificación de fibra, en las gráficas se puede observar que para los desplazamientos de la abertura de la boca de la grieta (CMOD por sus siglas en ingles), las deformaciones presentan valores de que se sitúan entre 0.21 y 1.72 mm.

Para la dosificación de fibra del 1.5 % y en relación con la mezcla de referencia, las cargas correspondientes al final de la etapa de endurecimiento por deformación muestran un desempeño superior de 13.14 % solo para la mezcla MF3, ya que las mezclas MF5, MF8 y MF10 presentaron reducciones del 3.4, 34.9 y 14.6 %, respectivamente. En esta etapa de la prueba y para esta dosificación de fibra, estos gráficos muestran que las deformaciones presentan valores de CMOD entre 0.62 y 1.58 mm.

Para la dosis de fibra del 2.0 % y en relación con la mezcla de referencia, las cargas correspondientes al final de la etapa de endurecimiento por deformación muestran un desempeño inferior para las mezclas MF3, MF5, MF8 y M10, ya que presentaron reducciones del 0.13, 3.40, 3.76 y 33.00 %. En esta etapa de la prueba y para esta dosificación de fibra, estos gráficos muestran que las deformaciones presentan valores de CMOD que se encuentran entre 0.55 y 1.85 mm.

Para la dosificación de fibra del 1.0 % y para un CMOD de 4 mm, las cargas correspondientes al final de la etapa de ablandamiento por deformación fueron un 15.08 % menores para la mezcla MF3, y 46.15, 42.49 y 7.37 % mayores para las mezclas MF5, MF8 y MF10, respectivamente.

Para la dosificación de fibra del 1.5 % y para un CMOD de 4 mm, en todos los casos las cargas correspondientes al final de la etapa de ablandamiento por deformación fueron superiores en un 49.05, 37.96, 17.83 y 46.99 %, para las mezclas MF3, MF5, MF8 y MF10, respectivamente. En cuanto a la dosificación de fibra del 2.0 % y para un CMOD de 4 mm, al final de esta etapa, en relación con la mezcla de referencia correspondiente, los incrementos fueron del 91.15, 119.33, 126.79 y 82.84 %, para las mezclas MF3, MF5, MF8 y MF10, respectivamente. Estos incrementos representan un aumento significativo de la capacidad de absorción de energía cuando el material está sometido a tensiones por flexión, un beneficio atribuido principalmente a las fibras.

Tabla 28. Comparativa de diferentes puntos de la gráfica en diferentes reemplazos de EPP para el CP Tipo II.

% de EPP	ID Mezcla	A		B		C	
		P, N	CMOD, mm	P, N	CMOD, mm	P, N	CMOD, mm
0	MFR 1.0%	4259	0.07	3593	0.79	273	4.00

(Referencia)	MFR 1.5%	4180	0.07	5594	1.32	314
	MFR 2.0%	4515	0.03	6325	0.67	770
30	MF3 2.0%	3760	0.05	7303	1.00	1544
55	MF5 2.0%	4067	0.07	6312	0.74	2025
80	MF8 2.0%	3319	0.07	5430	0.75	2674
100	MF1 2.0%	2597	0.08	3899	0.83	1865

Con base en la mezcla de referencia para el CP Tipo II y las mezclas con CPC, se tomó la decisión de solo evaluar la dosificación de 2.0% en las mezclas con EPP, de esta manera, solo se evaluaría la cantidad más alta de fibra y compararlo contra la referencia.

Para las tres dosificaciones de fibras para el CP Tipo II, las cargas promedio correspondientes a la primera fisura ocurrieron en valores de CMOD de 0.03–0.07 mm. El promedio de las cargas en la primera grieta fue de 3,818 N (R, 0% EPP), 3,760 N (MF3, 30% EPP), 4,067 N (MF5, 55% EPP), 3,319 N (MF8, 80% EPP), y 2,597 N (MF10, 100% EPP). Estos resultados mostraron reducciones progresivas de 17%, 6%, 27%, y 42% para MF3, MF5, MF8, y MF10, en comparación con la mezcla de referencia (R), lo cual es directamente atribuible a la nula contribución de la EPP en la resistencia a la compresión.

Para la dosis de fibra del 2.0 % y en relación con la mezcla de referencia, las cargas correspondientes al final de la etapa de endurecimiento por deformación, la mezcla MF3 es la única que muestra un desempeño superior a la referencia, siendo que las demás muestran un desempeño ligeramente menor para las mezclas MF5, MF8 y con una disminución importante para la mezcla M10, ya que presentaron reducciones del 115.5, 0.20, 14.1, 38.4% respectivamente. En esta etapa de la prueba y para esta dosificación de fibra, estos gráficos muestran que las deformaciones presentan valores de CMOD que se encuentran entre 0.67 y 1.00 mm.

En cuanto a la dosificación de fibra del 2.0 % y para un CMOD de 4 mm, al final de esta etapa, en relación con la mezcla de referencia correspondiente, los incrementos fueron del 200, 262, 347 y 242 %, para las mezclas MF3, MF5, MF8 y MF10, respectivamente. Estos incrementos representan un aumento significativo de la capacidad de absorción de energía cuando el material está sometido a tensiones por flexión, un beneficio atribuido principalmente a las fibras y logrando obtener una mejora aun cuando el concreto ya fallo y el esfuerzo solo depende de la adherencia entre las fibras y la matriz cementante.

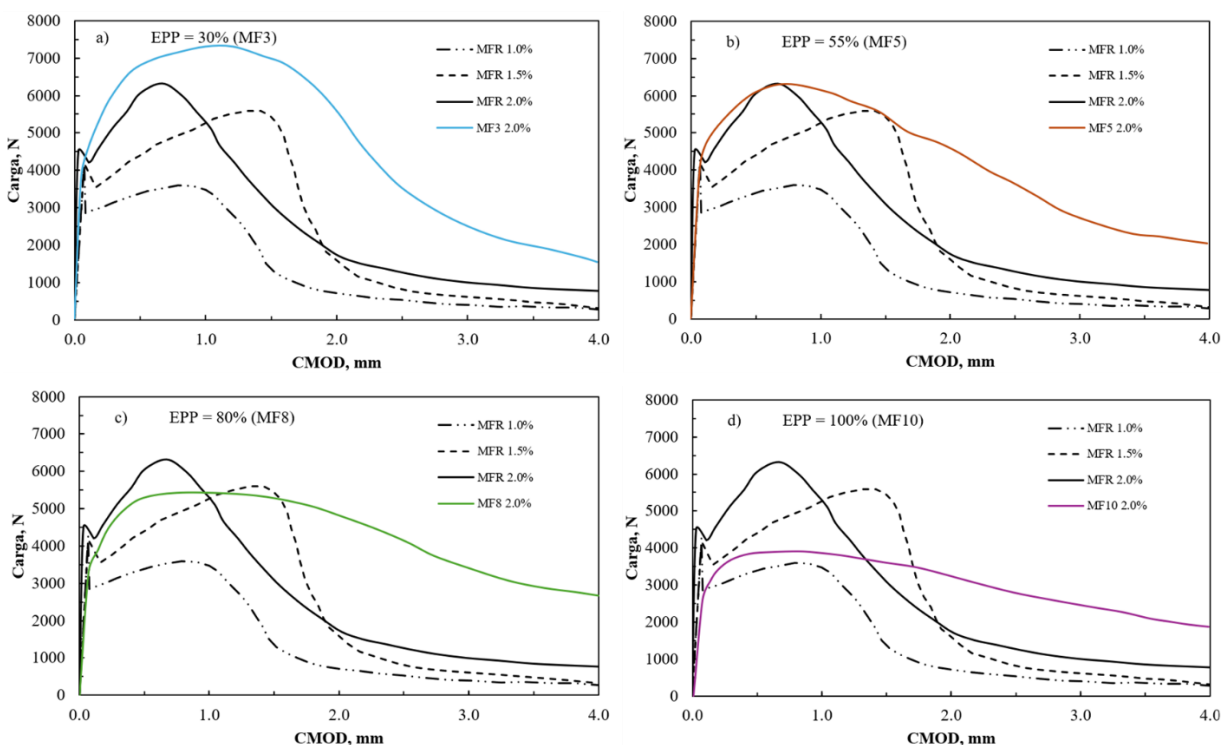


Figura 55. Resultados de la prueba de carga vs CMOD para las diferentes sustituciones de EPP para el CP Tipo II.

La influencia dentro de la matriz de los diferentes porcentajes de fibra se vuelve de suma importancia, ya que esto, de igual manera tiene influencia con la ITZ, la cual, de acuerdo con la interacción entre la matriz cementante, la fibra puede tener diferentes comportamientos, es decir, puede tener un beneficio como aumento en el comportamiento post-agrietamiento gracias al agregado y la matriz cementante.

Un aspecto para tomar en consideración es como las vigas del CPC tienen un fallo, una ligera disminución de la resistencia y después empieza el endurecimiento por deformación, comparado contra el CP Tipo II, ya que no se nota cuando el concreto tiene su falla en la primera grieta e inicia el endurecimiento por deformación (en cuanto a valores de carga), por que esto es notable en el valor de la abertura medida por el CMOD.

Esto puede estar relacionado con la rigidez de la matriz comparada anteriormente con el módulo de elasticidad, lo cual, tiene mayor módulo de elasticidad las mezclas con CPC, destacando que las mezclas que tienen un comportamiento similar entre los diferentes cementos, es la mezcla MF10, en donde ambas cuentan con un módulo de elasticidad similar de 15.1 y 11.5 GPa para el CPC y CP Tipo II respectivamente, y el comportamiento post-agrietamiento es similar, tienen un ligero endurecimiento por deformación manteniendo casi en toda la prueba la carga.

La Figura 54 y 55 muestra como aún con la diferencia de densidades, las matrices mantienen el mismo comportamiento mecánico post-agrietamiento, el cual es importante en este tipo de concretos, por lo que se puede decir que se mantiene un desempeño adecuado en todas las sustituciones de EPP correspondientes al CPC y el CP Tipo II.

8.6.2 Resistencia a la extracción de anclajes post-instalados.

El mismo protocolo de fabricación y desmolde fue aplicado para los especímenes de 600x200x100 mm, los cuáles fueron seleccionados para la prueba de anclajes post instalados, de esta manera, se simulaba con especímenes de mayores dimensiones que pudieran ser más representativos en este ensaye.

Tabla 29. Resultados de la influencia las diferentes dosis de fibra para las mezclas con CPC.

% de EPP	1.0%		1.5%		2.0%	
	Resistencia a la extracción, KN	Desviación Estándar, KN	Resistencia a la extracción, KN	Desviación Estándar, KN	Resistencia a la extracción, KN	Desviación Estándar, KN
0 (Referencia)	27.7	1.3	29.5	0.7	31.7	1.3
30	25.2	0.9	27.4	0.6	30.3	0.9
55	23.0	0.2	26.3	0.4	29.4	1.1
80	22.1	0.1	25.1	0.5	28.0	0.7
100	22.2	0.1	23.3	0.8	24.2	0.7

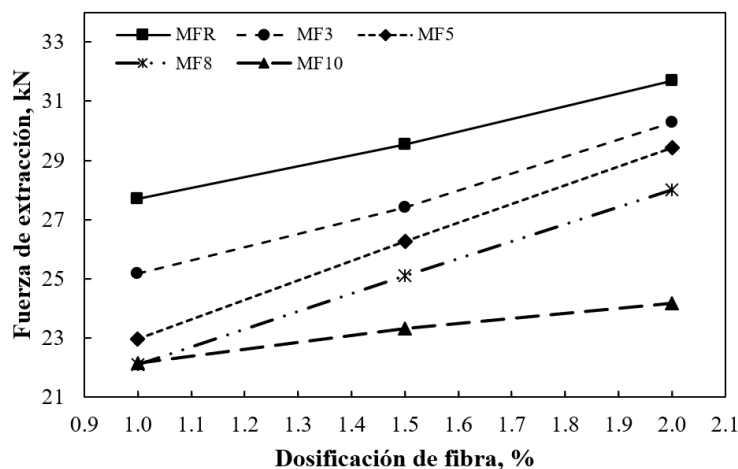


Figura 56. Influencia de la resistencia al anclaje con diferentes dosificaciones de fibra de PVA para el CPC.

La Figura 56 muestra los resultados de resistencia a la extracción de anclajes post-instalados, en esta grafica se percibe claramente la reducción en la resistencia a la extracción conforme aumenta la sustitución de agregado de caliza por EPP, con resistencias en el rango de 22.1 a 31.7 kN. Para el cemento blanco los valores en porcentaje entre los diferentes valores de EPP se encuentran entre 9 y 20 % para los concretos con 1 % de fibra y entre 7 y 21 % para los concretos con 1.5 % de fibra y entre 4 y 24%

para 2.0% de fibra. En el caso del cemento gris, en su mayoría las resistencias fueron superiores a las del cemento blanco, con resultados en un rango de 18.0 a 42.5 kN (ver Tabla 30).

Para una dosificación de 1 % de fibra las mezclas MF3 y MF5 presentaron resistencias superiores a la mezcla MFR en 9 y 22 %, superioridad que mantiene solo la mezcla MF3 en 7% para la dosificación de 1.5 % de fibra. En el caso de la dosificación de fibra del 2.0 %, para el cemento gris todas las mezclas con EPP presentaron reducciones entre 7.4 y 45.2 % con relación a la mezcla MFR. Las reducciones muestran la influencia del aumento de dosis de fibra de PVA en la matriz de concreto, y como mejora su capacidad a la adherencia de estos elementos.

Para las dosificaciones de fibra entre 1 y 2 %, la Figura 56 exhibe claramente que, para el cemento blanco, la resistencia a la extracción aumenta en todos los casos para las mezclas MFR, MF3, MF5, MF8 y MF10 en 4.0, 5.1, 6.5, 5.9 y 2.0 kN por cada 1 % de incremento de fibra, lo cual representa incrementos de 14, 20, 28, 27 y 9 %. Para el caso del cemento gris (ver Figura 57) estos incrementos fueron de 18.4, 10.0, 8.7, 9.2 y 4.3 kN o 77, 34, 33, 41 y 23 % respectivamente. Estos resultados son muy significativos y difíciles de encontrar en la literatura, ya que muestran claramente la aportación de las fibras y la mejor adherencia que proporciona el cemento gris con agregado de caliza, en relación con el cemento blanco con agregado de calcita.

Por otro lado, es importante destacar el mejor desempeño de la mezcla MF3 con dosificaciones de fibra de 1.0 y 1.5 %, y de la mezcla MF5 con una dosificación de fibra del 1.0 % comparado con la mezcla de referencia, lo cual se atribuye al trabajo sinérgico de la matriz cementante, el agregado de caliza y la fibra, ya que en las pruebas con cemento blanco no se presentó este comportamiento, lo cual se atribuye a una adherencia entre la matriz y la fibra y a que la calcita es menos resistente y más frágil que la caliza.

Tabla 30. Resultados de la influencia las diferentes dosis de fibra para las mezclas con CP Tipo II.

% de EPP	1.0%		1.5%		2.0%	
	Resistencia a la extracción, KN	CV	Resistencia a la extracción, KN	CV	Resistencia a la extracción, KN	CV
0 (Referencia)	23.9	1.1	32.0	0.3	42.3	1.3
30	29.1	1.3	34.3	1.3	39.2	0.8
55	26.2	0.2	29.7	0.5	34.9	1.8
80	22.7	0.5	27.7	0.7	31.9	0.6
100	18.8	1.1	20.7	0.5	23.2	0.6

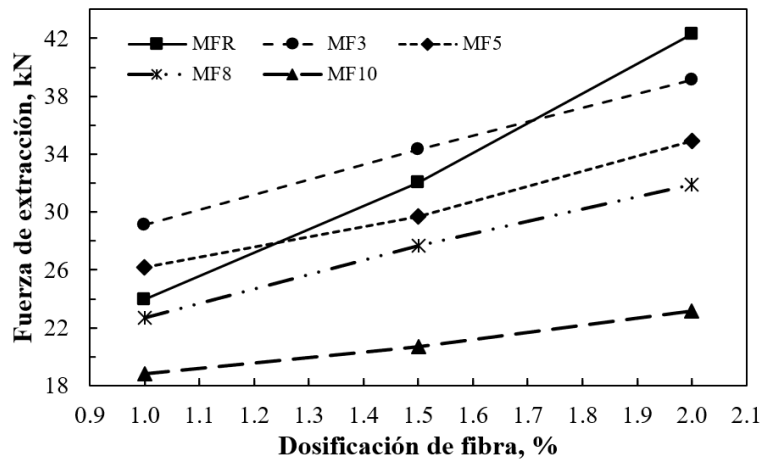


Figura 57. Influencia de la resistencia al anclaje con diferentes dosificaciones de fibra de PVA para el CP Tipo II.

8.7 Pruebas de durabilidad y de conductividad térmica.

8.7.1 Resistividad eléctrica superficial y bruta o volumétrica (SER y BER)

En la última etapa de evaluación correspondiente a la fase 7, se desarrollaron las pruebas de durabilidad, en donde se desarrollan las pruebas de resistividad eléctrica (superficial y bulk), las cuales están correlacionadas con la permeabilidad del ion cloruro, así mismo, se realizó la prueba rápida a la penetración de ion cloro para generar la correlación entre estos valores y poder garantizar los valores.

La resistividad eléctrica es un indicador de durabilidad que refleja el nivel de densificación de la matriz cementante, dado por la porosidad, la distribución de poros y su tortuosidad. Cuanto más densa es la matriz, mayor será la resistividad y en consecuencia mayor será la resistencia al ingreso de agentes que pueden deteriorar el concreto como los iones cloruro, sulfatos, el CO₂ y la humedad, entre otros.

La Tabla 31 muestra los límites para la resistividad eléctrica Bulk de acuerdo con la AASHTO T 358, de esta manera, poder clasificar los valores obtenidos de acuerdo con la normativa.

Tabla 31. Rangos para la resistividad eléctrica superficial de acuerdo con AASHTO T 358 [x].

Resistividad eléctrica superficial	Probabilidad de corrosión
> 254	Despreciable
37-254	Muy baja
21-37	Baja
12-21	Moderada
< 12	Alta

Tabla 32. Rangos para la resistividad de acuerdo con ASTM C1876 (AASHTO TP 95, 2014) [x].

Resistividad eléctrica bruta (bulk)	Probabilidad de corrosión
-------------------------------------	---------------------------

< 4	Alta
4 – 8	Moderada
8 – 16	Baja
16 – 190	Muy baja
> 190	Insignificante

La Figura 58 y 59 presentan los resultados de resistividad superficial (SER) y resistividad volumétrica (BER) obtenidos en especímenes cilíndricos ($\varnothing 100 \times 200$ mm). Los resultados de la SER (Fig. 58) demostraron mínimas variaciones a lo largo de los diferentes niveles de sustitución de EPP, con valores principales de $51.6 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ (rango: $-5.4/+3.3$), $68.2 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ (rango: $-4.9/+9.6$), y $79.5 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ (rango: $-5.4/+8.0$) a los 7, 28, y 56 días respectivamente. Estos resultados confirman que el reemplazo de la calcita por EPP (0-100% vol.) tiene efectos insignificantes estadísticamente ($p > 0.05$) en la SER, mostrando de manera consistente muy baja susceptibilidad a la penetración del ion cloruro en todas las mezclas ($37 < \text{SER} \leq 254 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$) por la clasificación de la ASTM C1876 (AASHTO TP 95, 2014).

De manera similar, las mediciones de la BER (Fig. 59) muestran una estabilidad comparable, registrando valores de $170.3 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ (rango: $-10.3/+7.4$), $235.5 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ (rango: $-16.9/+12.8$), y $282.4 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ (rango: $-28.1/+34.6$) a las edades equivalentes. Con estrechas desviaciones estándar ($\pm 15\%$ de valores medios) clasificándolos con un riesgo de penetración insignificante ($\text{BER} > 190 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$). Los resultados ilustran que, a pesar de la pérdida de resistencia por la incorporación de EPP, la matriz cementante mantiene la microestructura densa característica de los concretos UHPC [44].

Tabla 33. Análisis de los valores y desviación estándar de los resultados de resistividad superficial para el CPC.

Mezcla	Edad	Resistividad superficial, $\text{K}\Omega \cdot \text{cm}$	Desviación estándar, $\text{K}\Omega \cdot \text{cm}$	CV, %
0 (Referencia)	7	54.9	1.0	1.8
	28	77.8	0.6	0.7
	56	87.6	1.7	1.9
30	7	52.6	1.0	2.0
	28	70.8	0.8	1.1
	56	84.9	2.1	2.5
55	7	52.9	0.9	1.8
	28	63.2	2.0	3.1
	56	75.4	1.6	2.2
80	7	51.3	0.7	1.4
	28	65.6	0.6	0.9
	56	75.7	1.3	1.7
100	7	46.2	1.5	3.2
	28	63.4	1.9	3.0
	56	74.2	1.9	2.6

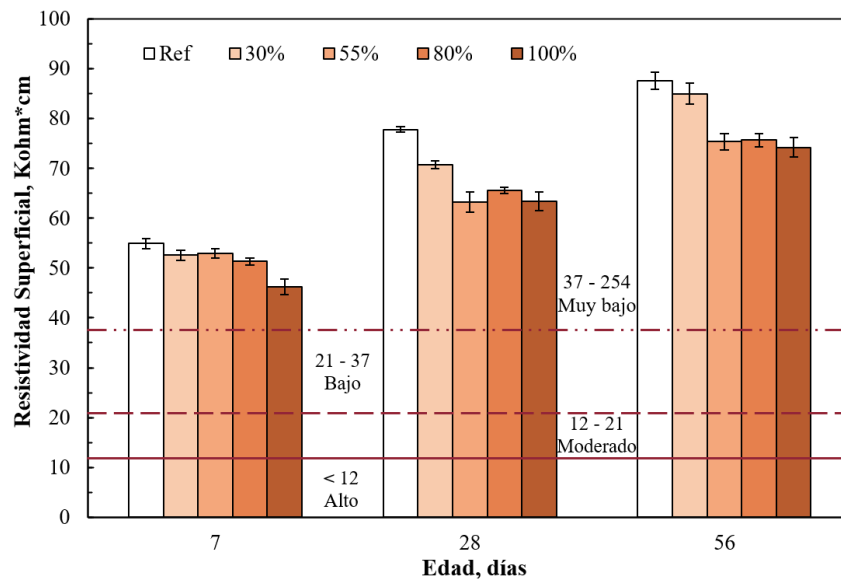


Figura 58. Resistividad eléctrica superficial para un CPC 30R B.

La Figura 58 nos muestra como el concreto desde los 7 días tiene valores demasiado bajos con respecto a la permeabilidad del ion cloruro que está relacionada con la resistividad eléctrica superficial, esto debido a la ganancia rápida de la resistencia y eso se puede ver en la densificación de su matriz cementante. Es por ello, que desde los 7 días los valores entran en una categoría de muy bajo.

Tabla 34. Análisis de los valores y desviación estándar de los resultados de resistividad bruta para el CPC.

Mezcla	Edad	Resistividad bulk, $K\Omega \cdot cm$	Desviación estándar, $K\Omega \cdot cm$	CV, %
0 (Referencia)	7	177.7	1.2	0.6
	28	239.0	22.7	9.5
	56	291.3	1.2	0.4
30	7	174.3	2.1	1.2
	28	248.3	30.1	12.1
	56	317.0	29.5	9.3
55	7	172.0	2.6	1.5
	28	218.7	18.0	8.2
	56	281.7	10.0	3.6
80	7	167.3	2.1	1.2
	28	248.3	15.3	6.2
	56	267.7	5.7	2.1
100	7	159.9	5.6	3.5
	28	223.3	12.7	5.7
	56	254.3	2.9	1.1

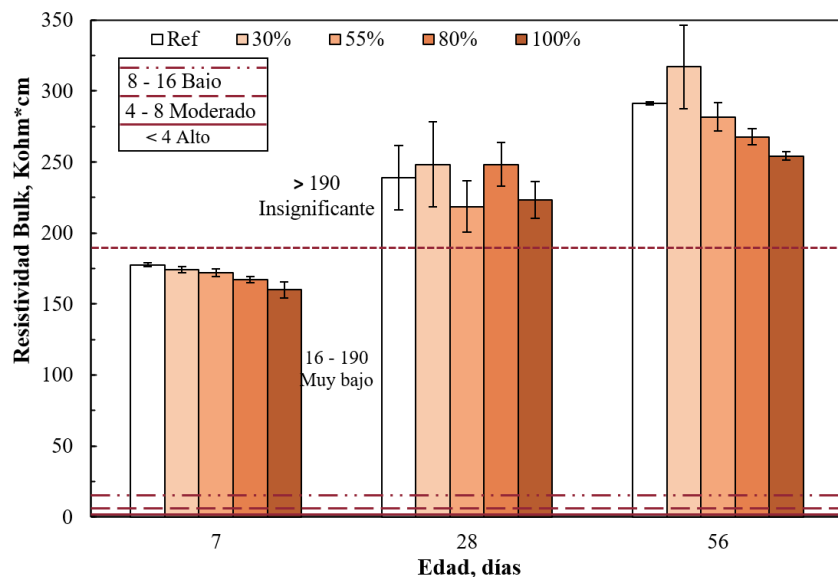


Figura 59. Resistividad Eléctrica Bruta para un CPC 30R B.

Al igual que para los resultados de SER y BER de las mezclas con CPC 30R B, para las mezclas con CP tipo II, la Figura 59 exhibe también un desarrollo progresivo del nivel de densificación de la matriz cementante, pasando en el caso de la resistividad SER de una probabilidad para el ingreso de los iones cloruro de moderada-baja a los 7 días, a una muy baja a los 56 días, y en el caso de la resistividad BER de una probabilidad para el ingreso de los iones cloruro de muy baja a los 7 días, a una despreciable a los 56 días.

Tabla 35. Análisis de los valores y desviación estándar de los resultados de resistividad superficial para el CP Tipo II.

Mezcla	Edad	Resistividad superficial, KΩ*cm	Desviación estándar, KΩ*cm	CV, %
0 (Referencia)	7	17.7	0.5	2.6
	28	59.7	0.5	0.8
	56	87.2	1.8	2.0
30	7	17.0	0.1	0.6
	28	61.4	0.8	1.4
	56	91.9	1.2	1.3
55	7	22.0	0.5	2.3
	28	70.2	1.2	1.6
	56	104.6	1.1	1.1
80	7	22.9	0.5	2.0
	28	74.2	0.9	1.2
	56	109.1	2.3	2.1
100	7	24.8	0.7	2.9

	28	76.4	2.4	3.2
	56	119.1	1.7	1.4

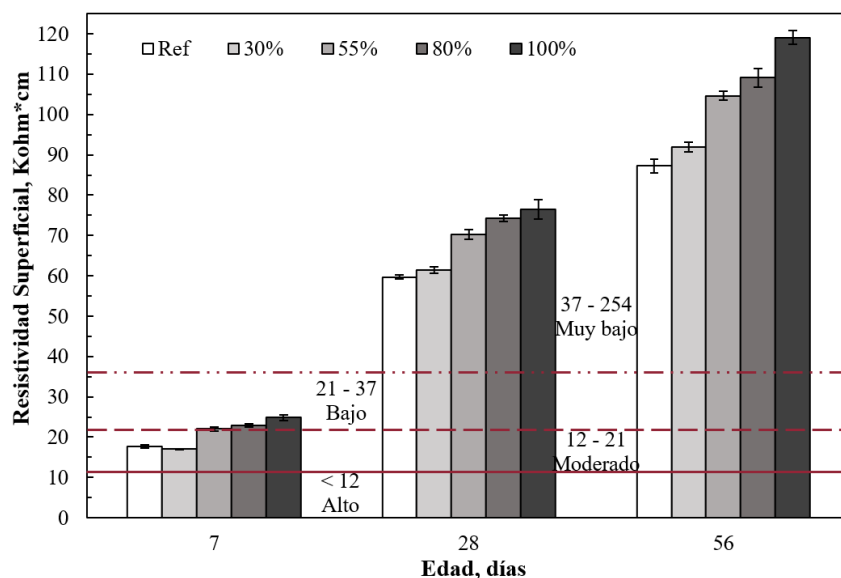


Figura 60. Resistividad Eléctrica Superficial para un CP Tipo II.

La Figura 60 muestra como los concretos fabricados con el CP Tipo II, tienen una ganancia de resistencia menor que puede deberse al bajo calor de hidratación con el que cuenta este tipo de cementos, y esto afecta en los resultados de resistencia a la compresión a edades tempranas (7 días).

Si embargo, desde los primeros días ya se encuentra en moderado y bajo, por lo que a los 28 se iguala con el CPC 30R B y se encuentran en un rango de “Muy bajo” con valores que rondan entre 60 a 80 $K\Omega \cdot cm$.

Para los valores de 56 días, los valores siguen incrementando y se mantienen en el mismo intervalo de “Muy bajo”, obteniendo valores que superan los resultados obtenidos con el cemento blanco, siendo la mezcla de 100% de sustitución de EPP la que tiene el valor mayor a 56 días, indicando que la durabilidad se mantiene incluso con matrices de diferentes cementos.

Tabla 36. Análisis de los valores y desviación estándar de los resultados de resistividad bruta para el CP Tipo II.

Mezcla	Edad	Resistividad bulk, $K\Omega \cdot cm$	Desviación estándar, $K\Omega \cdot cm$	CV, %
0 (Referencia)	7	63.2	2.7	4.2
	28	193.5	1.8	0.9
	56	285.3	2.3	0.8
30	7	63.0	2.1	3.3
	28	199.4	2.3	1.1
	56	301.0	4.5	1.5

55	7	87.0	3.1	3.6
	28	223.3	1.2	0.5
	56	331.3	6.5	2.0
80	7	82.4	0.7	0.8
	28	237.0	3.6	1.5
	56	358.3	3.1	0.9
100	7	88.8	2.4	2.8
	28	246.3	5.9	2.4
	56	395.0	16.6	4.2

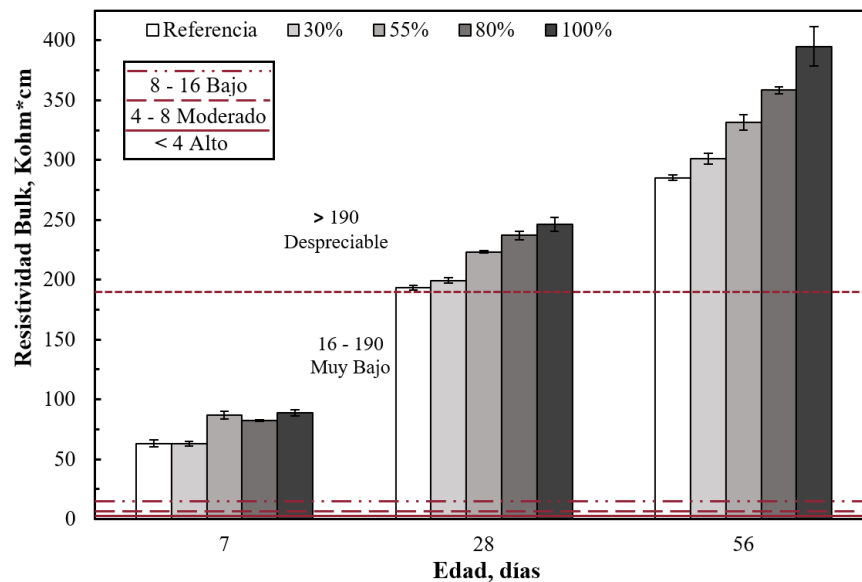


Figura 61. Resistividad Eléctrica Bruta para un CP Tipo II.

La Figura 61 sigue la misma tendencia, en donde los resultados muestran valores elevados que corresponden a una permeabilidad muy baja, esto debido a la misma tendencia que tiene la resistividad superficial. Con esto, podemos ver que, desde los 7 días, ya cuenta con una permeabilidad que es muy baja y a los 28 días es despreciable, por lo que, se mantiene el aspecto de durabilidad gracias a la matriz cementante en las diferentes sustituciones de EPP.

Así mismo, la Figura 61 tiene un comportamiento similar, al obtener valores que entran en la categoría de “Muy bajo” en los primeros 7 días, pero para los de 28 días, los valores están en el rango de despreciable, por lo que se puede llegar al mismo análisis que aún con la sustitución de la EPP, la matriz se mantiene con las mismas características de durabilidad y prevalece este aspecto tan importante en un concreto ligero.

El cemento Tipo II muestra valores mayores comparados con el cemento blanco en los resultados a 56 días, quedando dentro del rango de “Insignificante”, con valores que rondan los 400 $K\Omega \cdot cm$.

8.7.2 Penetración rápida al Ion Cloruro.

Para concluir las pruebas de durabilidad, los valores de la penetración rápida al ion cloruro se realizó con la finalidad de comprobar los valores medidos con la resistividad eléctrica y poder generar la correlación entre estos valores. La Tabla 37 muestra los límites en la carga que pasa, así como las clasificaciones que están marcado según la ASTM C1202.

Tabla 37. Penetrabilidad del Ion Cloro basado en la carga que pasa [ASTM C1202]

Carga que pasa	Penetración del Ion Cloruro
> 4000	Alta
2000-4000	Moderada
1000-2000	Baja
100-1000	Muy baja
< 100	Insignificante

La Figura 62 muestra los resultados de la prueba de permabilidad al ion cloruro, en ella podemos observar que todas las mezclas tienen valores muy bajos (menores a 100 Coulombs), por lo que entran en una categoría de “insignificante” para el ingreso del ion cloruro, siendo evidencia de la ultra-alta durabilidad por la resistencia potencial al ingreso de agentes externos que pueden deteriorar el concreto. Esta figura también exhibe la uniformidad de la mezcla, ya que las variaciones de los resultados obtenidos para diferentes mezclas fue menor a 24 y 21 coulombs y con desviaciones estándar menor a 10 coulombs en el caso del CPC (ver Tabla 38) y de 15 coulombs en el caso del CP Tipo II (ver Tabla 39).

Tabla 38. Resultados y análisis de la prueba RCPT para todas las mezclas con CPC.

Mezcla	Carga, Coulomb	Desviación estándar, Coulomb	CV, %
Referencia	61	4.4	7.3
30%	56	8.2	14.7
55%	37	1.7	4.7
80%	51	1.4	2.8
100%	50	3.8	7.6

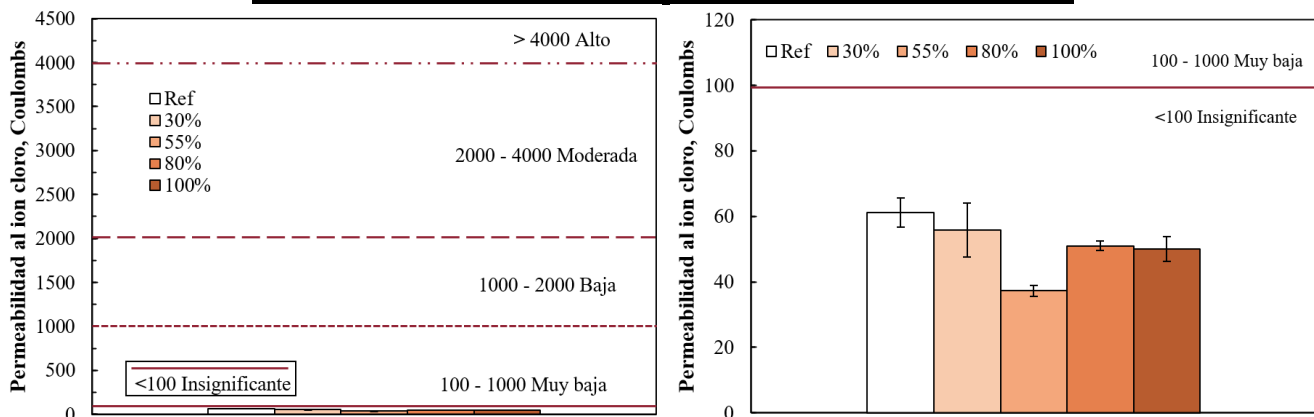


Figura 62. Valores de permeabilidad al ion cloro para el CPC a) todas las clasificaciones, b) enfoque en la clase más baja.

Se puede ver que ambas mezclas cuentan con valores muy bajos, lo que indica una baja permeabilidad a agentes externos, y esto permite generar UHPC-L gracias a sus valores de alta durabilidad en matrices con hasta 100 de reemplazo de EPP por agregado de peso normal.

Tabla 39. Resultados y análisis de la prueba RCPT para todas las mezclas con CP Tipo II.

Mezcla	Carga, Coulomb	Desviación estándar, Coulomb	CV, %
Referencia	78.5	10.6	13.5
30%	77.5	14.8	19.2
55%	61	8.5	13.9
80%	79	2.8	3.6
100%	82	4.2	5.2

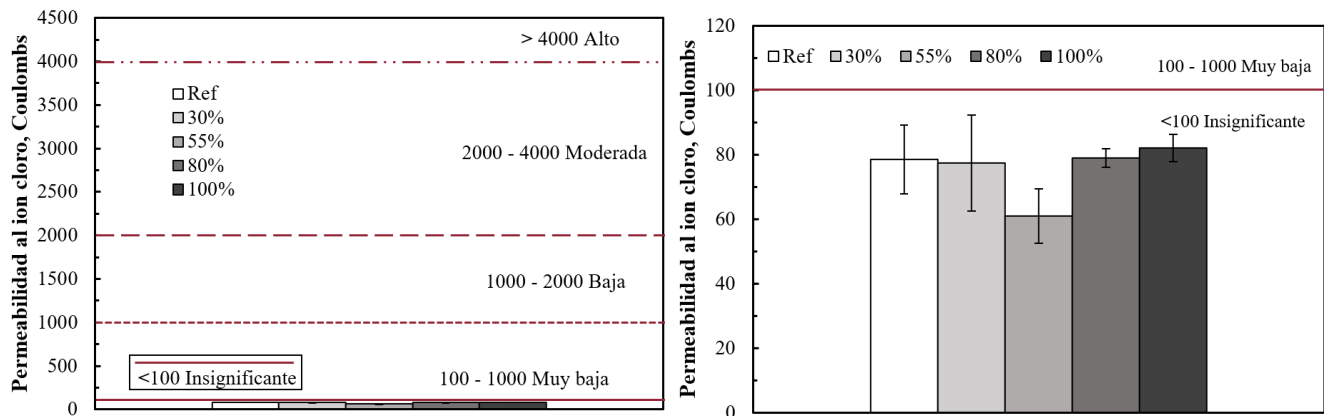


Figura 63. Valores de permeabilidad al ion cloro para el CP Tipo II a) todas las clasificaciones, b) enfoque en la clase más baja

8.7.3 Conductividad térmica

De igual manera, una vez obtenidas las pruebas relacionadas con la durabilidad de la matriz cementante, se determinó la conductividad térmica de las diferentes mezclas para ver su comportamiento el cual, está directamente relacionado con las diferentes densidades que se tienen, e independientemente de la resistencia, la conductividad va en función de la densidad del material.

Además de la reducción del peso unitario del concreto, el uso de agregados ligeros en el concreto también conduce a una reducción de la conductividad térmica del material. Por este motivo, en este trabajo se determinó esta propiedad en concretos con y sin fibras para determinar tanto el efecto de la EPP dosificado en diferentes cantidades, como también el efecto de la fibra sintética.

Como se puede observar en la Figura 64, la conductividad térmica tiene una muy buena correlación con la densidad del concreto y disminuye a medida que el peso volumétrico del concreto disminuye, a una tasa de 1×10^{-3} por cada kg/m^3 de concreto. Esta grafica también ilustra que la fibra y la edad del concreto no tienen un efecto significativo en los resultados.

Tabla 40. Valores de densidad, conductividad y resistencia térmicas a 7 días para el CPC.

Mezcla	Densidad, kg/m ³	K, W/m*K	R, m*K/W
MR	2521	1.65	0.61
MFR	2491	1.63	0.61
M3	2182	1.15	0.87
MF3	2122	1.13	0.88
M5	1861	0.86	1.16
MF5	1881	0.86	1.17
M8	1541	0.64	1.55
MF8	1556	0.62	1.61
M10	1348	0.47	2.12
MF10	1279	0.44	2.25

Tabla 41. Valores de densidad, VPU, conductividad y resistencia térmicas a 28 días para el CPC.

Mezcla	Densidad, kg/m ³	VPU, m/s	K, W/m*K	R, m*K/W
MR	2533	4950	1.73	0.58
MFR	2419	4768	1.67	0.60
M3	2154	4317	1.25	0.80
MF3	2163	4250	1.21	0.83
M5	1842	3945	0.93	1.08
MF5	1887	3813	0.91	1.11
M8	1532	3520	0.64	1.56
MF8	1585	3467	0.66	1.53
M10	1316	3325	0.48	2.07
MF10	1292	3157	0.45	2.25

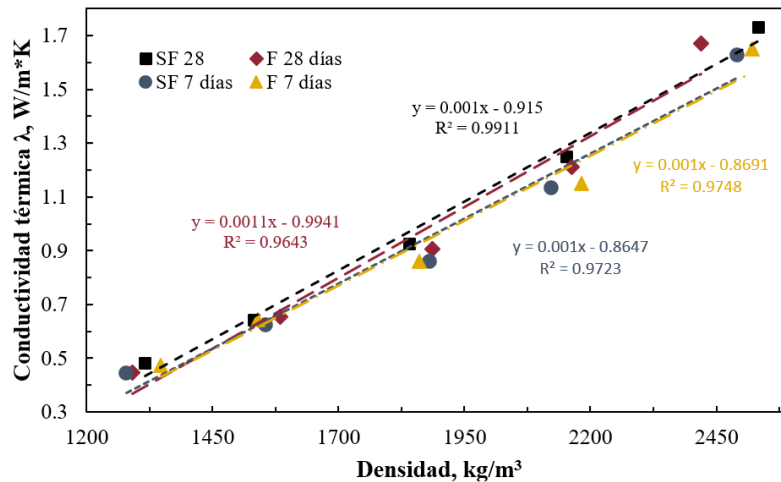


Figura 64. Conductividad térmica para un concreto con y sin fibras con CPC 30R B.

Los resultados de conductividad térmica se obtuvieron a los 7 y 28 días, sin embargo, el resultado fue prácticamente el mismo, debido a que el coeficiente de conductividad térmica no está en función de la resistencia, sino, de la densidad y por ello, manteniendo la densidad, el valor de conductividad térmica será el mismo.

Estos valores se muestran en la Tabla 40 y la Figura 64 presentando una correlación entre la densidad y el coeficiente de conductividad térmica, para concretos que tienen 2% de fibras sintéticas y para concretos sin fibras, debido a que podían mejorar la conductividad, pero es insignificante el cambio que estas tienen en los valores. Los valores en todas las correlaciones son mayores a 0.96, lo que indica alta correlación entre la densidad y la conductividad térmica.

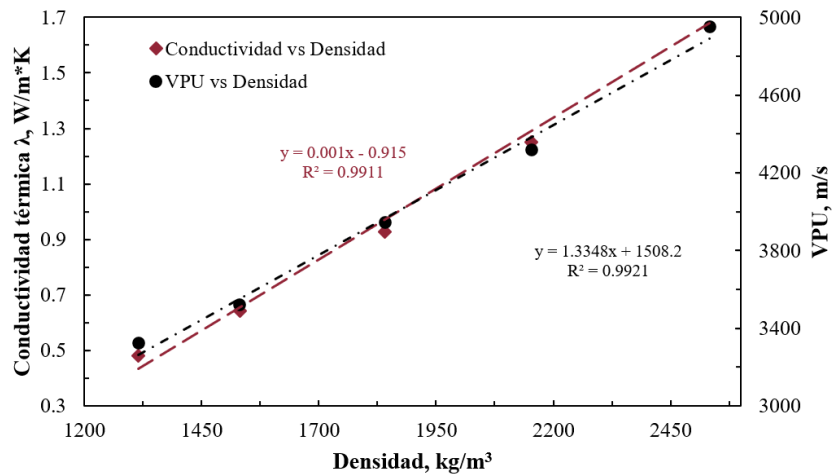


Figura 65. Influencia de la densidad en la conductividad térmica y en la Velocidad de Pulso Ultrasónico para el CPC.

Del mismo modo, se realizó la medición de la velocidad de pulso ultrasónico y se correlacionó con la densidad, ya que esta propiedad está directamente relacionada con la porosidad y la densidad del material. Los valores se enlistan en la Tabla 41, además de ser medido a la edad de 28 días, se añaden los valores de conductividad. Así mismo, se coloca el valor de R, el cual representa la resistencia térmica, y mientras

más grande sea, mejor es el material como aislante. Por este motivo, el incremento de R sugiere una reducción progresiva de la conductividad térmica.

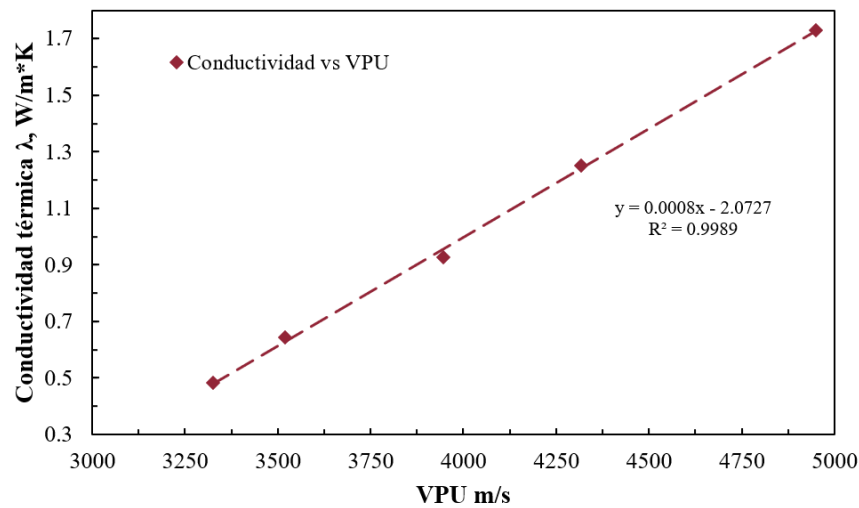


Figura 66. Correlación entre el VPU y la conductividad térmica para el CPC.

Al realizar la correlación entre los valores de VPU vs los de conductividad térmica, se encuentra una correlación destacablemente confiable, ya que el valor de R^2 es de 0.9989, lo cual, indica su alta correlación entre estas pruebas.

Para los valores medidos con el CP Tipo II (ver Tabla 42), se tomó la decisión de solo medir todos los valores únicamente a 28 días y sin fibras, ya que no era necesario hacer todo el monitoreo viendo la poca o nula inferencia de la edad y la fibra en los resultados.

Tabla 42. Valores de densidad, VPU, conductividad y resistencia térmica a 28 días para el CP Tipo II.

Mezcla	Densidad, kg/m ³	VPU, m/s	K, W/m*K	R, m*K/W
MR	2275	4876	1.64	0.61
M3	2041	4429	1.15	0.87
M5	1738	3986	0.80	1.26
M8	1409	3514	0.55	1.81
M10	1142	3166	0.38	2.61

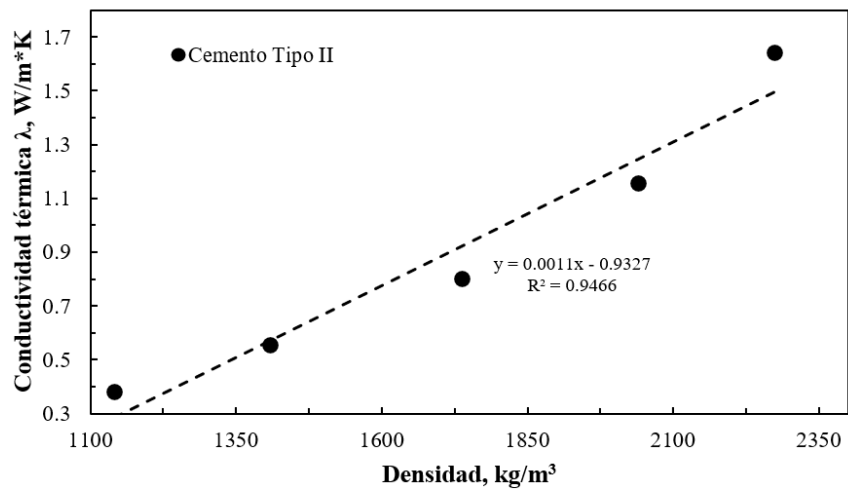


Figura 67. Influencia de la densidad en el coeficiente de conductividad térmica CP Tipo II.

Con el CP Tipo II, se obtuvo una correlación ligeramente menor que con el CPC, sin embargo, el valor de R^2 sigue siendo mayor a 0.94, indicando que mantiene esa alta correlación. Los valores fueron desde 1.64 hasta 0.38 W/m·K para la mezcla de referencia y la mezcla con 100 % de EPP respectivamente. Estos valores son comunes para un concreto convencional (aprox 1.7 W/m·K), siendo que disminuir ese valor por debajo de 1.0, ya genera un concreto que cuenta con propiedades térmicas importantes.

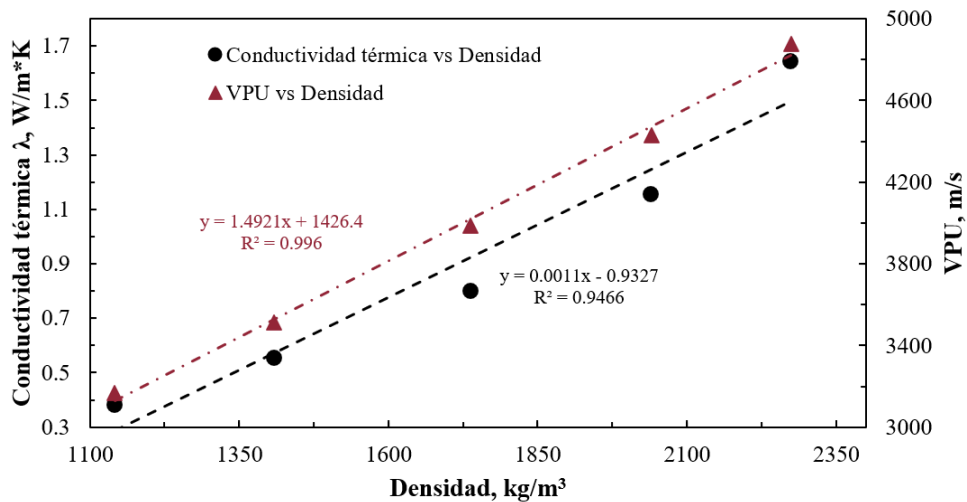


Figura 68. Influencia de la densidad en el coeficiente de conductividad térmica y VPU.

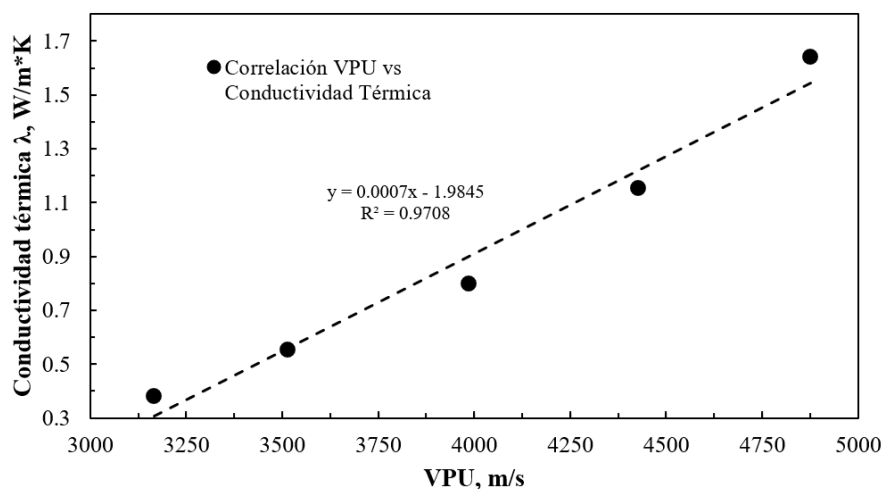


Figura 69. Correlación entre el VPU y el coeficiente de conductividad térmica.

La correlación del VPU vs conductividad se muestra en la Figura 69, y también fue llevada a cabo generando una buena correlación con valor de R^2 de 0.9708, siendo que mantienen altos valores para el CPC y CP Tipo II. Esto quiere decir que incluso no tiene influencia la matriz o el tipo de cemento, sino que el principal factor que interviene en estos valores es la densidad, ya que ambas pruebas están directamente relacionadas a ella.

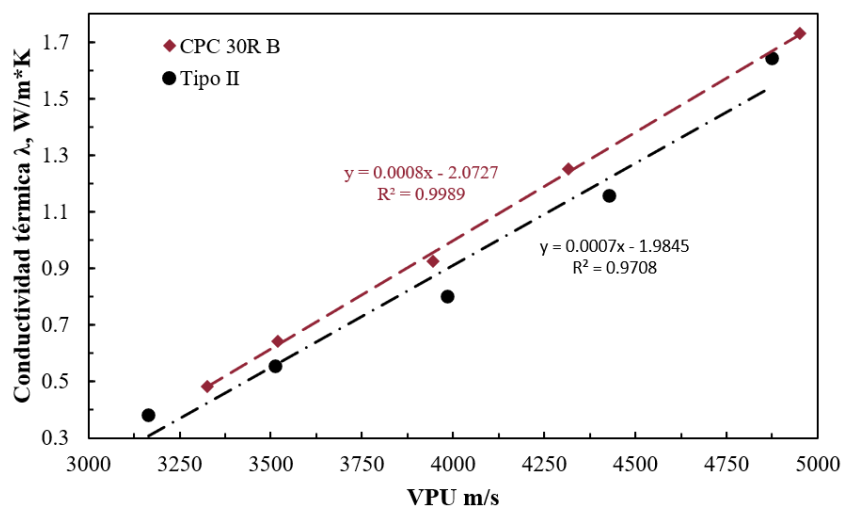


Figura 70. Correlación del VPU con el coeficiente de conductividad térmica para el CPC y el CP Tipo II.

Por último, se generó la Figura 70, la cual tiene ambas correlaciones (CPC y CP Tipo II), marcando una tendencia muy similar y que las líneas casi tienden a ser paralelas. Se destaca que los valores del CP Tipo II son ligeramente menores, esto se debe a que el diseño de mezcla tenía un menor consumo de cemento y por ende, la cantidad de agregados era ligeramente mayor, y que, al sustituir agregado en altas cantidades, tiene un mayor efecto en su disminución de densidad y por lo tanto de conductividad y VPU.

Capítulo 9. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos y en los objetivos establecidos anteriormente, se pueden redactar las siguientes conclusiones:

1. La adición de EPP y de fibra de PVA genera un cambio significativo en la dosis de aditivo y en las propiedades en estado fresco como el flujo de revenimiento y el T50, por lo que su incremento en la sustitución de EPP disminuye el flujo de revenimiento y aumenta el T50 para ambos cementos.
2. Para materiales típicos dentro del mercado de los materiales de construcción del área metropolitana de Monterrey, los resultados experimentales involucrados en este trabajo condujeron a la optimización de un concreto UHPC ligero con relación a/cm de 0.22 para un flujo de revenimiento objetivo de 70 ± 2.5 cm con resistencias a la edad de 28 días de 140 MPa para un cemento blanco CPC 30R B de acuerdo con la NMX C414 y de 85 ± 5 cm con 128 MPa para un cemento gris Tipo II de acuerdo con ASTM C 150.
3. La sustitución del agregado de caliza por EPP condujo a reducciones significativas de la resistencia a la compresión, ubicando a las más bajas dentro del requisito del ACI 318-19 para aplicaciones estructurales ($f'_c \geq 17$ MPa), lo cual también se reflejó de manera similar en el módulo de elasticidad estático, en la resistencia a la flexión y en las resistencias a la extracción de anclajes embebidos.
4. A pesar de las reducciones en la resistencia a la flexión, la presencia de las fibras mantuvo una fracción significativa de la resistencia a la flexión después de la aparición de la primera grieta y en consecuencia de la tenacidad, lo cual es un reflejo de la alta ductilidad de los compuestos, gracias a la alta adherencia entre la matriz cementante y las fibras de PVA. Este beneficio también se refleja de manera clara en las pruebas de extracción de anclajes embebidos, lo cual es significativo desde el punto de vista de seguridad estructural.
5. La dosificación de 2.0 % de microfibras de PVA en volumen, produjo incrementos significativos en la resistencia a la flexión y a la extracción de anclajes post-instalados a la edad de 28 días comparado contra la dosificación de 1.0 %, con incrementos de 114% para el MFR, 120% para el MF3, 128% para el MF5, 127% para el MF8 y del 109% para el MF10 para el CPC y de 177% para el MFR, 134% para el MF3, 133% para el MF5, 141% para el MF8 y del 123% para el MF10 para el CP Tipo II.
6. Para los UHPC-L reforzados con 2.0% fibra, y para las tres etapas identificadas en las curvas de carga-deflexión (aparición de la primera fisura, endurecimiento por deformación y ablandamiento por deformación), la MF3, MF5, MF8 y MF10 mostraron reducciones en la aparición de la primera grieta del 30%, 52%, 64%, y 71%, en comparación con el MFR para el CPC y la MF3, MF5, MF8 y MF10 mostró reducciones del 83%, 94%, 73%, y 58% comparados contra el MFR para el CP Tipo II. Sin embargo, mostraron valores del 100%, 97%, 96% y 67% y de 116%, 100%, 86% y 62% comparados contra el MFR para el endurecimiento por deformación e incrementos del 191%, 219%, 227% y 183% y del 200%, 263%, 347% y 242% para el ablandamiento por deformación respectivamente para el CPC y CP Tipo II. Este comportamiento se atribuye a que la matriz cementante es la misma para todos y la influencia del agregado es importante, sin embargo, aún con disminución de la resistencia a la compresión, las mezclas con EPP pueden mantener o mejorar la resistencia post-agrietamiento.
7. Los indicadores de durabilidad evaluados en este trabajo, como son las resistividades eléctricas superficiales y brutas, y la permeabilidad rápida a los iones cloro, confirman que los concretos producidos pueden clasificarse como ultra-durables y que el potencial del ingreso de iones cloro a la edad desde los 28 días se encuentra entre muy bajo u despreciable o insignificante, calificación típica

de concretos que en la práctica se utilizan para construir infraestructura con vidas útiles garantizadas de al menos 100 años sin necesidades de mantenimientos mayores.

8. La edad en los especímenes y la resistencia a la compresión no tiene una influencia significativa en la conductividad térmica, sino que esta propiedad está directamente relacionada con la densidad del material, por lo que se puede obtener este valor desde edades como 7 días independientemente de la resistencia del material.
9. Los resultados de conductividad térmica serán de mucha utilidad para demostrar la factibilidad de la utilización de estos concretos en proyectos donde el aislamiento térmico y/o el aislamiento acústico son importantes. Aunque no se determinó en esta investigación, es conocido que el aislamiento acústico va de la mano con el aislamiento térmico.
10. Las correlaciones entre la velocidad de pulso ultrasónico y la conductividad térmica resultaran de mucha utilidad en la práctica para estimar la conductividad térmica a partir de los resultados de VPU, ya que en la práctica es muy común que los laboratorios de verificación de la calidad de los materiales de construcción dispongan de estos equipos logrando obtener la conductividad térmica con una prueba no destructiva como lo es el VPU.
11. Los resultados de este trabajo ofrecen la posibilidad de replicarlos en otras latitudes del mundo para generar los resultados que permitan a otros grupos de profesionales establecer correlaciones similares para agregados ligeros típicos de esa región y fibras ya sea de acero o sintéticas para la producción de concreto UHPC-L para aplicaciones arquitectónicas.
12. Una de los aspectos relevantes de esta investigación, es la contribución al ámbito científico, debido a que se pueden desarrollar diversos concretos con aplicaciones arquitectónicas para proyectos específicos con el tema abordado, del mismo modo, abriendo una nueva vertiente a investigar en donde se vean aplicaciones solamente estructurales o proyectos de ambientes agresivos (aplicaciones en muros prefabricados, evaluación de durabilidad mediante pruebas ante ácidos o cloruros, etc.), relacionando el UHPC como un material innovador, en conjunto con la EPP.
13. De esta manera, la EPP puede volverse un material de constante empleo en los UHPC y pueden surgir diversos intereses de las empresas de investigar y desarrollar este tipo de productos para la venta comercial como cualquier otro material de construcción, siempre en busca de la mejora de sus características.
14. Esta investigación aportó el desarrollo y evaluación de diferentes mezclas para producir un UHPC-L con materiales comercialmente disponibles dentro del AMM, lo que implica desde el diseño, proceso de preparación y resultados obtenidos para que el conocimiento pueda aplicarse y distribuirse de manera gratuita y permita el avance en el desarrollo de estos concretos dentro del país, comparado contra productos comerciales fuera de México que suelen ser poco accesibles y limitados.
15. La interacción de la EPP puede mejorar las propiedades en estado fresco, la conductividad térmica, así como el comportamiento post-agrietamiento con la adición de fibras. De igual manera, puede reducir las propiedades como en estado endurecido, principalmente resistencia a la compresión y módulo de elasticidad, incluso mantener las altas propiedades de durabilidad comparado contra las mezclas de referencia.
16. Una de las limitantes para estos concretos son la compatibilidad de los aditivos con los cementantes, así como el control de calidad que se debe de tener, ya que, al tener una mezcla con alta fluidez y viscosidad, el control de calidad debe ser estricto para lograr el objetivo.

17. Las aplicaciones a escala real que aporta el trabajo son para la fabricación de fachadas arquitectónicas de estructuras nuevas y modernización de estructuras antiguas, esto se puede realizar mediante la fabricación de paneles que pueden ser instalados en jornadas pequeñas de trabajo, lo que puede mejorar la productividad, así como los beneficios térmicos que puede aportar el material una vez instalado.

Capítulo 10. Referencias bibliográficas

- [1] Azmee, N. M., & Shafiq, N. (2018). Ultra-High-Performance Concrete: From Fundamental to Applications. Case Studies in Construction Materials. doi:10.1016/j.cscm.2018.e00197
- [2] Du, J., Meng, W., Khayat, K. H., Bao, Y., Guo, P., Lyu, Z., & Wang, H. (2021). New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). Composites Part B: Engineering, 224, 109220. doi:10.1016/j.compositesb.2021.109220
- [3] Alkadhim HA, Amin MN, Ahmad W, Khan K, Umbreen-us-Sahar, Al-Hashem MN and Mohamed A (2022) An overview of progressive advancement in ultra-high performance concrete with steel fibers. Front. Mater. 9:1091867. doi: 10.3389/fmats.2022.1091867
- [4] Perry V. (2018). What really is ultra-high performance concrete – towards a global definition. In: Proceedings of the 2nd international conference on UHPC materials and structures. Fuzhou: RILEM Publications.
- [5] Hung, C.-C., Chen, Y.-T., & Yen, C.-H. (2020). Workability, fiber distribution, and mechanical properties of UHPC with hooked end steel macro-fibers. Construction and Building Materials, 260, 119944. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119944>
- [6] Data Bridge Market Research. (2026). *Mercado global de concreto de ultra alto desempeño (UHPC): tendencias de la industria y pronóstico*. <https://www.databridgemarketresearch.com/es/reports/global-ultra-high-performance-concrete-market>
- [7] Fortune Business Insights. (2026). Crecimiento del mercado del hormigón de ultra alto rendimiento (UHPC), 2026–2034. <https://www.fortunebusinessinsights.com/es/ultra-high-performance-concrete-uhpc-market-102954>
- [8] Market Growth Reports. (2026). *Ultra-high performance concrete (UHPC) market size, share, growth, and industry analysis, by type, by application, and regional forecast to 2035*. <https://www.marketgrowthreports.com/market-reports/ultra-high-performance-concrete-uhpc-market-108570>
- [9] Thienel, K.-C., Haller, T. & Beuntner, N. (2020). Lightweight Concrete – From Basics to Innovations. Materials, 13, 1120. <https://doi.org/10.3390/ma13051120>
- [10] Badogiannis, E., Maria S., Konstantinos A. & Alexandros C. (2021). Durability of Structural Lightweight Concrete Containing Different Types of Natural or Artificial Lightweight Aggregates. Corrosion and Materials Degradation 2, no. 4: 554-567. <https://doi.org/10.3390/cmd2040029>.

- [11] Li, Y., Zhan, G., Yang, J., Ding, Y., Ding, Q. and Wang, Y. (2022). Chloride Ion Transport Properties in Lightweight Ultra-High-Performance Concrete with Different Lightweight Aggregate Particle Sizes. *Materials* 15, no. 19: 6626. <https://doi.org/10.3390/ma15196626>.
- [12] Dixit, A., Pang, S. D., Kang, S.-H., & Moon, J. (2019). Lightweight structural cement composites with expanded polystyrene (EPS) for enhanced thermal insulation. *Cement and Concrete Composites*. doi:10.1016/j.cemconcomp.2019.04.023
- [13] Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Wang, D., Huang, Z., & Fang, Z. (2015). A review on ultra-high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Construction and Building Materials*, 101, 741–751. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088>.
- [14] Yang, J., Chen, B., Su, J., Xu, G., Zhang, D., & Zhou, J. (2022). Effects of fibers on the mechanical properties of UHPC: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(3), 363–387. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.05.001>
- [15] Abu Aisheh, Y. I., Atrushi, D. S., Akeed, M. H., Qaidi, S., & Tayeh, B. A. (2022). Influence of polypropylene and steel fibers on the mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01234. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01234>.
- [16] Le Hoang, A., & Fehling, E. (2017). Influence of steel fiber content and aspect ratio on the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 153, 790–806. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.130>
- [17] Subair, S., Paul, A., & John, E. (2023). The effect of fibre in ultra high-performance concrete (UHPC): A review. *International Journal of Research in Engineering and Science*, 11(6), 141–151.
- [18] Habil, M. & Fehling, E. (2005). *Ultra-High-Performance Concrete: Research, Development and Application in Europe*. ACI Special Publication. 228.
- [19] Akeed, M. H., Qaidi, S., Ahmed, H. U., Faraj, R. H., Mohammed, A. S., Emad, W., Tayeh, B. A., & Azevedo, A. R. G. (2022). Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. Part IV: Durability properties, cost assessment, applications, and challenges. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01271. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01271>
- [20] Mazzacane, P., Ricciotti, R., Lamoureux, G., & Corvez, D. (2013). Roofing of the stade Jean Bouin in UHPFRC. In *Proceedings of international Symposium on ultra-high performance fibre-reinforced concrete* (pp. 59-68).
- [21] Hi-Con. (s.f.). University of Southern Denmark: Aesthetic facade cladding in UHPC. Recuperado el 20 de mayo de 2026, de <https://www.hi-con.com/cases/university-of-southern-denmark/>
- [22] Arquitectura Viva. (s.f.). *MuCEM: Museo de las Civilizaciones de Europa y el Mediterráneo*. Recuperado el 20 de mayo de 2026, de <https://arquitecturaviva.com/obras/mucem-museo-de-las-civilizaciones-de-europa-y-el-mediterraneo>

- [23] ConstructGRC. (s.f.). *Ultra-high performance concrete (UHPC)*. Recuperado el 20 de mayo de 2026, de <https://www.constructgrc.com/uhpc/>
- [24] Amusement Logic. (2022, julio 1). *Aplicación de UHPC al mobiliario urbano*. <https://amusementlogic.es/noticias-generales/aplicacion-de-uhpc-al-mobiliario-urbano>
- [25] Monarda Group. (s.f.). *Concrete bench “Modular Recto”*. Recuperado el 20 de mayo de 2026, de <https://monarda-group.com/en/concrete-bench-modular-recto>
- [26] Baldwin, E. (2019, noviembre 14). “*We’re building new ways of working*”: *Morphosis explores XR and the future of design technologies*. ArchDaily. <https://www.archdaily.com/928296/were-building-new-ways-of-working-morphosis-explores-xr-and-the-future-of-design-technologies>
- [27] UniStone. (s.f.). *UHPC – Ultra high performance concrete*. Recuperado el 20 de mayo de 2026, de <https://unystone.in/uhpc-ultra-high-performance-concrete/>
- [28] Wang, X., Wu, D., Geng, Q., Hou, D., Wang, M., Li, L., Wang, P., Chen, D. & Sun, Z. (2021). Characterization of sustainable ultra-high-performance concrete (UHPC) including expanded perlite. *Construction and Building Materials*, 303, 124245. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.124245
- [29] Kishore, M., Yadav, H. & Garg, A. (2015). Architectural Use of Precast Ultra High-Performance Concrete. *International Journey of Scientific Research*. ISSN 2277 – 8179
- [30] Mordor Intelligence editorial. (2022). Mercado de cemento blanco: crecimiento, tendencias, impacto de Covid-19 y pronósticos (2023 - 2028). Mordor Intelligence Recuperado de: <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/white-cement-market>
- [31] Ding, M., Yu, R., Feng, Y., Wang, S., Zhou, F., Shui, Z., Gao, X., He, Y., & Chen, L. (2021). Possibility and advantages of producing an ultra-high performance concrete (UHPC) with ultra-low cement content. *Construction and Building Materials*, 273, 122023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122023>
- [32] Alsalman, A. (2018). Developing ultra-high performance concrete (UHPC) with locally available materials (Tesis doctoral). University of Arkansas. <https://scholarworks.uark.edu/etd/2976/>
- [33] Patrick, N. (2018). 15 razones por las que 2018 rompió el récord de edificios altos. ArchDaily Recuperado de: <https://www.archdaily.mx/mx/907889/15-razones-por-las-que-2018-rompio-el-record-de-edificios-altos>
- [34] Vidal, E. (2021). Los 11 edificios más altos de México en 2023 (actualizado). Espíritu Curioso. Recuperado de: <https://www.espiritucurioso.com.mx/2021/01/16/edificios-mas-altos-de-mexico/>
- [35] Market Research Report. (2023) Trends in the Façade Systems Market - Coherent Market Insights Code: CMI6229. Recuperado de: <https://www.coherentmarketinsights.com/industry-reports/facade-systems-market>

- [36] De la Garza, O. & Arteaga, J. (2011). Análisis de la competencia en la industria cementera en México. *EconoQuantum*, 8(1-2), 73-89. Recuperado en 22 de mayo de 2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-66222011000200004&lng=es&tlng=es. ISSN 1870-6622
- [37] Gannon, K. (s.f.). Architectural ultra high performance concrete. Hanley Wood University. Recuperado el 20 de mayo de 2026, de https://www.architectu.net/media/course/4222/story_content/external_files/HWU_AR_Taktl_May_ADV16-DIGITAL.pdf
- [38] Luna, L. (2007). "Competencia Monopolística en México y en el Mundo - CEMEX". EcoLink. Recuperado de: <https://www.econlink.com.ar/economia/competencia-monopolistica-mexico>
- [39] Holcim México. (2023). Soluciones concretas (catálogo de productos). Recuperado de: <https://www.holcim.com.mx/soluciones-concretas>
- [40] Cemex México. (2023). Concreto. Conoce nuestros productos de Concreto (catálogo de productos). Recuperado de: <https://www.cemexmexico.com/productos/concreto>
- [41] American Concrete Institute (ACI) Committee 318. (2019). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary (ACI 318R-19). American Concrete Institute.
- [42] ACI Committee 213. ACI 213R-14 Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete; American Concrete. Institute: Farmington Hills, MI, USA, 2014; p. 53.
- [43] Liang, K., Su, R. K. L., Pan, W., & Ye, H. (2026). Mechanical behavior of fiber-reinforced ultra-high-performance lightweight concrete with expanded glass aggregate. *Journal of Building Engineering*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2026.115569>
- [44] Majeed, S. S., Othuman Mydin, M. A., Bahrami, A., Dulaimi, A., Özkılıç, Y. O., Omar, R., & Jagadesh, P. (2024). Development of ultra-lightweight foamed concrete modified with silicon dioxide (SiO₂) nanoparticles: Appraisal of transport, mechanical, thermal, and microstructural properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 3308–3327. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.282>
- [45] Lu J., Shen Pe., Ali H. & Poon, C. (2022). Mix design and performance of lightweight ultra-high-performance concrete. *Materials & Design*. doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110553
- [46] Wetzel, A., Umbach, C., Ekkehard, F. & Middendorf, B. (2016). Multifunctional prefabricated walls made of UHPC and foam concrete.
- [47] Soliman, N. A., & Tagnit-Hamou, A. (2017). Partial substitution of silica fume with fine glass powder in UHPC: Filling the micro gap. *Construction and Building Materials*, 139, 374–383. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.02.084
- [48] Bozorgmehr, S. & Nemati, M. (2023). Applied development of sustainable-durable high-performance lightweight concrete: Toward low carbon footprint, durability, and energy saving,

- [49] Dong, Y. (2018). Performance assessment and design of ultra-high-performance concrete (UHPC) structures incorporating life-cycle cost and environmental impacts. *Construction and Building Materials*, 167, 414–425. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.02.037
- [50] Weina, M., Samaranayake, V. & Khayat K. (2018). Factorial design and Optimization of Ultra-High-Performance Concrete with Lightweight Sand. *ACI materials Journal*. ResearchGate. DOI: 10.14359/51700995
- [51] Meng, W., & Khayat, K. (2017). Effects of saturated lightweight sand content on key characteristics of ultra-high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 101, 46–54. doi:10.1016/j.cemconres.2017.08.018
- [52] Ramezani, A., & Shafei, B. (2025). Advances in lightweight ultra-high performance concrete: Mixture requirements, strength characteristics, and durability properties. *Journal of Building Engineering*, 112, 113681. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.113681>
- [53] Cao, T.-A., Nguyen, M.-T., Pham, T.-H., & Nguyen, D.-N. (2023). Experimental study on flexural behavior of RC–UHPC slabs with EPS lightweight concrete core. *Buildings*, 13(6), 1372. <https://doi.org/10.3390/buildings13061372>
- [54] European Committee for Standardization (CEN). (2000). *Concrete—Part 1: Specification, performance, production and conformity (BS EN 206-1:2000)*. British Standards Institution.
- [55] European Committee for Standardization (CEN). (2004). *Eurocode 2: Design of concrete structures—Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1992-1-1:2004)*. CEN.
- [56] Kumar, P., Pasla, D., & Thiyagarajan, J. S. (2026). High-strength structural lightweight self-consolidating concrete: A comprehensive study on durability, microstructure, and sustainability. *Case Studies in Construction Materials*, 24
- [57] Paredes, J. A., Gálvez, J. C., Enfedaque, A., & Alberti, M. G. (2021). Matrix optimization of ultra high performance concrete for improving strength and durability. *Materials*, 14(22), 6944. <https://doi.org/10.3390/ma14226944>
- [58] Wang, X., Yu, R., Song, Q., & Brouwers, H. J. H. (2019). Optimized design of ultra-high performance concrete (UHPC) with a high wet packing density. *Cement and Concrete Research*, 126, 105921. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105921>
- [59] Yu, R., Spiesz, P., & Brouwers, H. J. H. (2014). Composition design and fundamental properties of ultra-high-performance concrete based on a modified Fuller distribution model. *Cement and Concrete Research*, 56, 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.008>
- [60] Zhang, Z., Ding, K., & Yu, R. (2021). The role of carbonated steel slag on mechanical performance of ultra-high performance concrete containing coarse aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 316, 128345. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128345>

- [61] Yu, R., van Beers, L., & Brouwers, H. J. H. (2021). Multiple effects of particle size distribution modulus (q) and maximum aggregate size (D_{max}) on the characteristics of ultra-high performance concrete (UHPC): Experiments and modeling. *Construction and Building Materials*, 299, 123918. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.12391>
- [62] Díaz, J., Gálvez, J. C., Alberti, M. G., & Enfedaque, A. (2021). Application of Andreasen and modified Andreasen model on cementitious mixture design: A review. *Nanomaterials*, 11(6), 1414. <https://doi.org/10.3390/nano11061414>
- [63] Ahmad, S., Zubair, A., Maslehuddin, M., & Al-Amoudi, O. (2017). Development of an eco-friendly ultra-high performance concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. *Journal of Cleaner Production*, 165, 1319–1328. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.224>
- [64] Díaz, J., Gálvez, J. C., Alberti, M. G., & Enfedaque, A. (2021). Achieving ultra-high performance concrete by using packing models in combination with nanoadditives. *Nanomaterials*, 11(6), 1414. <https://doi.org/10.3390/nano11061414>
- [65] Okoye, F. N., & Durgaprasad, J. (2018). Andreasen particle packing method on the development of geopolymer concrete for civil engineering applications. *Construction and Building Materials*, 173, 142–152. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.222>
- [66] Wong, H. H. C., & Kwan, A. K. H. (2008). Effect of particle packing on flow property and strength of concrete mortar. *Construction and Building Materials*, 22(12), 2471–2478. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.09.003>
- [67] Mo, Z., Wang, R., & Gao, X. (2020). Hydration and mechanical properties of UHPC matrix containing limestone and different levels of metakaolin. *Construction and Building Materials*, 256, 119454. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119454>
- [68] Abdellatief, M., Al-Tam, S. M., Elemam, W. E., Alanazi, H., Elgendy, G. M., & Tahwia, A. M. (2023). Development of ultra-high-performance concrete with low environmental impact integrated with metakaolin and industrial wastes. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01724. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01724>
- [69] Kuraray Co., Ltd. (2022). Kuralon™ PVA fibers for high-performance reinforced concrete: Sustainable infrastructure and architecture [Brochure]. Kuraray.
- [70] Andrade, C., & D'Andrea, R. (2011). La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. *Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción*, 1(2), 93-101.
- [71] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2014). NMX-C-414 Industria de la construcción - Cementantes Hidráulicos - Especificaciones y métodos de ensayo (pp. 1–16).

- [72] ASTM International. (2022). Standard specification for portland cement (ASTM C150/C150M-22). ASTM International.
- [73] ASTM International. (2022). Standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement (ASTM C114-22). ASTM International.
- [74] ASTM International. (2017). Standard test method for density of hydraulic cement (ASTM C188-17). ASTM International.
- [75] ASTM International. (2022). Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate (ASTM C128-22). ASTM International.
- [76] ASTM International. (2022). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates (ASTM C136/C136M-22). ASTM International.
- [77] ASTM International. (2021). Standard specification for chemical admixtures for concrete (ASTM C494/C494M-21). ASTM International.
- [78] ASTM International. (2020). Standard test method for flow of grout for preplaced-aggregate concrete (ASTM C939/C939M-20). ASTM International.
- [79] ASTM International. (2020). Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency (ASTM C305-20). ASTM International.
- [80] ASTM International. (2021). Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (ASTM C109/C109M-21). ASTM International.
- [81] ASTM International. (2018). Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete (ASTM C1611/C1611M-18). ASTM International.
- [82] ASTM International. (2018). Standard test method for air content of hydraulic cement mortar (ASTM C185-18). ASTM International.
- [83] ASTM International. (2024). Standard practice for fabricating and testing specimens of ultra-high performance concrete (ASTM C1856/C1856M-24). ASTM International.
- [84] ASTM International. (2021). Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens (ASTM C39/C39M-21). ASTM International.
- [85] ASTM International. (2021). Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression (ASTM C469/C469M-21). ASTM International.
- [86] ASTM International. (2019). Standard practice for capping cylindrical concrete specimens (ASTM C617/C617M-19). ASTM International.
- [87] ASTM International. (2021). Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete (ASTM C642-21). ASTM International.

- [88] European Committee for Standardization (CEN). (2007). Test method for metallic fibered concrete—Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual strength) (EN 14651:2007). CEN.
- [89] ASTM International. (2019). Standard test method for thermal conductivity of concrete (ASTM E1512-19). ASTM International.
- [90] ASTM International. (2015). Standard test methods for strength of anchors in concrete (ASTM E488/E488M-15). ASTM International.
- [91] ASTM International. (2019). Standard test method for pullout strength of hardened concrete (ASTM C900-19). ASTM International.
- [92] AASHTO. (2024). Standard method of test for surface resistivity indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration (AASHTO T 358). American Association of State Highway and Transportation Official
- [93] ASTM International. (2024). Standard test method for bulk electrical resistivity or bulk conductivity of concrete (ASTM C1876-24). ASTM International.
- [94] ASTM International. (2019). Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration (ASTM C1202-19). ASTM International.
- [95] ASTM International. (2023). Standard test method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe (ASTM D5334-22). ASTM International.
- [96] Molina, B. (2025). Evaluación de la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y de la conductividad térmica en concretos ligeros con microperlita de poliestireno. San Nicolás de los Garza, México. UANL.
- [97] CANACEM. (2019). Cemento y productos a base de cemento. Reporte de Fabricación. Cámara Nacional del Cemento. Recuperado de: <https://canacem.org.mx/reporte-de-fabricacion/>
- [98] Siwinski, J., Szczeniak, A., Stolarski, A. (2020). Modified Formula for Designing Ultra-High-Performance Concrete with Experimental Verification. MDPI Journal Materials, Materials, 13, 4518. doi.org/10.3390/ma13204518
- [99] Huang, H., Teng, L., Gao, X., Khayat, K., Wang, F. & Liu, Z. (2022). Use of saturated lightweight sand to improve the mechanical and microstructural properties of UHPC with fiber alignment. Cement and Concrete Composites, Volume 129, 104513, ISSN 0958 9465, doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104513.
- [100] Gasparri, E., Brambilla, A., Lobaccaro, G., Goia, F., Andaloro, A. & Sangiorgio, A. (2022) Rethinking Building Skins - Facade Tectonics Institute
- [101] Chung, S.-Y., Sikora, P., Kim, D. J., El Madawy, M. E., & Abd Elrahman, M. (2021). Effect of different expanded aggregates on durability-related characteristics of lightweight aggregate concrete. Materials Characterization, 173, 110907. doi:10.1016/j.matchar.2021.110907.

- [102] Zulkarnain, F. & Ramli, M. (2008). Durability performance of lightweight aggregate concrete for housing construction. 2nd international conference on built environment in developing countries. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/83543337.pdf>
- [103] Umbach, C., Wetzel, A. and Middendorf, B. (2021). Durability Properties of Ultra-High Performance Lightweight Concrete (UHPLC) with Expanded Glass. Materials 14, no. 19: 5817. <https://doi.org/10.3390/ma14195817>.
- [104] P. Mazzacane, R. Ricciotti, F. Teply, E. Tollini, D. Corvez, MUCEM: the builder's perspective, Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (2013) 3–16.
- [105] Forbes Content. (2021). ONU reconoce que el concreto absorbe CO2 y ayuda contra cambio climático. Forbes México. Recuperado de: <https://www.forbes.com.mx/ad-reconoce-onu-que-el-concreto-absorbe-co2-y-ayuda-contra-cambio-climatico/>
- [106] CSM. (2021). ¿Por qué el concreto es tan utilizado en la construcción moderna? Concreto Sólido de México. Recuperado de: <https://www.concretosolido.mx/por-que-el-concreto-es-tan-utilizado-en-la-construccion-moderna/>
- [107] Redacción oportimes. (2022). Industria del Cemento emite 7% del CO₂: CEMEX. Oportimes. Recuperado de: <https://www.oportimes.com/industria-del-cemento-emite-7-de-co2-cemex/>
- [108] HOLCIM. (2022) Net Zero. Nuestro compromiso de clima “Net Zero”. Grupo HOLCIM. Recuperado de: <https://www.holcim.com.mx/net-zero>
- [109] Ng, S., Jelle, B. P., Sandberg, L. I. C., Gao, T., & Wallevik, Ó. H. (2015). Experimental investigations of aerogel-incorporated ultra-high performance concrete. Construction and Building Materials, 77, 307–316. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.064>
- [110] Brooks, A. L., Zhou, H., & Hanna, D. (2018). Comparative study of the mechanical and thermal properties of lightweight cementitious composites. Construction and Building Materials, 159, 316–328. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.102>