



FACULTAD DE INGENIERÍA
Maestría en Ingeniería Civil

Trabajo de Grado
Análisis del Comportamiento Mecánico, de Permeabilidad y
de Deformaciones a Largo Plazo en Concretos de Ultra Alto
Desempeño UHPC

Presentado por:
Fausto Yamid Rubiano Beltrán
William Marcel Picón Arciniegas

Director
Yezid Alexander Alvarado Vargas

Bogotá D.C
Mayo de 2015

APROBACIÓN

El Trabajo de grado con título “**Análisis del Comportamiento Mecánico, de Permeabilidad y de Deformaciones a Largo Plazo en Concretos de Ultra Alto Desempeño UHPC**”, desarrollado por los estudiantes Fausto Yamid Rubiano Beltrán y William Marcel Picón Arciniegas, en cumplimiento de uno de los requisitos depuestos por la Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería civil, para optar el Título de Magister en ingeniería Civil, fue aprobado por:

Yezid Alexander Alvarado Vargas
Director de trabajo de grado

Martha Luz Salcedo Barrera
Jurado 1

Lucio Guillermo López Yépez
Jurado 2

Análisis del Comportamiento Mecánico, de Permeabilidad y
de Deformaciones a Largo Plazo en Concretos de Ultra Alto

Desempeño UHPC

Fausto Yamid Rubiano Beltrán

William Marcel Picón Arciniegas

La Pontificia Universidad Javeriana, no es responsable por los conceptos emitidos por los autores-investigadores del presente trabajo, por lo cual son responsabilidad absoluta de sus autores y no comprometen la idoneidad de la institución ni de sus valores.

DEDICATORIA

YAMID

A Dios, quien permite que todos los objetivos y metas trazadas en mi vida se cumplan.

A mi familia, por su apoyo incondicional a la largo de todas las dificultades y retos dados
en la presente investigación.

A mi novia, apoyo moral y espiritual en el largo camino recorrido.

WILLIAM

A Dios, por su infinita generosidad.

A la memoria de mi padre.

A mis hijas y mi esposa por su amor, paciencia y apoyo.

A mi madre, por su apoyo moral y entusiasmo.

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Yezid Alvarado, por su apoyo incondicional en cada etapa de la investigación

A la empresa de cementos Argos, por su disposición en la asignación de materiales y equipos, lo cual permitió realizar las muestras y su análisis

RESUMEN

El presente trabajo de investigación, recopila los resultados hallados en la evaluación del comportamiento mecánico, de permeabilidad y de deformaciones a largo plazo obtenidas en dos tipos de mezclas de UHPC. Estas mezclas se identifican en la cantidad de cemento y la manejabilidad obtenida en el proceso de fabricación mediante el ensayo modificado de flujo para morteros, que sumados a la estandarización de edades de ensayo para las probetas fabricadas en ensayos de compresión, flexión, retracción, permeabilidad al agua bajo presión y ensayo de deflexión por fluencia, permitieron la generación y procesamiento de datos. Lo anterior generó resistencias a compresión cercanas a 141 MPa, resistencias a flexión cercanas al 15% de la resistencia a la compresión debido a la incorporación de fibras metálicas, proporcionando un comportamiento dúctil en el material. Se comprobó la escasa permeabilidad que presentan los elementos, importante característica en el mejoramiento de la durabilidad del concreto. El comportamiento del material frente a la retracción en diferentes condiciones de secado, permite identificar las magnitudes del gradiente volumétrico, así como algunos patrones que caracterizan la retracción en UHPC, evidenciando que durante los primeros 56 días se desarrolla el 95% de la retracción. Adicionalmente, se identificó el efecto de las condiciones ambientales en la retracción. Finalmente, se obtuvieron hallazgos en las magnitudes de deflexión por fluencia, identificando la influencia de la edad de las probetas en el momento de puesta en carga, así como las diferencias atribuibles a la cantidad de cemento y al uso de las fibras en la mezcla.

ABSTRACT

This research, compiles the results found in the evaluation of the mechanical behavior, permeability and long term deformations obtained two types of mixtures of UHPC. These mixtures are identified in the amount of cement and manageability obtained in the manufacturing process using the modified test for mortar flow, which added to the standardization of test ages for the specimens manufactured in compression tests, bending, shrinkage, permeability water under pressure and creep deflection test, allowed the generation and processing of data. This generated resistance to compression close to 141 MPa, bending strengths close to 15% of the compressive strength due to the incorporation of metal fibers, providing a ductile behavior in the material. Having the low permeability elements, important feature in improving durability of concrete it was checked. The behavior of the material against retraction in different drying conditions, identifies the volumetric gradient magnitudes and patterns that characterize some shrinkage in UHPC, showing that during the first 56 days the 95% retraction develops. Additionally, the effect of environmental conditions identified retraction. Finally, findings were obtained in the creep deflection

magnitudes, identifying the influence of the age of the specimens at the time of starting charge, as well as differences attributable to the amount of cement and the use of the fibers in the mixture.

PALABRAS CLAVE

Concreto de ultra alto desempeño UHPC; Permeabilidad en UHPC; Composición de UHPC; Fabricación de UHPC; Curado de UHPC; Contracción por secado en UHPC; Fluencia en UHPC; Esfuerzo de compresión en UHPC; Resistencia a la flexo tracción de UHPC

KEYWORDS

Ultra high performance concrete UHPC; Permeability of UHPC; Composition of UHPC; Manufacture of UHPC; UHPC curing; Drying shrinkage in UHPC; Creep in UHPC; Compressive stress in UHPC; Flexo tensile strength in UHPC.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| LISTA DE FIGURAS..... | 11 |
| LISTA DE TABLAS | 14 |
| CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y SÍNTESIS | 15 |
| 1.1 Introducción | 15 |
| 1.2 OBJETIVOS | 18 |
| 1.3 SINTESIS..... | 18 |
| CAPITULO 2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE..... | 20 |
| 2.1 MARCO DE ANTECEDENTES..... | 20 |
| 2.2 Principales componentes y variables que afectan su desempeño..... | 23 |
| 2.2.1 El efecto del tamaño de los agregados | 23 |
| 2.2.2 El efecto de la mejora en las propiedades mecánicas de la pasta | 23 |
| 2.2.3 El efecto del límite de contenido de arena..... | 24 |
| 2.2.4 El humo de sílice | 24 |
| 2.2.5 El Polvo de Cuarzo..... | 24 |
| 2.2.6 La Microestructura mejora por el curado con calor | 25 |
| 2.2.7 La Ductilidad mejora por la incorporación de fibras..... | 25 |
| 2.3 Concretos de Ultra Alto Desempeño..... | 25 |
| 4.1 Permeabilidad del Concreto | 26 |
| 4.2 Retracción del concreto | 28 |
| 4.3 Flujo del concreto..... | 29 |
| CAPITULO 3. PLANTEAMIENTO DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL..... | 33 |
| 3.1 Introducción | 33 |
| 3.2 Descripción de la investigación | 33 |
| 3.2.1 Materiales..... | 34 |
| 3.2.2 Diseño de mezclas | 38 |
| 3.2.3 Resistencias esperadas | 39 |
| 3.3 Proceso de mezclado | 39 |
| 3.3.1 Equipos | 41 |

| | | |
|--|--|----|
| 3.3.2 | Formaletas utilizadas | 42 |
| 3.4 | Plan y descripción de ensayos | 43 |
| 3.4.1 | Propiedades mecánicas | 44 |
| 3.4.1.1 | Resistencia a la compresión: | 44 |
| 3.4.1.2 | Resistencia a la flexión: | 44 |
| 3.4.2 | Propiedades de permeabilidad | 45 |
| 3.4.3 | Estabilidad volumétrica | 46 |
| 3.4.4 | Deformaciones diferidas a largo plazo | 47 |
| 3.4.4.1 | Estructura de soporte | 47 |
| 3.4.4.2 | Medición de deformaciones | 47 |
| 3.4.4.3 | Probetas | 48 |
| 3.4.4.4 | Carga sostenida..... | 48 |
| 3.4.4.5 | Condiciones ambientales controladas..... | 49 |
| CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | | 50 |
| 4.4 | Introducción | 50 |
| 4.5 | Caracterización mecánica..... | 51 |
| 4.5.1 | Compresión en cilindros | 51 |
| 4.5.2 | Compresión en cubos..... | 54 |
| 4.5.3 | Flexión en vigas | 57 |
| 4.5.4 | Flexión en plaquetas | 60 |
| 4.6 | Propiedades a largo plazo..... | 63 |
| 4.6.1 | Permeabilidad | 64 |
| 4.6.2 | Estabilidad volumétrica – Retracción | 66 |
| 4.3.3 | Retracción en prismas con 28 días de curado estándar | 67 |
| 4.3.4 | Retracción en prismas con 7 días de curado estándar | 68 |
| 4.3.4 | Retracción en prismas, en ambiente de cámara de curado | 69 |
| 4.3.5 | Retracción en prismas, en ambiente de laboratorio | 71 |
| 4.3.6 | Retracción en prismas, en intemperie..... | 73 |
| 4.3.7 | Predicción de la retracción según ACI 209R-92 | 75 |

| | |
|--|------------|
| 4.3.8 Ejemplo del cálculo de la retracción según ACI 209R-92, para muestras con 28 de días de curado, 28 días de secado y para mezclas secas. | 75 |
| 4.3.9 Comparación de la retracción real y la predicción según ACI 209R-92 | 79 |
| 4.3.10 Predicción de la retracción según ACI 209R-92 – Modificada por valores obtenidos por Graybeal..... | 82 |
| 4.3.11 Comparación de resultados frente a diferentes autores | 86 |
| 4.7 Deflexión por Fluencia..... | 88 |
| 4.4.1 Deflexión por fluencia en elementos sometidos a curado estándar por 28 días ... | 88 |
| 4.4.2 Deflexión por fluencia en elementos sometidos a curado estándar por 7 días | 91 |
| 4.4.3 Comparación de los resultados | 93 |
| 4.4.4 Predicción de la deflexión por fluencia según el Euro código – 2. | 96 |
| CAPITULO 5. CONCLUSIONES, APORTES Y PROPUESTAS DE NUEVAS INVESTIGACIONES..... | 100 |
| 5.1 Conclusiones | 100 |
| 5.2 Aporte original del trabajo de grado | 102 |
| 5.3 Recomendaciones para futuras investigaciones | 102 |
| REFERENCIAS..... | 104 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Fig. 1 Granulometría arenas MINGAR Zipaquirá (Cundinamarca)..... | 34 |
| Fig. 2 Distribución del tamaño de partículas del cemento..... | 35 |
| Fig. 3 Granulometría hume de sílice..... | 37 |
| Fig. 4 Secuencia de mezclado para concretos de ultra alto desempeño | 40 |
| Fig. 5 Equipos utilizados en la toma de datos..... | 42 |
| Fig. 6 Formaleta utilizada para la fabricación de probetas | 43 |
| Fig. 7 Prueba de flexión en maquina Instrom. | 44 |
| Fig. 8 Prueba de tracción indirecta. | 46 |
| Fig. 9 Especímenes de permeabilidad..... | 46 |
| Fig. 10 Estructura de soporte. | 47 |
| Fig. 11 Equipo de adquisición de datos | 48 |
| Fig. 12 Probetas para ensayo de deformaciones diferidas en flexión. | 48 |
| Fig. 13 Sistema de carga para ensayo de deformaciones diferidas en flexión..... | 49 |
| Fig. 14 Sistema de control de humedad y temperatura..... | 49 |
| Fig. 15 Resultados a compresión en cilindros de concreto de ultra alto desempeño..... | 51 |
| Fig. 16 Resultados a compresión concretos de ultra alto desempeño respecto a otras investigaciones..... | 53 |
| Fig. 17 Resultados a compresión en cubos de concreto de ultra alto desempeño. | 55 |
| Fig. 18 Resultados a compresión en cubos y cilindros de concreto de ultra alto desempeño. | 56 |
| Fig. 19 Resultados a flexión en vigas para concretos de ultra alto desempeño..... | 58 |
| Fig. 20 Resultados a flexión en vigas para concretos de ultra alto desempeño a 90 días de fabricación. | 60 |
| Fig. 21 Resultados a flexión en plaquetas para concretos de ultra alto desempeño. | 61 |
| Fig. 22 Resultados a flexión en plaquetas vs literatura para concretos de ultra alto desempeño. | 62 |
| Fig. 23 Resultados de permeabilidad en concretos de ultra alto desempeño..... | 64 |
| Fig. 24 Retracción en prismas, con 28 días de curado estándar, dos tipos de mezclas y tres tipos de ambientes de secado | 67 |
| Fig. 25 Retracción en prismas, con 7 días de curado estándar, dos tipos de mezclas y tres tipos de ambientes de secado. | 69 |
| Fig. 26 Retracción en prismas, con 7 y 28 días de curado estándar, dos tipos de mezclas y en ambiente de cámara de curado al 100% de humedad. | 70 |
| Fig. 27 Retracción en prismas, con 7 y 28 días de curado estándar, dos tipos de mezclas y en ambiente de laboratorio..... | 71 |
| Fig. 28 Condiciones ambientales laboratorio de materiales PUJ..... | 73 |

| | |
|---|----|
| Fig. 29 Retracción en prismas, con 7 y 28 días de curado estándar, dos tipos de mezclas y en intemperie..... | 74 |
| Fig. 30 Condiciones ambientales en intemperie PUJ. | 75 |
| Fig. 31 Predicción de la retracción según ACI 209R-92, para muestras con 28 días de curado estándar y dos ambientes de secado..... | 78 |
| Fig. 32 Predicción de la retracción según ACI 209R-92, para muestras con 7 días de curado estándar y dos ambientes de secado..... | 79 |
| Fig. 33 Comparación de la retracción en mezclas secas medidas reales vs. ACI 209R-92, para muestras con 28 días de curado estándar y dos ambientes de secado..... | 80 |
| Fig. 34 Comparación de la retracción en mezclas fluidas medidas reales vs. ACI 209R-92, para muestras con 28 días de curado estándar y dos ambientes de secado..... | 80 |
| Fig. 35 Comparación de la retracción en mezclas secas medidas reales vs. ACI 209R-92, para muestras con 7 días de curado estándar y dos ambientes de secado..... | 81 |
| Fig. 36 Comparación de la retracción en mezclas fluidas medidas reales vs. ACI 209R-92, para muestras con 7 días de curado estándar y dos ambientes de secado..... | 81 |
| Fig. 37 Comparación de la retracción en mezclas secas medidas reales vs. ACI 209R-92 – modificado Graybeal, para muestras con 28 días de curado estándar y dos ambientes de secado..... | 83 |
| Fig. 38 Comparación de la retracción en mezclas secas medidas reales vs. ACI 209R-92 – modificado Graybeal, para muestras con 7 días de curado estándar y dos ambientes de secado..... | 83 |
| Fig. 39 Comparación de la retracción en mezclas fluidas medidas reales vs. ACI 209R-92 – modificado Graybeal, para muestras con 28 días de curado estándar y dos ambientes de secado..... | 84 |
| Fig. 40 Comparación de la retracción en mezclas fluidas medidas reales vs. ACI 209R-92 – modificado Graybeal, para muestras con 7 días de curado estándar y dos ambientes de secado..... | 85 |
| Fig. 41 Comparación de resultados de retracción en mezclas secas con 28 días de curado estándar frente a tres autores con mezclas y curado similar. | 86 |
| Fig. 42 Diagrama de deflexiones en plaquetas con curado estándar de 28 días, dos tipos de mezcla y sometidas a esfuerzos de flexión durante 72 días..... | 89 |
| Fig. 43 Condiciones ambientales de temperatura, durante ensayo de plaquetas con 28 días de curado. Cámara de ensayos de fluencia a flexión. | 90 |
| Fig. 44 Diagrama de deflexiones en plaquetas con curado estándar de 7 días, dos tipos de mezcla y sometidas a esfuerzos de flexión durante 60 días..... | 92 |
| Fig. 45 Condiciones ambientales de temperatura, durante ensayo de plaquetas con 7 días de curado. Cámara de ensayos de fluencia a flexión. | 93 |
| Fig. 46 Diagrama unificado de deflexiones en plaquetas con curado estándar de 7 y 28 días, dos tipos de mezcla y sometidas a esfuerzos de flexión durante 72 días..... | 94 |

| | |
|---|----|
| Fig. 47 Diagrama de comparación entre las deflexiones calculadas por el método del Eurocodigo – 2 y las mediciones reales de deflexión por fluencia en plaquetas de 7 y 28 días de curado.. | 99 |
|---|----|

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Caracterización arena media..... | 35 |
| Tabla 2 Caracterización cemento Sogamoso..... | 36 |
| Tabla 3 Tiempos de fraguado cemento Sogamoso..... | 36 |
| Tabla 4 Proporción de materiales para las mezclas utilizadas..... | 38 |
| Tabla 5 Relación de la permeabilidad del concreto con el coeficiente de permeabilidad y la profundidad de penetración NTC - 122 | 45 |
| Tabla 6 Cálculo de la deflexión por fluencia..... | 95 |
| Tabla 7 Cálculo de la predicción de la deflexión por fluencia | 97 |

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y SÍNTESIS

1.1 Introducción

La industria de la construcción en Colombia, presenta una inclinación marcada hacia el uso del concreto como principal material en la construcción de vivienda y proyectos de infraestructura teniendo en cuenta las múltiples zonas de fabricación del producto a lo largo del país. En consecuencia, la utilización del concreto supera a la utilización del acero bajo las condiciones de durabilidad y costo de oportunidad en cualquier región del país. Sin embargo, el concreto por si solo presenta una baja capacidad de asumir esfuerzos a flexión, lo cual es solucionado con la adición de acero, generando secciones considerables para asumir las cargas de diseño. Las resistencias obtenidas en concretos convencionales, donde no son superiores a 56 MPa, son causadas por altas relaciones agua cemento y la presencia de materiales gruesos, lo cual impide el correcto empaquetamiento de las partículas (Yu, Spiesz, y Brouwers 2014), generando una perdida sustancial de las propiedades ofrecidas por lo materiales. A pesar de esta situación, la tendencia en el mundo es la búsqueda de materiales y diseños, que permitan obtener altas resistencias y condiciones de trabajo superiores a las presentes en los concretos actuales. En Colombia se ha masificado la producción de mezclas de concreto con resistencias entre 2000 y 5000 psi (14 a 35 MPa) (Barrera 2006), lo cual dista de los condiciones buscadas en otros países, lo que hace necesario mejorar los requisitos de resistencia y durabilidad que se emplean en obra para generar calidad y resistencias en las condiciones de servicio (resistencias superiores a 40 MPa con resultados de permeabilidad bajos), llevando a la implementación de concretos con propiedades mejoradas desde la etapa del diseño de mezcla mediante la utilización de curvas de compacidad, sustituyendo material grueso por fino y reduciendo la relación agua cemento en las mezclas, generando concretos de ultra alto desempeño (UHPC).

El concreto de ultra alto desempeño, el cual se denominará de aquí en adelante como UHPC (Ultra High Performance Concrete), ha sido objeto de numerosas investigaciones en el mundo. (C. Wang et al. 2012) lo define como aquel con resistencias a la compresión superiores a 150 MPa (21.756 psi). Pueden ser reforzados con fibras y mostrar un aumento de su desempeño mecánico y una durabilidad mejorada en comparación con los concretos de alta resistencia (Amr S. El-Dieb 2009). Del mismo modo, los UHPC tienen típicamente una relación agua-material cementante (a/c) inferior a 0.3, llegando a ser densos y con altas resistencia a la compresión. Las resistencias a la tracción en los UHPC son limitadas y se encuentran alrededor de 8 MPa (1200 psi) pudiendo ser muy frágiles.

La adición de fibras, permite mejorar las características en este tipo de concreto (Amr S. El-Dieb 2009), esto permite establecer diferentes condiciones de mezclas y dosificación de material que incide de manera directa en las necesidades que se requieran satisfacer

encontrando 3 tipos: Tipo 1 – Con altas proporciones de fibras cortas, probado en Dinamarca en 1987, con contenido de fibra entre 5 y 10% de volumen y longitud de máximo 6mm (Tayeh et al. 2012), lo anterior demuestra la mejora de resistencia a la tracción, pero hacen muy poco para mejorar la ductilidad. Tipo 2 – Con proporciones intermedias de fibras largas, presentes en productos patentados como Ductal® y CERACEM®, el contenido de fibra está entre el 2 y 3% en volumen y la longitud de las fibras entre 13 y 20 mm. Las fibras mejoran la resistencia a la tracción y la ductilidad del concreto. Tipo 3 – Con proporciones muy altas de fibras de diferentes longitudes, un ejemplo de este producto es CEMTEC Multiscale (Serna Ros, Ángel, y Camacho Torregrosa 2015), donde el contenido de fibra de este producto puede ser de hasta 11 % en volumen y las fibras pueden variar desde 1 mm hasta 20 mm de largo.

Es pertinente indicar que a nivel mundial, se vienen realizando investigaciones para generar la aplicación de las principales características de los UHPC, teniendo como línea base del producto tres tecnologías: la primera hace referencia a los concretos autocompactantes, los cuales evitan el uso de vibradores para asumir la forma deseado sin la aparición de poros en su matriz, la segunda tecnología hace referencia a los concretos autocompactantes con fibras, generando resistencias considerables a flexión, y por último, se encuentran los concretos de alta resistencia, expresado en resistencias a compresión superior a los 200 MPa (Serna Ros, Ángel, y Camacho Torregrosa 2015). Producir concretos de estas características con la tecnología usual es poco viable, por ello la mayoría de las aplicaciones se han llevado a cabo de la mano de productos patentados (Ductal®, BSI®, BCV®, o CEMTEC® (Serna Ros, Ángel, y Camacho Torregrosa 2015), avalados en los resultados de las investigaciones conjuntas de universidades y empresas. Este tipo de concreto, se ha utilizado en elementos estructurales en Japón, USA y Europa Occidental, de acuerdo a recomendaciones técnicas específicas relativas al material (Serna Ros, Ángel, y Camacho Torregrosa 2015), aumentando la durabilidad de las estructuras con mantenimientos mínimos.

Por otra parte es muy importante tener en cuenta que la expansión de las obras de ingeniería civil está presente cada vez más en ambientes agresivos. En estas circunstancias, la durabilidad debe considerarse como una de las principales premisas de diseño. Es importante decir, que en los UHPC, la durabilidad y las características mecánicas mejoran debido a la homogeneidad de la composición, obteniéndose mediante la sustitución de los agregados gruesos por arenas muy finas y en ocasiones cuarzo molido (Teng, Lim, y Sabet Divsholi 2013). La composición de los UHPC, también se caracteriza por el uso de humo de sílice y grandes cantidades de cemento, baja relación agua cemento y el uso de aditivos reductores de agua de alta gama (Sabet, Libre, y Shekarchi 2013). El humo de sílice se utiliza para aumentar la producción de material cementante y como microfiller de vacíos del concreto, para reducir la porosidad y de esta manera mejorar la durabilidad.

Es entonces pertinente remitirnos al entorno local y evidenciar la falta de análisis de las propiedades de materiales asequibles en el país, que puedan dar inicio al diseño, utilización y producción de UHPC y de esta manera reducir la brecha en el desarrollo de estos nuevos materiales acercándonos a su implementación y a la comercialización de este tipo de productos en Colombia.

Las investigaciones realizadas en Colombia en torno a concretos de ultra alto desempeño son bajas, teniendo altas incertidumbres en el alcance y comportamiento de las resistencias buscadas ante las condiciones de clima y temperatura colombianas, generados por la falta de investigación y desarrollo del material en nuestro entorno. Por tal motivo existe un problema explícito generado en el desconocimiento del comportamiento de los UHPC en el país, tanto en su desempeño mecánico como en su potencial durable y de deflexiones a largo plazo, siendo necesario investigar las características de permeabilidad, entendiendo su importancia en la interacción con agentes externos que pueden o no influir en el comportamiento estructural y durable de las estructuras analizadas.

Las características de los materiales empleados en la producción de UHPC, están directamente ligadas con la composición química de los mismos, incidiendo esto, en la interacción de las partículas presentes en las mezclas (Bui et al. 2012), generando enlaces fuertes que proporcionan características superiores en las propiedades mecánicas, permitiendo establecer parámetros de control en el análisis de procesos realizados alrededor del mundo, obteniendo criterios de evaluación respecto a las características mecánicas, de permeabilidad y de deformaciones diferidas a largo plazo.

La utilización de materiales que son empleados en procesos no habituales o de baja comercialización, como los UHPC, hacen necesario la determinación de parámetros que permitan analizar su comportamiento, teniendo en cuenta que el agregado grueso está ausente, cambiando totalmente las condiciones de control. Lo anterior se da debido a que se requiere mayor cantidad de cemento para cubrir el área superficial de las partículas, incrementando el costo y reduciendo la manejabilidad de las mezclas.

El análisis de datos, permite relacionar el proceso de fabricación y curado, respecto a la alta o baja permeabilidad obtenida, denotando la incidencia directa en el deterioro prematuro o no del concreto de ultra alto desempeño, basado en que Colombia es un país localizado en el trópico, por lo cual presenta múltiples variables climáticas y cambios repentinos en su comportamiento, estableciendo una exigencia adicional al desempeño de las estructuras de concreto expuestas al medio ambiente, tema relevante que se evalúa con prismas de contracción analizados en diferentes condiciones. Es prioritario realizar un análisis detallado a las características de resistencia al deterioro (durabilidad), pero, que específicamente

incidan en la permeabilidad de los UHPC, como principal métrica para la revisión del potencial durable (Müller, Haist, y Vogel 2014).

Finalmente, en este trabajo de investigación, se pretende analizar el comportamiento de las mezclas de concreto de ultra alto desempeño evaluadas ante imposición de cargas a compresión y flexión, la permeabilidad de las muestras y las deflexiones a largo plazo a causa de la fluencia, ante lo cual, adquiere relevancia la ejecución experimental de ensayos para definir al detalle el comportamiento de las mezclas en los diferentes escenarios propuestos y condiciones de ensayos superiores a los 28 días de fabricación.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo de investigación es evaluar el comportamiento mecánico, permeable y de deformaciones a largo plazo en concretos de ultra alto desempeño.

Para lograr el objetivo descrito, a continuación se enuncian los objetivos específicos necesarios para obtener los resultados

- Caracterizar las propiedades mecánicas de los concretos de ultra alto desempeño fabricados con materiales locales y procesos convencionales
- Evaluar las propiedades relacionadas con la permeabilidad que afectan la durabilidad de los concretos de ultra alto desempeño.
- Evaluar el comportamiento frente a las deformaciones diferidas en los concretos de ultra alto desempeño

1.3 SINTESIS

El documento de investigación, se compone de cinco capítulos, estructurados de la siguiente manera:

- Capítulo 1. Introducción
- Capítulo 2. Antecedentes y estado del arte
- Capítulo 3. Planteamiento del programa experimental
- Capítulo 4. Resultados y discusión
- Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros

En el capítulo 1, se genera una introducción al tema de investigación, donde se justifica las actividades a desarrollar plasmadas en el objetivo principal y los objetivos específicos. Así mismo, se presenta la estructura del documento con la explicación de los temas que integra cada uno de los capítulos.

El capítulo 2 contiene una extensa revisión de literatura que abarca descripciones de las características físicas y químicas de los materiales usados en el desarrollo de los concretos

de ultra alto desempeño y las investigaciones realizadas por otros autores en relación a las propiedades mecánicas, de permeabilidad y de deformaciones a largo plazo, de tal manera que permita visualizar la importancia de la investigación en el ámbito científico.

El capítulo 3, presenta el programa experimental, donde se proporciona al detalle información acerca de los materiales, equipos y moldes usados, así como los ensayos previos y el programa de ejecución del proyecto con la combinación de variables a emplear.

El capítulo 4 corresponde a la presentación y análisis de resultados de los ensayos de compresión en cilindros y cubos de concreto, ensayos de flexión en vigas y en plaquetas, ensayos de retracción en prismas, ensayos de permeabilidad y de deformaciones diferidas a largo plazo, enmarcados dentro de discusiones respecto a otros autores.

En el capítulo 5 se establecen las conclusiones obtenidas en la investigación, el aporte original de la investigación y las futuras líneas de investigación que proporciona el desarrollo de los temas analizados en el presente trabajo de grado.

CAPITULO 2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se menciona el estado del arte que existe alrededor del desarrollo de investigaciones donde se analiza el comportamiento de los concretos de ultra alto desempeño, estudiándose los materiales empleados en la fabricación, así como las propiedades mecánicas, de permeabilidad y las deformaciones a largo plazo. Por último, se mencionan los efectos generados en la estructura y resistencia al adicionar o modificar materiales en las mezclas estudiadas alrededor del mundo.

2.1 MARCO DE ANTECEDENTES

Las investigaciones sobre UHPC, se han convertido en tema de interés mundial, dada su importancia en la modernización de materiales y en la mejora de las propiedades de los concretos convencionales e incluso de los concretos de alto desempeño.

El inicio de las investigaciones de UHPC, podemos decir que ocurrió en el año 1995 con la publicación de Richard Pierre and Marcel Cheyrezy “Composition of Reactive Powder Concretes” en donde no solo se dio el primer paso en la identificación de las propiedades del material, sino que se logró realizar todo un compendio de elementos que podían potencializar los resultados de las pruebas de este nuevo material. Se planteó inicialmente la mejora de la homogeneidad, en donde se identificó el concreto convencional como un material heterogéneo, en el que los agregados (arena y grava) formaban un esqueleto de elementos granulares contiguos a la pasta de cemento (cemento, aditivos y agua). Adicionalmente se identificó que la dureza de los agregados era mayor que la de la pasta, siendo un ejemplo que el módulo de Young para los agregados de sílice presentaba 70GPa, en comparación con 18 y 22 MPa, que proporcionaba la pasta. Problemas relacionados con la heterogeneidad se reducen sustancialmente con la utilización de UHPC por las siguientes razones: 1. Eliminación de los agregados gruesos, sustituidos por arena fina, (600 μm máximo); 2. Mejora de las propiedades mecánicas de la pasta; reducción de la relación agregado / matriz.

Con lo anterior, se descubrió la posibilidad de fabricación de dos tipos de UHPC. El primero se llamó RPC200, con curado entre 20 y 90°C, resistencia a la compresión entre 170 y 230 MPa y Resistencia a la flexión entre 30 y 60 MPa. El segundo, llamado RPC800, con curado entre 250 y 400 °C, resistencia a la compresión entre 490 y 680 MPa (usando polvo de cuarzo) y 680 a 810 MPa (usando agregado de acero) y resistencia a la flexión entre 45 y 141 MPa. También fue posible evidenciar que la aplicación de una presión de confinamiento para el concreto fresco combinado con una eliminación del exceso de agua, mejora aún más la densidad, teniendo en cuenta que las micro-fisuras inducidas no impiden la mejora en la resistencia a la compresión. Finalmente se descubrió que proporciones pequeñas de fibras de

acero, es decir en el orden del 2 al 2,5% del volumen, le proporciona un comportamiento dúctil al UHPC. (Richard & Cheyrezy, 1995)

Es importante mencionar que se han realizado investigaciones de durabilidad del UHPC, las cuales se han llevado a cabo revisando puntos de control tales como la permeabilidad en concretos reforzados con fibras. (Rapoport et al. 2002), realizó investigaciones sobre la permeabilidad del concreto fisurado, investigó la permeabilidad del UHPC reforzado con fibra de acero, en comparación con el concreto normal. La investigación se centró en la creación de pequeñas grietas en concretos reforzados con fibras de acero, y posteriormente la determinación de la permeabilidad del concreto. Los dos resultados principales fueron los siguientes: en primer lugar, este estudio confirmó los hallazgos de otros investigadores, los cuales descubrieron que las grietas de menos de 0,1 mm (0,004 pulgadas) de ancho tienen poco impacto en la permeabilidad del concreto normal. En segundo lugar, este estudio confirmó que el refuerzo con fibra de acero, reduce la permeabilidad total de una sección de concreto por el cambio en el mecanismo de agrietamiento, pasando de un puñado de grandes grietas con espesores considerables a muchas grietas con espesores pequeños. Como era de esperarse, el concreto con el porcentaje más alto de refuerzo de fibra, muestra mayor fisuración distribuida y con una menor permeabilidad (Rapoport et al. 2002). En grandes anchos de fisura, las macrofibras de acero de refuerzo reducen la permeabilidad de grietas en el concreto. El volumen de fibras de acero superior de 1 %, reduce la permeabilidad más que el volumen de fibras de acero inferior al 0,5 % en volumen, aunque todavía es menor que la permeabilidad del concreto no reforzado con fibras. Lo anterior es probable debido a la costura de grietas dado por el refuerzo de fibra de acero (Rapoport et al. 2002).

En la misma dirección de las investigaciones de durabilidad de UHPC, es muy importante nombrar los factores que intervienen en ella, tales como: penetración del ion cloruro, resistencia a la abrasión, reacción alcali-silice y resistencia a ciclos de hielo – deshielo (Graybeal y Hartmann 2003). En el caso de las pruebas rápidas de penetrabilidad del ion cloruro, las cuales fueron ejecutadas por Graybeal en el 2003, donde las muestras fueron sometidas al contacto directo con este agente y bajo la norma ASTM C1202. En UHPC, los resultados muestran que en la prueba rápida de permeabilidad al ion cloruro, la penetración del ion cloruro es mínima, independientemente del régimen de curado aplicado, además, es de señalar que la penetrabilidad del ion cloruro disminuyó significativamente entre los 28 y 56 días (360 Coulombs – muy bajo a 76 Coulombs – despreciable. respetivamente) para las muestras del régimen de curado al aire ambiente (Graybeal y Hartmann 2003). Finalmente se concluyó que en comparación con los concretos normales, los UHPC curados al vapor, deben ser efectivamente inmunes al ciclo hielo – deshielo y al daño por penetración del ion cloruro (Graybeal y Hartmann 2003).

Se ha investigado el efecto de la orientación de la fibra sobre las propiedades mecánicas de UHPC. Estos investigadores se centraron en un sistema patentado de UHPC comercializado bajo el nombre CARDIFRC ®. La primera diferencia es que CARDIFRC contiene dos longitudes de fibras de acero y un volumen total de fibra de 6 por ciento. Este programa de investigación se centró en el efecto de la dirección del flujo UHPC durante la colada en el comportamiento de tracción, compresión y de flexión del hormigón. El refuerzo de fibra tiende a alinearse con la dirección del flujo durante la colada, ante lo cual se investigó la resistencia a la tracción y comportamientos de compresión de UHPC cuando se encuentran paralelas y perpendiculares a la dirección del flujo durante la colada. Los ensayos de compresión se realizaron en cubos de 100 mm (4 pulgadas), y los ensayos de flexión se realizaron en cubos de 100 mm por 100 mm (4 * 4 pulgadas). Los ensayos de compresión en cubos, indican que la alineación de fibra preferencial no tiene ningún efecto significativo ya que en la resistencia a la compresión o el módulo de elasticidad de UHPC no cambia significativamente. Sin embargo, los ensayos de flexión mostraron que el pico de resistencia a la flexión equivalente de los prismas UHPC disminuyó por un factor de más de tres, cuando las fibras se alinean preferentemente perpendiculares a las principales fuerzas de tracción de flexión. Esta alineación de las fibras era claramente visible en las superficies de falla de los prismas. Estos prismas tampoco mostraron los comportamientos tradicionales de tenacidad pos-fisura normalmente asociados con UHPC y con frecuencia mostraron una disminución de la carga brusca inmediatamente después de la primera formación de grietas. Todos estos hallazgos apuntan a la importancia de comprender las cargas estructurales que se realizarán sobre un miembro de UHPC bajo un medio de instalación adecuado.

Es muy importante resaltar que en las investigaciones de los UHPC, se ha visto la necesidad de evaluar el comportamiento a largo plazo frente a los diferentes esfuerzos generados, llevando a cabo investigaciones muy importantes sobre el comportamiento de los UHPC frente a los fenómenos de retracción y flujo. En este orden de ideas, Paul Acker, inicio una serie de investigaciones con los laboratorios de LAFARGE en Francia, con el objetivo de analizar los fenómenos de retracción y fluencia en los UHPC, encontrando que los mecanismos de retracción y fluencia implican el mismo proceso de deformación viscoso en el gel de cemento, y que estas deformaciones tienen un límite físico, donde el acoplamiento no podía ser descritos como la suma de dos modelos independientes: el desacoplamiento (la construcción de un modelo capaz de describir el comportamiento completo) implicó pues, necesariamente el abandono del uso de las cantidades de retracción y fluencia como se define en el uso actual, y la elección de nuevas variables constitutivas de acuerdo con los mecanismos físicos que fueron identificados (Acker 2004).

Dentro de las conclusiones importantes de la investigación se encuentra que las reacciones de hidratación tienen un balance negativo de volumen, lo que resulta en una reducción significativa en la suma de los volúmenes específicos y en consecuencia, siempre que sea

cualquier micro-estructura rígido en la masa del concreto se opondrá a ella. El déficit de volumen de la reacción de hidratación sería suficiente para dar cuenta de una compactación del gel en cualquiera de las siguientes circunstancias:

- a. con un medio infinito o no permeable, porque la auto-deseccación y el ángulo de mojado causan la interfaz líquido-gas a la curva de retracción cada vez más fuerte, lo que genera tensiones capilares en la superficie (similar a lo que ocurre cuando se seca una arcilla).
- b. con un medio finito y permeable, debido a que la viscosidad del agua no es despreciable y la entrada de agua que compensa el déficit genera un gradiente de presión de acuerdo con la ley de Darcy, que establece que cualquier flujo produce un gradiente de presión. En la práctica, la situación se encuentra entre estos dos extremos, como resultado de lo cual el gel de cemento siempre se compacta. Las tensiones capilares constituyen, dentro de un volumen de líquido conectado (masa), un sistema de fuerzas superficiales continuas que tiende hacia un estado de equilibrio y uniformidad, de tal manera que una presión hidrostática se ejerce en la masa y tiende a ser uniforme (Acker 2004).

Teniendo en cuenta que la investigación a realizar está fundamentada en analizar las propiedades mecánicas, de permeabilidad y el comportamiento a largo plazo de las deformaciones diferidas, se hace necesaria la descripción de las principales características y efectos relacionados con los UHPC, tal como se describe a continuación.

2.2 Principales componentes y variables que afectan su desempeño

2.2.1 El efecto del tamaño de los agregados

Al fabricar concretos convencionales se forma un conjunto de inclusiones rígidas, sobre las que se genera un esfuerzo de compresión torsional y un esfuerzo de tensión que resultan en la interface pasta / agregado generando grietas en la pasta. El tamaño de estas grietas se relaciona con la extensión de la zona bajo la tracción o esfuerzo de corte. En el caso de una inclusión esférica, el tamaño de la grieta es directamente proporcional con el diámetro de la inclusión. Para un UHPC, el cual presenta una reducción en el tamaño del agregado más grueso por un factor de aproximadamente 50 (por ejemplo, 400 μm en lugar de 20mm), se obtuvo una reducción en el tamaño de las microfisuras (Richard y Cheyrezy 1995).

2.2.2 El efecto de la mejora en las propiedades mecánicas de la pasta

Los concretos UHPC siempre tienen valores de módulo de Young que exceden 50GPa, y que pueden llegar a estar en 75GPa para aquellos con las mayores densidades. En este último caso, se observa que el módulo global de la pasta y el agregado, es ligeramente más alto que para el agregado de sílice. Así, el efecto mecánico de la heterogeneidad se ha eliminado totalmente, e incluso invertido (Richard y Cheyrezy 1995). Esto se da por los fuertes enlaces que forman el cemento con la arena de sílice, siendo complejo la ruptura de los mismos

después que el elemento se ha sometido a curado y su proceso de hidratación está casi finalizado.

2.2.3 El efecto del límite de contenido de arena

Los efectos mencionados anteriormente están relacionados con el tamaño del agregado y se pueden describir como "meso-efectos". La reducción del contenido de arena representa un "macro - efecto" global. En un concreto convencional, los agregados (grava y arena) son los componentes mayoritarios en términos de volumen, y forman un esqueleto rígido de elementos granulares contiguos, esto significa que una mayor proporción de la retracción de la pasta es bloqueada por este esqueleto granular, lo que genera un aumento de la porosidad. En el caso de un UHPC, el volumen de la pasta es al menos 20% mayor que el índice de vacíos de arena no compactada, por lo tanto los agregados utilizados en UHPC no forman un esqueleto rígido, pero si un conjunto de inclusiones unidas en una matriz continua. La retracción de la pasta está bloqueada localmente alrededor de cada partícula de agregado (con consecuentes disminuciones como resultado del efecto de limitación de tamaño mencionado anteriormente), mientras que la contracción global no está bloqueada por un esqueleto rígido, donde cada grano puede ser transportado por la pasta y puede migrar con respecto a sus vecinos. Esta ventaja sólo se refiere a las estructuras donde la contracción global no está restringida por ninguna fuente externa (por ejemplo, un encofrado) (Richard y Cheyrezy 1995), explicando así una mayor resistencia y menor permeabilidad.

2.2.4 El humo de sílice

El humo de sílice usado en concretos UHPC tiene tres funciones principales: 1. Llenar los vacíos entre las clases más grandes de partículas (cemento); 2. Mejora de las características reológicas por el efecto de lubricación resultante de la esfericidad de las partículas básicas; 3. Producción de hidratos secundarios por reacción puzolánica con la cal resultante de hidratación primaria generada en primera instancia por la absorción de agua presente en la mezcla. Los siguientes parámetros se usan para la caracterización de humo de sílice: - grado de agregación de las partículas; - naturaleza y cantidad de impurezas; - tamaño básico de partículas (Richard & Cheyrezy, 1995).

2.2.5 El Polvo de Cuarzo

El polvo de cuarzo es un ingrediente esencial para los UHPC con tratamiento térmico de curado. Su reactividad máxima durante el tratamiento con calor se obtiene para un tamaño medio de partícula de entre 5 y 25µm. El tamaño principal de partícula de cuarzo triturado utilizado para un UHPC es 10 µm, y por tanto está en la misma clase granular que el cemento. Su aporte en UHPC, está dado a realizar un control adecuado de la temperatura de la mezcla en el proceso de fragua de la misma, teniendo en cuenta el alto contenido de cemento por metro cúbico (mayor a 700 Kg/m³). (Richard & Cheyrezy, 1995).

2.2.6 La Microestructura mejora por el curado con calor

Llevando a cabo un tratamiento con calor después de que el concreto ha fraguado. El tratamiento con calor a 90°C acelera sustancialmente la reacción puzolánica (combinaciones entre los materiales finos producidos ante la presencia de agua), modificando la microestructura de los hidratos que se han formado, es decir genera más enlaces entre las moléculas proporcionando uniones fuertes que explicadas químicamente, generan la formación de hidratos cristalinos (xonotlita), acompañados por una importante deshidratación de la pasta endurecida (Richard y Cheyrezy 1995).

2.2.7 La Ductilidad mejora por la incorporación de fibras

El comportamiento de las matrices de UHPC es estrictamente lineal y elástico, que corresponde a que la energía de fractura no excede los 30J m⁻². Las fibras deben ser añadidas para mejorar la ductilidad de los UHPC. Las fibras de acero rectas utilizadas son de 13 mm de largo, con un diámetro de 0,15 mm. Las fibras se introducen en la mezcla en una proporción de entre 1,5 y 3% en volumen. La proporción económicamente óptima corresponde a una proporción de 2%, o alrededor de 155kg/m³. Esto permite obtener muestras de UHPC con mayor capacidad a recuperar su estado natural sin perder su resistencia comparados con estructuras convencionales que son muy rígidas y no poseen capacidad para recuperar su estado inicial.(Rossi, 2008)

2.3 Concretos de Ultra Alto Desempeño

Los concretos de ultra alto desempeño (UHPC) son un compuesto de cemento con una resistencia a la compresión que excede los 150 MPa (21.756 psi), una resistencia a la tracción de más de 7 MPa (1.015 psi), y baja porosidad. Presenta comportamientos adecuados en cuanto a la durabilidad y las características mecánicas, debido a la mejora en la homogeneidad de la composición obtenida mediante la sustitución de los agregados gruesos por arenas muy finas y cuarzo molido. La composición también se caracteriza por el uso de humo de sílice; grandes cantidades de cemento; pequeñas relaciones agua cemento (a/c), y el uso de aditivos reductores de agua de alta gama. En este tipo de mezclas, el humo de sílice se utiliza para aumentar producción de CSH y como micro - llenante de vacíos en el concreto para reducir la porosidad (Magureanu et al. 2012). Para satisfacer las anteriores consideraciones, el contenido de humo de sílice deberá estar en el rango del 25 al 30 % de la masa de cemento. En UHPC, la gran cantidad de ligante (cemento + humo de sílice) conduce a un comportamiento frágil y a una tendencia a la micro-fisuración debido a la alta retracción autógena. En consecuencia se evidencia la necesidad de la utilización de fibras de acero para controlar estos fenómenos en la composición de la mezcla de concreto. (Magureanu et al. 2012).

Como prueba de lo anterior, diferentes investigadores alrededor del mundo han desarrollado composiciones que permiten obtener mezclas de UHPC con materiales asequibles y métodos comunes de mezclado, logrando resistencias a la compresión de 176 MPa a 278 días y de 183 MPa a 365 días (C. Wang et al. 2012), demostrando claramente la importancia de este tipo de material en el sector de la construcción e infraestructura, no solamente en la preparación y obtención de mezclas en laboratorio, sino en la manejabilidad y bombeo del mismo mediante la aplicación de superplastificantes y retardadores que permiten dar manejo en la etapa de colocación del mismo. Los UHPC, también son reconocidos por poseer bajas relaciones agua – cemento, que usualmente se encuentran por debajo de 0.3 (C. Wang et al. 2012), generando grandes desafíos en el manejo de las reacciones químicas, teniendo en cuenta que la cantidad de cemento utilizado para lograr altas resistencias es elevado comparado con la cantidad de agua presente en el diseño, esto, partiendo del hecho que el cemento reacciona en presencia de este líquido para obtener la adquisición de resistencia.

Finalmente, como método para distribuir esfuerzos, y reducir las fisuras en los concretos de ultra alto desempeño, convirtiéndose como elemento fundamental en el diseño está la utilización de fibras metálicas, que son comercializadas en diferentes presentaciones, es decir, poseen diferentes diámetros, longitudes y figuración, lo cual permite aumentar la variedad de concretos ofrecidos para diferentes trabajos, dado en la multiplicidad de requerimientos de la industria de la construcción (Amr S. El-Dieb 2009).

La capacidad de resistir en forma satisfactoria las condiciones de servicio a las que estará sujeto, tales como la meteorización, acciones de elementos químicos y de desgaste, es conocido como durabilidad del concreto (de Guzmán 2002). Es indispensable que el concreto resista a las condiciones con las que se ha proyectado, más aún, cuando las condiciones ambientales y el entorno sean agresivos. En concretos de ultra alto desempeño, la durabilidad de las mezclas, presentan un buen comportamiento, teniendo en cuenta que los vacíos presentes en la matriz, son muy bajos comparados con los concretos convencionales, generando alcances notorios en la conservación de estructuras y disminución de costos en la reparación y mantenimiento de las estructuras (Müller, Haist, y Vogel 2014). Además, la ingeniería estructural, buscando un enfoque ambiental y sostenible, pretende que la energía y el consumo de material sean menores. Para tal fin, las estructuras construidas con concreto, pueden ser más eficientes teniendo en cuenta su resistencia y durabilidad enmarcadas dentro del tiempo que prestará el servicio.

4.1 Permeabilidad del Concreto

La permeabilidad del concreto se refiere a la cantidad de migración de agua a través del concreto cuando el agua se encuentra a presión, o la capacidad del concreto de resistir la penetración del agua u otras sustancias, dada en centímetros cúbicos por segundo o litros por minuto. La permeabilidad en el concreto será la capacidad que posee la mezcla de concreto

de resistir la penetración de agua y sustancias nocivas, lo cual permite obtener resultados y conclusiones de alta o baja presencia de vacíos, claves para la determinación de la capacidad durable de los concretos de ultra alto desempeño. La evaluación de durabilidad de UHPC reforzados con fibras metálicas con un envejecimiento acelerado, ha permitido obtener estimaciones de la porosidad del material, siendo elevadas en comparación con una mezcla sin fibras. A pesar que esta característica es perjudicial para la durabilidad y resistencia del concreto, se determinó que el 74% de la porosidad, comprende poros inferiores a 4nm (W. Wang et al. 2014), siendo un resultado aceptable en la durabilidad de las mezclas, si se compara con concretos convencionales.

Los concretos de ultra alto desempeño, exhiben una muy baja permeabilidad al agua, que en orden de magnitudes tiene un coeficiente de permeabilidad más bajo que los concretos normales. Lo anterior puede ser atribuido a una microestructura más densa y homogénea, con mínima porosidad por los efectos de llenado del humo de sílice y el polvo de cuarzo que conducen a desconectar los poros y dan como resultado una muy baja permeabilidad.(Tam, Tam, & Ng, 2012).

De acuerdo con la información existente acerca de la permeabilidad, encontramos que las variables que más afectan la permeabilidad en los concretos de ultra alto desempeño son la relación agua / materiales cementantes y la dosificación de superplastificante. Cuando se reduce la relación agua / materiales cementantes se obtienen menores coeficientes de permeabilidad, lo que puede ser atribuido a pequeños poros con bajas relaciones agua / materiales cementantes y un volumen de gel bruto de hidróxido de calcio hidratado que forman cristales en bloques que desconectan los poros capilares.(Tam et al., 2012).

El efecto de la dosificación del superplastificante en la mezcla de los UHPC, no es tan significativo como la relación del agua / materiales cementantes, sin embargo, una dosificación óptima de superplastificante puede reducir el contenido de agua y la cantidad de poros, ayudando a dispersar mejor las partículas del material, dando como resultado una pasta densa y muy compacta con baja porosidad. Por el contrario, una dosificación insuficiente, dará como resultado dificultades de compactación y alta porosidad además de interconectar los poros predominantes. Por otra parte, el exceso de superplastificante, puede producir problemas de compatibilidad química que conduzca a la segregación de la mezcla, generando una alta porosidad y consecuentemente una mayor permeabilidad al agua.(Tam et al., 2012).

La influencia de la dosificación de superplastificante sobre la permeabilidad al agua en los UHPC, es más significativa en edades tempranas que a largo plazo, debido a que el superplastificante puede retrasar la hidratación de cemento, con este retraso de la formación de suficientes bloques de hidróxido de calcio hidratado y otros productos de la hidratación que puedan bloquear los poros capilares.(Tam et al., 2012). Existe una relación inversa entre

la resistencia de los UHPC y la permeabilidad al agua, de tal forma que cuando la permeabilidad al agua disminuye, la resistencia a la compresión aumenta.(Tam et al., 2012)

4.2 Retracción del concreto

Las dos formas principales de la retracción, endógena y por secado, son esencialmente deformaciones viscosas que afectan a la matriz del aglutinante (Acker 2004). La retracción del concreto endurecido se presenta cuando el agua contenida en la pasta endurecida es cedida al ambiente aplastando la micro-estructura cristalina o gel dadas las fuerza de menisco que se generan. Por lo tanto, se puede decir que la retracción es provocada por la pérdida de humedad en el concreto que puede generarse a partir de procesos de secado, carbonatación o hidratación autógena del cemento. La retracción del concreto endurecido es entonces definida como su disminución volumétrica en el tiempo, debida a cambios en su contenido de humedad, la cual ocurre en ausencia de esfuerzos provocados por acciones externas y con tendencia a disminuir en el tiempo asintóticamente hasta un valor límite (Cruz y Blanco 2015)

La retracción autógena, ocurre en la ausencia de intercambio de humedad (como en una muestra de concreto sellada) debido a las reacciones de hidratación que tienen lugar en la matriz de cemento denominada con menos frecuencia contracción química. Los cambios de volumen en edad temprana, son causados por la dilatación térmica, que es una consecuencia del desarrollo del calor de hidratación, la deformación autógena y la retracción por secado, debido a la pérdida de humedad con el ambiente (Lura et al. 2003). En concretos normales, la retracción autógena puede ser insignificante, mientras que en mezclas con bajas relaciones agua cementantes y alto volumen de humo de sílice es muy importante (Lura et al. 2003). La retracción autógena aumenta cuando la relación agua / cemento disminuye puede llegar a ser tan grande como la retracción de secado para relaciones de agua cemento de 0,30 (Tazawa 1999).

Los concretos de ultra alto desempeño presentan retracciones de secado relativamente bajas. Lo anterior podría ser en parte, debido a la reducción de los tamaños de los poros y conectividad de los vacíos, con resultados de la alta densidad de empaquetamiento de los UHPC y en parte por el efecto de pre esfuerzo del humo de sílice sobre la desaceleración de la evaporación de agua y la restricción de la retracción. Altas relaciones de agua / materiales cementantes, resultan en altas retracciones. Lo anterior se sustenta en el gran desequilibrio que se presenta entre la humedad relativa en el concreto y el ambiente externo de secado, que deriva en una alta evaporación y la formación de más poros, con el desarrollo de altas tensiones superficiales en ellos que causan retracción en el concreto.(Tam et al., 2012).

La cantidad de superplastificante se considera como una de las variables que afectan la retracción en los UHPC, en donde dosificaciones altas darán como resultado altas mediciones

de retracción. Lo anterior puede sustentarse en que las altas dosificaciones de superplastificante pueden causar cambios en la estructura de los poros con influencia en el estado de agua evaporable y consecuentemente en el comportamiento de la retracción. (Tam et al., 2012). La retracción en concretos de alta resistencia, es algo menor a la de concretos convencionales, debido a la baja relación agua/cemento y a la finura de su microestructura. El concreto de alta resistencia presenta una retracción autógena mucho mayor que los concretos convencionales, en cambio la retracción de secado es muy baja debido a la escasa presencia de agua libre. Debido a la gran cantidad de cemento dispuesto en los concretos de alta resistencia, es muy importante el tipo de endurecimiento, cemento de endurecimiento lento, normal o rápido. En las primeras edades, la retracción autógena de los concretos de alta resistencia es mayor (Duarte Gómez 2010).

Finalmente es importante citar que (Graybeal, 2006) encontró una diferencia importante en el comportamiento frente a la retracción de secado de los UHPC, con respecto a las premisas del ACI 209R, principalmente en la retracción última, que dio como resultado una retracción de 555×10^{-6} mm que es diferente al valor dado de 780×10^{-6} mm, adicionalmente, encontró que el 95% de la retracción se desarrolla en los primeros 56 días de secado.

4.3 Flujo del concreto

Se puede afirmar que el equilibrio volumétrico del concreto existe cuando la presión interna en los micro-poros, poros y conductos capilares es constante e igual a la presión externa de vapor. Pero si un esfuerzo de compresión es aplicado en el material equilibrado, se genera un incremento en la presión interna y consecuentemente las moléculas de agua empiezan a migrar hacia afuera, de manera que el tamaño de los vacíos disminuye. Al disminuirse la cantidad de agua dentro de la micro-estructura de la pasta, se presenta nuevamente un incremento en las tensiones de menisco, que tienden a comprimirla junto con la carga generándose así el flujo plástico. El flujo plástico del concreto endurecido se define entonces como el incremento de deformación dependiente del tiempo, que se presenta cuando este se sujeta a una carga sostenida, restada la retracción. Al igual que la retracción, el flujo disminuye en el tiempo asintóticamente hasta un valor límite (Cruz y Blanco 2015).

La fluencia (en el sentido experimental de la expresión, es decir, la deformación que se "añade" a la deformación por retracción cuando se aplica una carga permanente) ya no puede ser tratada independientemente de la retracción - un material que se ha reducido mucho, no se someterá a la misma fluencia como un material que siendo todo lo demás igual, no se ha reducido significativamente. Esto sugiere un fuerte efecto de acoplamiento entre la retracción y la fluencia (Acker 2004). En los ensayos para fluencia a flexión, la fluencia del concreto

produce una deflexión, dado que si la fluencia es diferente en tensión y en compresión, es inevitable un desplazamiento del eje neutro (Ranaivomanana, Multon, y Turatsinze 2013).

Las deformaciones en los materiales se pueden clasificar respecto de dos parámetros: el tiempo y la recuperación. Respecto del tiempo se tienen deformaciones instantáneas y diferidas, y respecto de la recuperación se tienen deformaciones reversibles e irreversibles. Esto lleva a cuatro tipos de deformación (Lopez, 2005): deformación instantánea reversible (elástica), deformación instantánea irreversible (plástica), deformación diferida reversible (elástica retardada) y deformación diferida irreversible (viscosa). Las últimas dos deformaciones (elástica retardada y viscosa) son consideradas como la causa de la fluencia en el hormigón.

Tipos de fluencia

- Fluencia básica: La fluencia básica depende de las características del material, pero no de las dimensiones del elemento o de las condiciones ambientales, debido a que la deformación instantánea se compone de deformación elástica y fluencia incipiente, resulta complejo medir la fluencia básica (Lopez, 2005). La fluencia básica se define como la diferencia entre la deformación total y la deformación elástica, en un ambiente sin intercambio de humedad (sin secado ni hidratación). A efectos prácticos, es suficiente con determinar con precisión las deformaciones totales.(Arango Campo, 2010)
- Fluencia de secado: Depende de las características del material, de los parámetros ambientales (humedad relativa y temperatura) y de las dimensiones del elemento. Se puede definir como la deformación de un concreto sometido a tensiones a lo largo del tiempo que se presenta como complemento de la fluencia básica y la retracción de secado en un ambiente de secado. (Lopez, 2005).

Existen efectos sobre la fluencia del concreto, producidos por características como la humedad relativa durante y después de la puesta en carga del espécimen y la cantidad de agua evaporable que contenga el mismo. Afectan directamente las mediciones de fluencia en el concreto, en donde a menor humedad relativa de secado de la muestra cargada, mayor es la fluencia, así como a mayor cantidad de agua evaporable en el espécimen, mayor será su fluencia (Brooks 2014). Es importante citar que existe una influencia de la edad de aplicación de carga en el concreto sobre la fluencia relativa, en donde para especímenes cargados a temperatura ambiente se tienen mayores mediciones de fluencia relativa a menor edad y en relación con ello, a mayor edad se obtienen valores menores de fluencia relativa en compresión (Brooks 2014).

Por otra parte se debe tener en cuenta que el tamaño y la forma de los especímenes de fluencia, afecta directamente su medición, en donde para grandes piezas de concreto que tienen un volumen grande / la proporción de área superficial, la fluencia total se vuelve menor (Brooks 2014). Una de las variables con mayor incidencia en la fluencia del concreto es el instante de aplicación de carga, es decir la edad del espécimen en la cual se aplica la carga y el nivel de esfuerzo aplicado (Marí, Bairán, y Duarte 2010). A mayor edad del espécimen, disminuye la fluencia. Así mismo el curado y la humedad relativa son otras variables que afectan el comportamiento de la fluencia en los especímenes de concreto, en donde a mayor

curado disminuye la fluencia y a mayor humedad, también disminuye la fluencia (Duarte Gómez 2010). En línea con el enunciado anterior, (Arango Campo, 2010) coincide en que la edad de carga influye en la fluencia, debido a que la edad del concreto condiciona la variación de la resistencia. En concretos jóvenes se notan mucho más estas variaciones, teniendo velocidades de fluencia mayores en las primeras semanas respecto de hormigones más maduros. A partir de una determinada edad se producen leves alteraciones en el valor de la fluencia, pues las resistencias tienden a estabilizarse.

Otros factores importantes a tener en cuenta al momento de establecer la influencia sobre la fluencia en el concreto, son la pasta de cemento y los agregados, se puede decir que la pasta de cemento es donde se da la fluencia y que los agregados conforman un esqueleto elástico que restringe la fluencia. La relación agua-cemento se considera un factor muy importante, ya que determina la estructura y la porosidad en la pasta de cemento (que es donde ocurre la fluencia). El incremento en fluencia al aumentar la relación agua/cemento en el concreto, es debido a la consecuente reducción en resistencia y al incremento en la permeabilidad (Lopez, 2005). Una relación agua-cemento baja no solo incrementa la resistencia final, sino que además aumenta la ganancia de resistencia en función del tiempo.

Finalmente es importante resaltar que durante la revisión bibliográfica se encontraron diferentes propuestas de medición de fluencia a flexión. En primer lugar se encontraron propuestas como la de (Arango Campo 2010), donde planteó un método para la medición de la fluencia a flexión para concretos reforzados con fibras, teniendo en cuenta que los especímenes trabajan en estado fisurado, debiendo pre-fisurar las muestras para dar inicio al ensayo que fue desarrollado como un montaje de columna de probetas, el cual, mediante un brazo de palanca le transmite carga a los especímenes a ensayar. Propuestas de ensayo, tienen en cuenta la deformación de los especímenes, que para la presente investigación no será analizada por no presentar las facilidades para la medición de las deflexiones. Por otra parte se reportan mediciones de la fluencia básica en flexión para concretos normales por (Ranaivomanana, Multon, y Turatsinze 2013), en donde se propone un dispositivo para ensayar probetas a flexión envueltas en plástico, de tal manera que no permita la transferencia de humedad con el ambiente, es decir, fluencia básica, en donde también el objetivo fue la estimación de la deformación por fluencia y por tanto no fue posible replicar este dispositivo para la medición de las deflexiones por fluencia.

En consecuencia, en la revisión bibliográfica, no se evidencia desarrollo de ensayos que cumplieran con las necesidades de esta investigación, en términos de las facilidades para realizar las etapas de carga y medición de las deflexiones por fluencia en plaquetas bajo condiciones ambientales controladas por tanto, este ensayo no ha sido abordado por ningún investigador. En razón a lo anterior, se ha propuesto un método de masa colgante, el cual transfiere la carga al centro de la luz de cada plaqueta para que en ella se desarrollen las deflexiones que es nuestro objetivo medir.

Para terminar este capítulo es preciso hacer referencia a la falta de información sobre los concretos de ultra alto desempeño producidos en Colombia, en donde incluso a nivel mundial, es claro que la etapa de conocimiento a través de la investigación sobre este material

en particular es incipiente, aunque está creciendo de manera muy notoria. En consecuencia, se evidencia la necesidad explícita, de explorar el comportamiento de este material, aplicado a las condiciones y materias primas del país, que permita explorar nuevas formas, aplicaciones y desarrollo en los campos de la infraestructura y la construcción inmobiliaria.

CAPITULO 3. PLANTEAMIENTO DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Introducción

Ante la necesidad de estudiar el comportamiento de mezclas de concreto de ultra alto desempeño, elaboradas con materias primas locales, en la facultad de ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana, se planteó un estudio para determinar el comportamiento mecánico, de permeabilidad y de deformaciones a largo plazo, que permitieran establecer lineamientos para su desarrollo y comercialización en los años venideros.

El estudio se enfocó al diseño de dos tipos de mezclas y un planteamiento para realizar el análisis de sus propiedades mediante la elaboración de una hoja de ruta experimental. Las mezclas se basaron en establecer un parámetro fijo, que en este caso fue la manejabilidad, es decir, una mezcla con manejabilidad baja y otra con una manejabilidad alta, determinado con el ensayo modificado de flujo para morteros. Siempre se utilizó un sistema de mezclado estandarizado y las probetas de cada uno de los ensayos siempre fueron vibradas, lo que proporcionó resultados relacionados únicamente con las diferencias en las proporciones de cada mezcla.

Con lo anterior, se pretende analizar el comportamiento y evolución de las mezclas ante sollicitaciones de carga y ambientes impuestos, que simulen las condiciones a las cuales serán sometidas en la vida útil de cualquier estructura que se construya con este tipo de material, teniendo como premisa el comportamiento del material en lapsos de tiempo superiores a 28 días de edad después de su fabricación.

El desarrollo del proyecto consistió en la utilización de los dos tipos de mezclas de concreto de ultra alto desempeño, diseñados con los parámetros anteriormente citados, los cuales se utilizaron para la elaboración de probetas, que permitió el análisis de información ante ensayos de compresión, flexión, permeabilidad al agua bajo presión, retracción y de deflexiones diferidas a largo plazo. Así mismo, se estableció que las mezclas utilizadas en la investigación, se sometieron a vibración en su estado plástico y su curado fue estándar, realizado en la cámara de curado con parámetros de temperatura y humedad controladas.

En este capítulo se pretende describir el método experimental, los materiales utilizados, el proceso de mezclado, y los recursos utilizados en la toma de análisis y resultados de los datos obtenidos en cada ensayo elaborado en el desarrollo de la investigación.

3.2 Descripción de la investigación

La investigación propuesta, se basó en el desarrollo de mezclas de concreto de ultra alto desempeño, utilizando materias primas locales, como la arena y el cemento; que unidos con el humo de sílice, fibras metálicas, aditivo y agua, en diferentes proporciones, generaron los dos tipos de mezclas a evaluar, enfocados en configurar una mezcla de consistencia seca o de baja manejabilidad y otra de consistencia fluida o autocompactante.

Así mismo, con el desarrollo de las mezclas de concreto, se establecieron los métodos, las normas y los procesos para satisfacer los objetivos de la investigación. El plan desarrollado, se fundamentó en establecer las pautas para determinar el desempeño del material frente a las propiedades mecánicas, de permeabilidad, de retracción y de deformaciones diferidas a largo plazo en flexión.

3.2.1 Materiales

Los materiales empleados en la ejecución de la fase experimental fueron:

- Arena de sílice

Para este estudio se seleccionó como fuente de arena silícea seleccionada, la planta MINAGAR, localizada en el municipio de Zipaquirá, departamento de Cundinamarca, la cual proporcionó arenas con características granulométricas que se pueden observar en la figura 1.

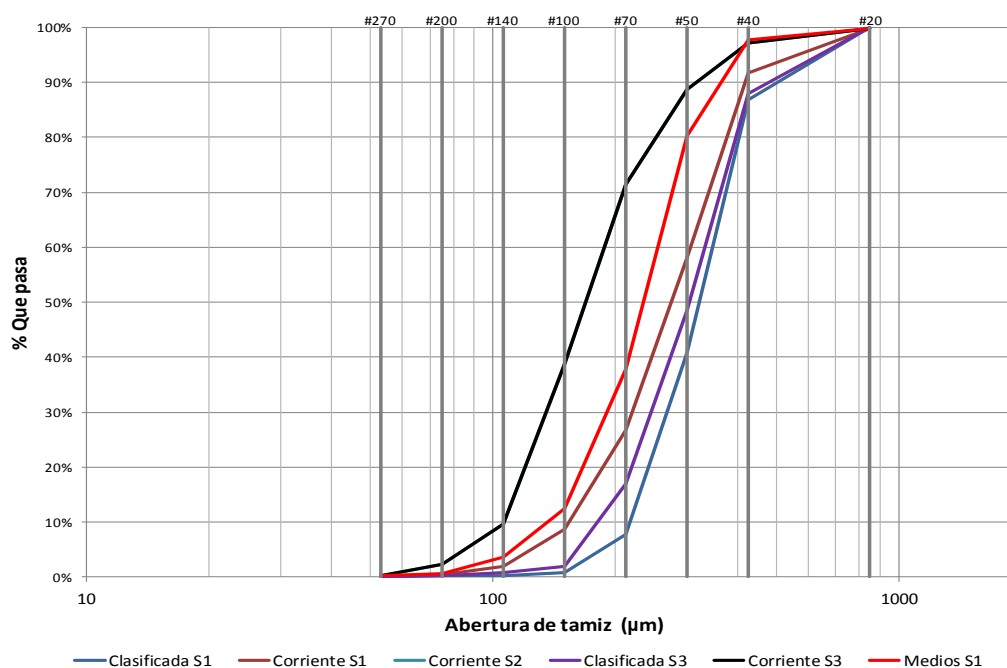


Fig. 1 Granulometría arenas MINAGAR Zipaquirá (Cundinamarca)

Dadas las características requeridas de la arena para fabricar concretos de ultra alto desempeño (entre 150μ y 600 μ), se determinó el empleo de la arena con curva granulométrica media, que para este caso, hace referencia a la arena denominada Medios S1.

Adicional a la caracterización granulométrica, se evaluaron algunas de las propiedades físicas de dicha arena tal como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1 Caracterización arena media Medios S1.

| Ensayo | Resultado |
|---|------------------------|
| Gravedad Específica Bulk | 2.44 g/cm ³ |
| Gravedad Específica Bulk saturada superficialmente seca | 2.45 g/cm ³ |
| Gravedad específica aparente | 2.45 g/cm ³ |
| Absorción | 0.56% |
| Masa unitaria suelta | 1.30 g/cm ³ |
| Masa unitaria vibrada | 1.50 g/cm ³ |

Fuente: PUJ 2014)

- Cemento

Para el proyecto se usó un solo tipo de cemento producido por Cementos Argos, correspondiente a “Cemento concretero Sogamoso”. La caracterización de la distribución del tamaño de partículas del cemento a emplear se puede observar en la Figura 2.

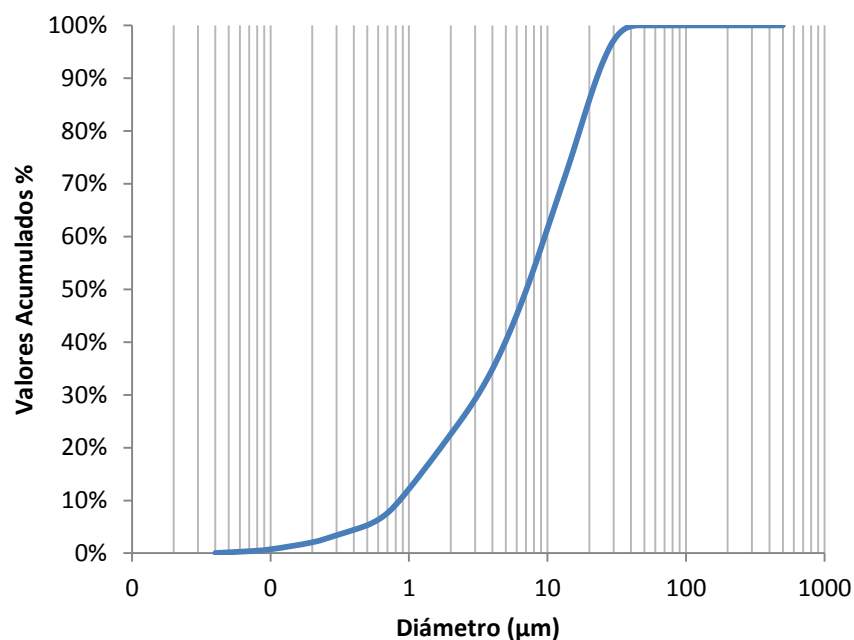


Fig. 2 Distribución del tamaño de partículas del cemento

Fuente Cementos Argos (2014)

Dentro de la caracterización física realizada al cemento Sogamoso se realizaron los ensayos que se pueden observar en la tabla 2.

Tabla 2 Caracterización cemento Sogamoso.

| Ensayo | Resultado |
|--|-------------------------|
| Resistencia | 45.1 MPa |
| Densidad | 3.08 g/cm ³ |
| Finura | 4808 cm ² /g |
| Relación agua/cemento para una consistencia normal | 0.282 |

Fuente: Cementos Argos (2014)

Los tiempos de fraguado para el cemento Sogamoso se determinan a partir de los datos de la tabla 3, donde se muestran los valores de penetración del aparato de Vicat vs. Tiempo; resultando que el tiempo de fraguado inicial es de 136 min y el tiempo de fraguado final es de 195 min.

Tabla 3 Tiempos de fraguado cemento Sogamoso.

| TIEMPO | | PENETRACIÓN |
|--------|---------|-------------|
| Horas | Minutos | (mm) |
| 1:00 | 60 | 40 |
| 1:15 | 75 | 40 |
| 1:30 | 90 | 40 |
| 1:45 | 105 | 40 |
| 2:00 | 120 | 35 |
| 2:15 | 135 | 26 |
| 2:30 | 150 | 15 |
| 2:45 | 165 | 4 |
| 3:00 | 180 | 1 |
| 3:15 | 195 | 0 |

Fuente: Cementos Argos (2014)

- Humo de sílice

Se decidió usar la microsíllica comercializada por TOXEMENT bajo el nombre de EUCON MSA en presentación de bolsa por 25 Kg. Dentro de la descripción que se encuentra en la ficha técnica del producto se tiene que EUCON MSA es un aditivo en polvo, color gris que adicionado al concreto le otorga características de alta resistencia mecánica y química. Éste reacciona con el hidróxido de calcio en la pasta de cemento, lo cual genera mayor cantidad de gel de silicato de calcio, mejorando las resistencias y durabilidad. Las partículas muy finas de microsíllica llenan los pequeños espacios entre las partículas de cemento creando un concreto más denso y menos permeable.

La densidad del humo de sílice se encuentra alrededor de los 2.01 gr/cm³. La granulometría del humo de sílice se puede observar en la figura 3.

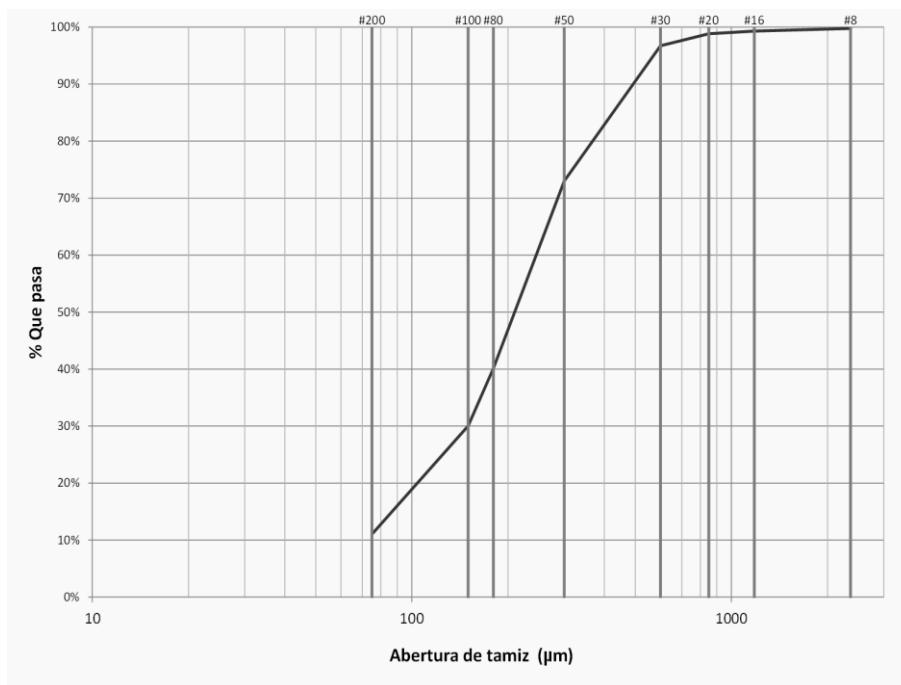


Fig. 3 Granulometría hume de sílice

Fuente Toxement (2014)

Como es conocido, el humo de sílice se puede encontrar en el mercado en diferentes formas, en su forma original, la densidad aparente es baja y esto hace que el envío sea costoso y poco viable. Para responder a estos requerimientos, los proveedores han comercializado humo de sílice para su incorporación en el concreto, ya sea en forma de suspensión (disuelto en agua o conocido como “Slurry”) o como humo de sílice densificado (como es el caso del humo de sílice comercializado por TOXEMENT). La forma densificada parece ser la más común.

- Fibras metálicas

En el proyecto se usó un solo tipo de fibra en busca de encontrar un buen desempeño en resistencias altas como también con ductilidad elevada. El producto utilizado corresponde a fibras DRAMIX OL 13/0.2 de sección cilíndrica, con un diámetro de 0,2 mm y una longitud de 13 mm, comercializados por BEKAERT.

- Aditivo

Como aditivo reductor de alto rango se decidió el empleo del aditivo Glenium C355+ comercializado por BASF. El aditivo Glenium se caracteriza por ser hiperplastificante reductor de agua de alto rango basado en éteres policarboxílicos modificados.

- Agua

El agua empleada en el mezclado del concreto debe cumplir con las disposiciones de la norma NTC 3459 (BS3148) o de la norma ASTM C1602M cuando sean menos exigentes que los de la norma NTC 3459. La norma ASTM C1602M permite el uso de agua potable sin practicarle ensayos e incluye métodos para calificar las fuentes de agua impotable, considerando los efectos en el tiempo de fraguado y la resistencia. Se establecen frecuencias de ensayo para asegurar el monitoreo continuo de la calidad del agua (NSR 10). Para la investigación, se utilizó como fuente de agua, la proveniente del acueducto de Bogotá.

3.2.2 Diseño de mezclas

Las mezclas utilizadas, se dividieron en dos tipos, el primer tipo correspondió a una mezcla con manejabilidad moderada y/o seca, medida mediante la utilización de la mesa de flujo estático y dinámico, cuyos valores en el ensayo estático fueron cercanos a 120 mm, y en flujo dinámico ascendió a 155 mm. La segunda mezcla con manejabilidad alta o fluida, generó datos de 210 mm en condición estático y de 234 mm en condición dinámico. La caracterización de la manejabilidad en las mezclas mediante la utilización de flujos, es sugerida por (Graybeal 2006), donde propone que la reología y la manejabilidad de las mezclas utilizadas en su investigación, se basan en el uso de la norma ASTM C1437, la cual sugiere cono de mini slump sobre una mesa, siendo removido para determinar el diámetro de la mezcla en condición estático. Esta mezcla esparcida en la mesa, se somete a 20 golpes durante 20 segundos. El diámetro obtenido después de esta actividad determina el flujo dinámico.

Para la homogenización de parámetros, y teniendo en cuenta que los concretos de ultra alto desempeño poseen relaciones de agua – cemento inferiores a 0.3. Se utilizó una relación A/C de 0.26, en donde el aditivo genera gran incidencia en la manejabilidad de la mezcla basado en la limitada presencia de agua, componente requerido para generar la reacción del cemento y los posteriores enlaces que determinaran la resistencia última del concreto.

Así las cosas, las mezclas utilizadas presentaron las siguientes proporciones

Tabla 4 Proporción de materiales para las mezclas utilizadas

| MATERIAL | MODERADA | ALTA |
|-----------------|-----------------|-------------|
| Cemento | 0,29 | 0,32 |
| Humo de sílice | 0,09 | 0,05 |
| Arena | 0,34 | 0,32 |
| Agua | 0,23 | 0,26 |
| Aditivo | 0,03 | 0,03 |
| Fibra | 0,02 | 0,02 |
| Volumen total | 1 | 1 |
| a/c | 0,26 | 0,26 |
| F. Estático | 120 | 155 |
| F. Dinámico | 210 | 234 |

3.2.3 Resistencias esperadas

Las resistencias a obtener en la investigación, estuvieron condicionadas a la edad de ensayo de los elementos fabricados para dicho fin, es decir, a mayor edad del concreto, su resistencia a la compresión y flexión será mayor hasta que el proceso de hidratación finalice por completo, siendo esta, la resistencia más alta que pueda adquirir el elemento. Ante esto, en el país no existe una estandarización del límite mínimo de resistencia para clasificar un concreto como de ultra alto desempeño, más aun, cuando las investigaciones realizadas en el mundo, hablan de resistencias mínimas entre 120 MPa y 150 MPa. Así las cosas, para la presente investigación, las resistencias esperadas a 28 días, serán aquellas que rondan los 120 MPa.

En concretos de ultra alto desempeño, los tratamientos térmicos, son muy frecuentes, teniendo en cuenta que esto hace que la resistencia final de los elementos sea superior, dando cumplimiento a los requerimientos citados, ante lo cual esta investigación no contempló este tipo de tratamiento, generando la posibilidad de alcanzar las resistencias solicitadas en el tiempo esperado, planteando ensayos de resistencia a noventa días, lo que permitirá realizar análisis en el comportamiento de las mezclas en su condición natural de generación de enlaces fuertes y la disminución de vacíos en la matriz de concreto.

3.3 Proceso de mezclado

En el proceso de elaboración de la mezcla, cobró gran importancia el orden en que se agregaron los componentes, debido a que ejercían incidencia en la manejabilidad. En razón a lo anterior, se describe el procedimiento de mezclado establecido y visualizado en la figura 4:

- De acuerdo al volumen de concreto a mezclar, se determinó el peso de los materiales.
- Se pesaron los materiales.
- Se inició el proceso mezclando los materiales cementantes, es decir, el cemento y el humo de sílice, durante 2 minutos.
- Se agregó el 75% del agua y se mezcla por dos minutos, generando en la mezcla la aparición de esferas de gran tamaño como se muestra en la figura 4(a).



(a)

(b)



Fig. 4 *Secuencia de mezclado para concretos de ultra alto desempeño*

- Se agregó el 25% restante del agua junto con el 100% del aditivo y se mezcla hasta obtener el primer punto de fluidez sobre el minuto 8 de mezclado. Durante este proceso se observa la disminución de las esferas como se aprecia en la figura 4(b), para luego ir tomando una consistencia fluida intermedia como se puede ver en la figura 4(c) y finalmente llegar al primer punto de fluidez como se aprecia en la figura 4(d).
- Una vez obtenido el primer punto de fluidez, se agregó el 100% de la arena de sílice, dejando mezclar por un lapso promedio de 12 minutos, llegando sobre el minuto 20 de mezclado a la obtención del segundo punto de fluidez, en donde acto seguido se procedió a agregar el 100% de la fibras de acero, en donde se aprecia un retroceso de la fluidez de la mezcla como se puede ver en la figura 4(e), para finalmente dejar mezclar durante aproximadamente 5 minutos más y sobre el minuto 25 de mezclado se obtiene la consistencia de diseño, en donde se termina el proceso y se procede al iniciar el vaciado.

Este procedimiento se realizó con los dos tipos de mezcla, generando las condiciones buscadas para la fabricación de probetas, ensayos de laboratorio y el posterior análisis de información proveniente de los datos de laboratorio.

3.3.1 Equipos

En la figura 5, se relacionan los principales equipos utilizados en la elaboración y recolección de información para la investigación, siendo:

- Mezcladora de 150 litros. Marca DOMAT. Ver figura 5 (a).
- Mezcladora de 25 litros. Ver figura 5 (b).
- Báscula para toma de pesos de los materiales
- Mesa vibratoria. Ver figura 5 (c).
- Cámara de curado controlado
- Cortadora con disco diamantado
- Máquina universal. Ver figura 5 (d).
- Máquina para flexión en vigas y en plaquetas
- Máquina de permeabilidad al agua bajo presión. Ver figura 5 (e).
- Medidor de retracción en probetas de concreto. Ver figura 5 (f).
- Cámara de condiciones controladas
- Unidad de toma de deformaciones automatizado



(a) Mezcladora Domat – 150 Litros.



(b) Mezcladora 25 Litros.



(c) Mesa vibratoria.



(d) Máquina Universal.



(e) Máquina de permeabilidad.

(f) Medidor de retracción

Fig. 5 Equipos utilizados en la toma de datos

3.3.2 Formaletas utilizadas

En la figura 6, se plasman las formaletas utilizadas en el desarrollo de fabricación de las muestras, de acuerdo al tipo de ensayo, siendo las siguientes:

3.3.2.1 Formaletas para propiedades mecánicas

- Formaleta metálica para cilindros de 76.2 mm x 152.4 mm . Ver figura 6 (a).
- Formaleta metálica para cubos de 50 mm x 50 mm x 50 mm. Ver figura 6 (a).
- Formaleta metálica para vigas de 50 mm x 50 mm x 300 mm Ver figura 6 (b).
- Formaleta en acrílico para plaquetas de 15 mm x 30 mm x 300 mm.

3.3.2.2 Formaletas para propiedades de permeabilidad

- Formaleta metálica para cilindros de 101.6 mm x 203.2 mm.

3.3.2.3 Formaleta para propiedades de deformaciones diferidas a largo plazo

- Formaleta metálica para fabricación de prismas de concreto de 25 mm x 25 mm x 285 mm. Ver figura 6 (c).
- Formaleta en madera para fabricación de plaquetas en concreto de 20 mm * 100 mm * 600 mm.



(a) Cilindros para prueba de compresión.



(b) Encofrado de viguetas.



(c) Encofrado de retracción.

Fig. 6 Formaleta utilizada para la fabricación de probetas

3.4 Plan y descripción de ensayos

Los ensayos, fueron elaborados bajo los lineamientos técnicos de normas nacionales, que para este caso, son las normas técnicas colombianas NTC. Así mismo, se utilizó como referencia y guía las normas ASTM y las normas UNE europeas, proporcionando parámetros y lineamientos en la ejecución de cada uno de los ensayos que se describen a continuación.

3.4.1 Propiedades mecánicas

3.4.1.1 Resistencia a la compresión:

Fue muy importante conocer el desempeño de este material, frente a esfuerzos de compresión, dado que una de las principales propiedades del concreto, es su excelente capacidad de soportar este tipo de esfuerzos. Adicionalmente se estableció la importancia de evaluar el comportamiento a largo plazo de la resistencia a compresión, en donde se lograría identificar el aporte de la reacción puzolánica de las adiciones presentes en las mezclas fabricadas. Para encontrar la resistencia a la compresión, se fabricaron 12 probetas por cada tipo de mezclas, las cuales son cilíndricas de diámetro 76.2 mm y altura de 152.4 mm y se mantuvieron bajo curado estándar en la cámara de curado de la Pontificia Universidad Javeriana (PUJ), que posteriormente se fallaron en la maquina universal del laboratorio de la PUJ, mediante el ensayo ASTM C39 a edades de 1, 7, 28 y 90 días después de su fabricación.

3.4.1.2 Resistencia a la flexión:

Se hizo necesario el conocimiento del desempeño de este material, ante esfuerzos de flexión, dado que en concretos normales, se presenta una muy baja resistencia ante este tipo de esfuerzos y teniendo en cuenta que uno de sus constituyentes es la fibra metálica, se espera que las prestaciones frente a este tipo de esfuerzos sean mejores que en los concretos normales.

Para encontrar la resistencia a la flexión, se realizaron dos tipos de ensayos, flexión en viguetas y flexión en plaquetas. Las viguetas, son probetas de 50 x 50 x 300 mm. Se fundieron 12 especímenes por cada tipo de mezcla, que se mantuvieron bajo condiciones de curado estándar en la cámara de curado de la PUJ, posteriormente se fallaron en la maquina Instron, como se aprecia en la figura 7 mediante el ensayo ASTM C78, a edades de 1, 7, 28 y 90 días después de su fundida. Para las plaquetas, se estableció fundir probetas de 15 x 30 x 300 mm, en una cantidad de 12 unidades por tipo de mezcla, que se mantuvieron bajo condiciones de curado estándar en la cámara de curado de la PUJ, para posteriormente ser fallados en la maquina Instron a edades de 1, 7, 28 y 90 días después de su fundida.



Fig. 7 Prueba de flexión en maquina Instron.

3.4.2 Propiedades de permeabilidad

Con el propósito de determinar el paso de un líquido a través de una estructura de concreto de ultra alto desempeño, se realizó el ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua bajo presión, el cual permite relacionar la profundidad de penetración con la permeabilidad del espécimen analizado.

El dispositivo de ensayo, está compuesto por celdas compuestas por dos platos, el plato superior tiene la función de asegurar la probeta al equipo, el plato inferior posee un orificio por donde se inyecta el agua a presión sobre la cara de la probeta que se va a ensayar, teniendo en cuenta la utilización de un empaque, el cual va a impedir la salida del agua entre la base de la muestra y la base del equipo.

El procedimiento de ensayo, consistió en colocar entre los dos platos un cilindro de concreto de 101.6 milímetros de diámetro por 203.2 mm de altura. Previamente se cortó entre 2 y 3 centímetros a la altura inicial para ser aplicada una capa de impermeabilizante en los laterales, de tal manera que mantenga la presión interna del ensayo, y evite que el agua aparezca por los lados y esto genere lecturas erradas en el ensayo.

La cara del espécimen ensayado, debe ser expuesta a una presión de agua de 0.5 MPa durante 4 días, tiempo durante el cual, se realizaron inspecciones visuales que permitiesen validar o refutar el procedimiento realizado. Una vez finalizó el procedimiento, las muestras se desmontaron del equipo e inmediatamente se realizó el ensayo de tracción indirecta (NTC 722 ó ASTM C496). Con esto, se tomó la lectura de penetración del agua dentro del espécimen, permitiendo realizar la correlación de esta lectura con los parámetros de permeabilidad mostrados en la tabla 5.

Lo anterior, se realizó para la totalidad de las muestras elaboradas, las cuales corresponden a los dos tipos de mezcla analizados para las edades de 1, 7, 28 y 90 días, permitiendo el análisis de resultados en diferentes edades de madurez del concreto. En resumen, el ensayo de permeabilidad en concreto se realizó a 24 muestras, las cuales corresponden a las mezclas moderadas y altas planteadas en la investigación.

Tabla 5 Relación de la permeabilidad del concreto con el coeficiente de permeabilidad y la profundidad de penetración NTC - 122

| DETERMINACIÓN | UNIDADES | PERMEABILIDAD | | |
|--------------------------------------|----------|---------------|--------------------------|-------------|
| | | BAJA | MEDIA | ALTA |
| Coeficiente de permeabilidad al agua | m/s | $<10^{-12}$ | $<10^{-12}$ a 10^{-10} | $>10^{-10}$ |
| Profundidad de penetración | mm | < 30 | 30 a 60 | > 60 |

Fuente: Modificada de NTC (2006)

Una vez se terminó el ensayo, se procedió a llevar los especímenes a la maquina universal, para realizar el ensayo de tracción indirecta o método brasileiro, como se aprecia en la figura 8, con el objetivo de abrir el cilindro y poder medir la profundidad de penetración del fluido en la muestra fallada, como se puede ver en la figura 9.



Fig. 8 *Prueba de tracción indirecta.*



Fig. 9 *Especímenes de permeabilidad.*

3.4.3 Estabilidad volumétrica

Las mezclas utilizadas, se analizaron por estabilidad volumétrica para determinar la retracción o expansión de las muestras mediante el siguiente proceso.

Se elaboraron probetas de 285 milímetros de largo por una sección cuadrada de 25 milímetros, a las cuales en el momento de la fundida se le agregaron topes metálicos que permiten la lectura en el equipo de medición de retracción. Una vez se fundieron, se llevaron a la cámara de curado para cumplir con 7 días de curado para las primeras probetas vaciadas, y 28 días de curado para un segundo juego de probetas, vaciados en un día diferente a las primeras.

Para este ensayo se escogieron tres tipos de ambiente para las probetas con edades de siete y veintiocho días respectivamente. El primer ambiente, fue el que se proporcionó en la cámara de curado, donde las muestras se extrajeron de este lugar, única y exclusivamente para tomar la lectura, el resto del tiempo, se encontraron en este ambiente. El segundo ambiente, correspondió al laboratorio de resistencia de materiales, donde la temperatura y humedad tienen un control detallado, en el cual se encontraban las probetas por el tiempo del ensayo.

Por último, el tercer ambiente, corresponde a condiciones de intemperie, en el cual las muestras están expuestas a condiciones de humedad y temperatura de la ciudad de Bogotá.

Los tamaños de las muestras, la toma de datos y el tiempo de medición, estuvieron dados bajo la norma ASTM C 490, y para la toma de lecturas se utilizó el aparato de medición de longitud de probetas de concreto del departamento de ingeniería civil de la PUJ, a cada una de las 6 probetas analizadas para cada tipo de mezcla y edad de ensayo definido, es decir bajo esta metodología de ensayo, se analizaron 24 probetas.

3.4.4 Deformaciones diferidas a largo plazo

Como uno de los objetivos de la investigación, se determinó analizar el comportamiento del material frente a cargas sostenidas en el tiempo, aplicando esfuerzos de flexión y controlando aspectos ambientales como la humedad y la temperatura. Para este fin, se desarrolló un método experimental que inició con el diseño de la estructura de soporte, aplicación de carga, medición de las deformaciones, dimensiones y edades de las probetas a ensayar.

3.4.4.1 Estructura de soporte

Se utilizó una estructura metálica, conformada por bastidores verticales en tubo cuadrado metálico, unidos transversalmente por ángulos metálicos de 11/2", sobre estos elementos se elaboró un montaje de soporte para las probetas, que consiste en la adaptación de tubos metálicos, que no tienen restricción al giro y que constituyen puntos simplemente apoyados para las probetas a ensayar, como puede apreciarse en la figura 10.



Fig. 10 Estructura de soporte.

3.4.4.2 Medición de deformaciones

Se utilizaron LVDTs marca Omega, adosados a un puente metálico, ubicado exactamente sobre el centro de la luz de las probetas, de manera que se logre el objetivo de medir las deformaciones en este punto. Los LVDTs, se conectaron a una matriz de conectores de 16 canales, que a su vez fue conectado a una tarjeta de adquisición de datos, la cual transfirió la información a un ordenador, el cual recibe datos de medición de voltios y temperatura, almacenándolos y graficándolos como se aprecia en la figura 11. Estas lecturas fueron tomadas en un orden de 10 tomas por segundo en el proceso de cargue de las placas y de 1 toma por segundo en el análisis de deflexiones durante los 72 días de ensayo.

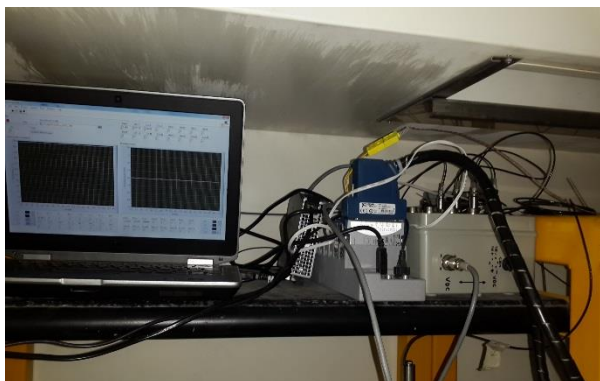


Fig. 11 *Equipo de adquisición de datos*

3.4.4.3 Probetas

Para el desarrollo de la investigación, se determinó, la utilización de elementos de 600 x 100 x 20 mm. Se utilizaron 6 probetas para analizar deflexiones a 7 días de curado y otras 6 probetas para analizar deflexiones a 28 días de curado. Las probetas se pueden apreciar en la figura 12.



Fig. 12 *Probetas para ensayo de deformaciones diferidas en flexión.*

3.4.4.4 Carga sostenida

Se diseñó un sistema, que permitiera colgar la carga en el centro de la luz de la plaqueta, conformado por tubos metálicos y pesas, que configurarán la carga de diseño para el ensayo de 500N, como se puede ver en la figura No. 13.



Fig. 13 *Sistema de carga para ensayo de deformaciones diferidas en flexión.*

3.4.4.5 Condiciones ambientales controladas

Con base en la literatura encontrada con respecto a la fluencia del concreto, se estableció que éste fenómeno es fuertemente susceptible a los cambios de humedad y temperatura. Por ésta razón, el montaje del ensayo se realizó dentro de una cámara, que cuenta con sistemas capaces de mantener una temperatura controlada ($23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}$) y condiciones de humedad controlada (50%), como se puede apreciar en la figura. 14.



Fig. 14 *Sistema de control de humedad y temperatura.*

CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.4 Introducción

Para evaluar el comportamiento de concretos de ultra alto desempeño elaborados con materiales locales, se desarrollaron 48 ensayos de laboratorio. De acuerdo con lo planteado en el plan experimental del trabajo de investigación, todas las muestras fueron fabricadas en diferentes moldes de acuerdo a la necesidad. Las anteriores muestras, se curaron en un ambiente controlado, con 23 grados centígrados y 100 % de humedad relativa hasta la finalización del periodo de cada una para ser falladas de acuerdo a las edades plasmadas desde el 4 de agosto de 2014 hasta el 24 de abril del año 2015.

Por lo anterior, los resultados experimentales se dividen en cuatro secciones generales. En la primera sección se analiza el comportamiento mecánico de las mezclas expuestas a cargas en diferentes secciones y condiciones de ensayo, en donde se logró obtener resultados a cargas de compresión y flexión, con datos relevantes para análisis del concreto. Para cumplir las premisas expuestas, se realizaron 40 ensayos que proporcionan resultados mecánicos, de los cuales 16 ensayos a edades de 1, 7, 28 y 90 días fueron usados para ensayos de compresión, 8 ensayos se usaron para pruebas de flexión en vigas, 8 ensayos se usaron para flexión en plaquetas y los últimos 8 ensayos se usaron para obtener módulos de elasticidad del concreto de ultra alta resistencia analizado.

La segunda sección, muestra los ensayos ejecutados para obtener caracterizaciones de permeabilidad dadas en cada uno de los dos tipos de mezclas propuestas, para este caso, se ejecutó un total de 8 ensayos con resultados a 1, 7, 28 y 90 días después de su mezcla y fabricación. Cabe mencionar que las muestras de concretos se evaluaron mediante la norma técnica colombiana NTC 4483, que estipula como parámetros generales la exposición de las probetas a 96 horas de presión constante de agua y esta presión se encuentra dentro del rango de 5 y 6 bares.

La tercera sección, orientada a la evaluación de la estabilidad volumétrica, comprende los ensayos realizados a probetas de concreto, que para el caso específico, se denominan prismas. Estos elementos se analizaron en diferentes ambientes, de tal forma que se establecieron 6 ensayos para los dos tipos de concreto evaluados. Los ambientes dados para cada mezcla son: ambiente en cámara de curado. En este, los prismas se someten a condiciones controladas, teniendo en cuenta que la temperatura y humedad son constantes. El segundo ambiente de secado, se da en condiciones de muy poca variabilidad, dado que los prismas se ubican en el laboratorio de materiales de la universidad Javeriana. Por último, el tercer ambiente se da a la intemperie, donde las condiciones no tienen un comportamiento específico y dependen del clima bogotano.

La cuarta sección, abarca el análisis del comportamiento de la deflexión a largo plazo bajo carga constante producida por fluencia, donde se ejecutaron 6 ensayos con curado estándar, los cuales se evaluaron a 7 y 28 días de edad, tiempo durante el cual las muestras soportaron cargas constantes durante 72 días, para cada uno de los ensayos realizados.

4.5 Caracterización mecánica

La caracterización mecánica de concretos de ultra alto desempeño, permite evaluar y discutir las propiedades básicas del material, así como el comportamiento de este ante las mezclas propuestas con anterioridad. De igual manera, es fundamental establecer las condiciones de las mezclas analizadas en ensayos de compresión y flexión, lo cual permite discernir las cualidades y/o debilidades del material.

4.5.1 Compresión en cilindros

Las pruebas de compresión fabricadas en probetas de 76.2 mm por 152.4 mm, se analizaron a la edad de 1, 7, 28 y 90 días. El anterior procedimiento se realizó para los dos tipos de mezclas propuestas en la presente investigación; la mezcla moderada, o de baja manejabilidad, y la mezcla alta, o de alta manejabilidad. Cabe mencionar que las muestras a evaluar en los diferentes lapsos de tiempo, se elaboraron con la misma mezcla y fundida de concreto, basado en la estandarización en la toma de resultados, necesarios para la correlación en el comportamiento y análisis de tendencias existentes.

En la figura 15, se presentan los resultados de compresión obtenidos a diferentes edades y para los dos tipos de mezclas analizadas. La resistencia lograda en cada uno de los días de ensayo y para cada tipo de mezcla se dio en forma ascendente, siendo las resistencias más bajas las presentadas a 1 día y las más altas, las dadas a los 90 días. Se puede evidenciar, que las resistencias oscilan entre los 59 y 119 MPa.

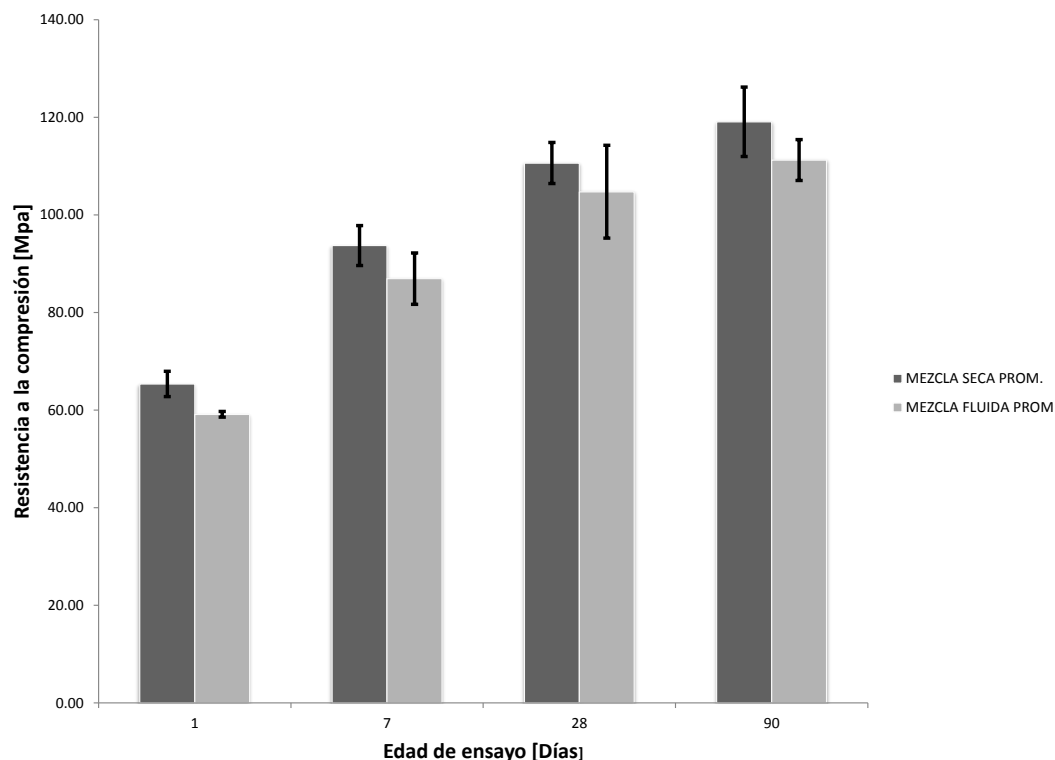


Fig. 15 Resultados a compresión en cilindros de concreto de ultra alto desempeño.

En todo el periodo de ensayos a compresión, se refleja que la mezcla seca, presenta mayores resistencias que la mezcla fluida, siendo este factor, el predominante en todos los ensayos realizados, los cuales deben ser comparados con investigaciones realizadas en temas similares alrededor del mundo. Es importante indagar las investigaciones realizadas por otros autores, permitiendo el análisis objetivo de los resultados obtenidos, para generar conclusiones y hallazgos claves en la generación del conocimiento en el tema citado.

Se considera un mejor desempeño en el concreto de ultra alto desempeño, cuando los parámetros mecánicos son mejorados, siendo sensitivos a la mejora de los componentes, la dispersión de los materiales, el procedimiento de mezclado y su correspondiente curado (Máca, Sovják, y Vavříník 2013). En esta investigación, los autores demuestran que las características mecánicas que los materiales aportan, son representativas en el ensayo a compresión, logrando resistencias a los 28 días de 150 MPa, valor que lo identifica como concreto de ultra alto desempeño. También (Abbas, Soliman, y Nehdí 2015), identifican que alcanzar altas resistencias en este tipo de concretos, depende de la incorporación de fibras metálicas, que fueron evaluadas mediante la modificación de su cantidad y tamaño en mezclas de UHPC para determinar el grado de influencia en el comportamiento mecánico y durable. En el ensayo a compresión el aumento de cantidad de fibras mejora sus propiedades, pero el tamaño de las mismas no influye significativamente en los resultados.

Es bueno mencionar, que los resultados obtenidos en la literatura tienen parámetros específicos que en la presente investigación se realizaron por métodos similares, más no idénticos. En el desarrollo del proyecto, los resultados a compresión en cilindros mostraron resistencias a compresión a los 28 días de 110 MPa para la mezcla moderada, y de 104 MPa para la mezcla alta, como también se obtuvo resultados de compresión a 90 días de 119 MPa para la mezcla moderada, y en 111 MPa para la mezcla alta, no obstante, (Yu, Spiesz, y Brouwers 2014), propone la utilización de cubos para ser sometidos a cargas de compresión, encontrando resistencias a compresión de 150 MPa, a una edad de 28 días y con 2.5 % del peso de la mezcla en contenido de fibras metálicas. Así las cosas, los ensayos realizados en cubos dentro del proyecto, arrojaron resistencias a los 28 días de 134 MPa para la mezcla moderada, y de 142 MPa para la mezcla alta mostrados en la figura 17.

A lo anterior (Graybeal 2006), en su investigación del comportamiento de concretos de ultra alto desempeño, encontró resultados de compresión de 119 MPa a 28 días de edad, y de 138 MPa a noventa días. Los anteriores resultados fueron obtenidos en cilindros de concreto, lo cual es representativo en la discusión sobre los resultados obtenidos, así mismo, es de anotar que todos los investigadores consultados, utilizan materiales finos y la adición de fibras metálicas, aunque algunos utilizan modelos de empaquetamientos que permiten mejorar los diseños de mezclas, reduciendo considerablemente la cantidad de cemento en las mezclas. Ante esto, (Yu, Spiesz, y Brouwers 2014), utilizó el modelo de empaquetamiento de Andreasen and Andersen, el cual permitió generar mezclas densas y homogéneas con menos de 650 Kg de cemento por metro cúbico de concreto. También (Habel et al. 2006), utilizó el modelo de empaquetamiento Andersen, el cual le permitió utilizar cerca de 620 Kg de cemento por metro cúbico de concreto.

Así las cosas, en la figura 16, se presentan los resultados a compresión de las muestras, junto con los resultados obtenidos por (Graybeal 2006), autor que desarrollo modelos similares a los ejecutados en la investigación.

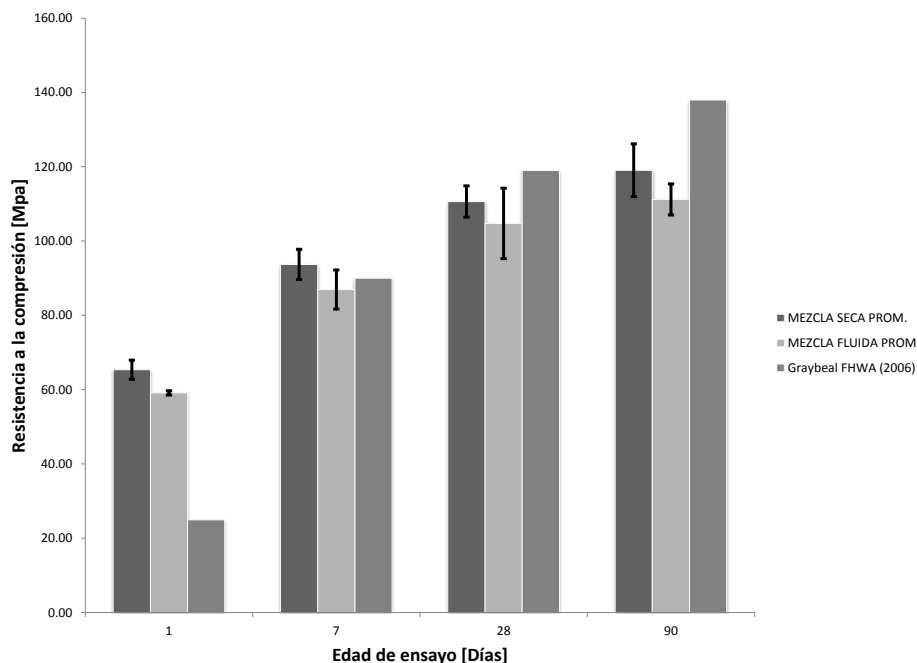


Fig. 16 *Resultados a compresión concretos de ultra alto desempeño respecto a otras investigaciones.*

En la figura 16, se evidencia un comportamiento ascendente de la resistencia a compresión de las muestras estudiadas a lo largo del tiempo, enmarcado dentro del proceso de formación de enlaces fuertes a causa de la reacción química a partir del proceso de hidratación del cemento. En consecuencia, se establecen varios resultados que permiten describir el comportamiento de los dos tipos de mezclas seleccionados para el desarrollo de la hipótesis propuesta. En primer lugar, se observa que las mayores resistencias logradas en todos las edades de ensayos, se consiguieron con la mezcla moderada, la cual siempre estuvo por encima de los resultados de la mezcla alta, es decir, en el día 1 de las edades de ensayos propuestas, la mezcla moderada alcanzo un 10.53% más de resistencia que la alta, para el día 7, la mezcla moderada, alcanzó un 7.79% más que la mezcla alta, para el día 28, la moderada obtuvo 5.62% más de resistencia que la mezcla alta, y por último para el día 90, obtuvo un 7.05% más de resistencia que la mezcla alta.

En relación con los resultados obtenidos con (Graybeal 2006), la mezcla moderada presenta los siguientes comportamientos, a edad temprana, la mezcla moderada presenta un 161% y 4% más de resistencia a la compresión que la mezcla desarrollada por Graybeal, es decir a la edad de 1 y 7 días. Sin embargo en edades posteriores, la mezcla moderada reduce su incremento respecto a los resultados reportados por Graybeal, quedando un 7 y 14% por debajo, es decir a la edad de 28 y 90 días respectivamente. Esto conlleva a que la mezcla moderada presenta mayor cantidad de cemento, aumentando la resistencia a edades

tempranas, pero que a largo tiempo, existen partículas que no se hidratan y su resistencia no se incrementa significativamente.

4.5.2 Compresión en cubos

De acuerdo a las normas internacionales ASTM, el método de compresión en concretos se puede determinar mediante el método estándar para cilindros enmarcado dentro de la norma ASTM C39. Así mismo la norma ASTM C109, establece los procesos para realizar compresión en cubos. La aplicación de cada una de las normas depende de las zonas donde se realice el ensayo. La utilización de cilindros se da en Estados Unidos y América Latina, y en Europa, el uso se da a la fabricación de cubos.

Para la revisión y análisis del comportamiento mecánico de los concretos de ultra alto desempeño locales, donde se buscan resistencias superiores a los 120 MPa, se hizo necesario utilizar los dos tipos de ensayos, lo cual permitió establecer correlaciones entre ellos, basados en que el ensayo de compresión en cubos, presenta resultados más altos atribuidos a la relación de forma 1:1, lo cual permite asumir mayores esfuerzos ante las cargas impuestas en la máquina universal (Graybeal 2006).

En la figura 17, se observa los resultados a compresión en cubos de las mezclas moderada y alta, lo cual indica una resistencia a 28 días de 135 MPa para la mezcla moderada, y de 140 MPa a 28 días para la mezcla alta. Estos resultados muestran un incremento respecto a las muestras de compresión en cilindros basado en la geometría de las muestras y la utilización de mezclas en las mismas condiciones, es decir de la misma bachada y en igual tiempo de falla en las muestras así como el día de falla y las condiciones de curado. Ante esto, es necesario establecer que los cubos de concreto presentan menor masa que los cilindros, siendo evidente la facilidad de hidratación en la cámara de curado, lo cual influyó en la formación de enlaces y reacción puzolánica en los primeros días de fabricación, aumentando la capacidad de soporte de cargas impuestas.

La utilización del método de compresión en cubos, ha permitido el desarrollo de nuevos concretos, mejorando notablemente la resistencia a la compresión, logrando resultados superiores a los 205 MPa, basados en la utilización de materiales finos y fibras metálicas, superando todas las características dadas en concretos convencionales y alto desempeño (Rossi et al. 2005).

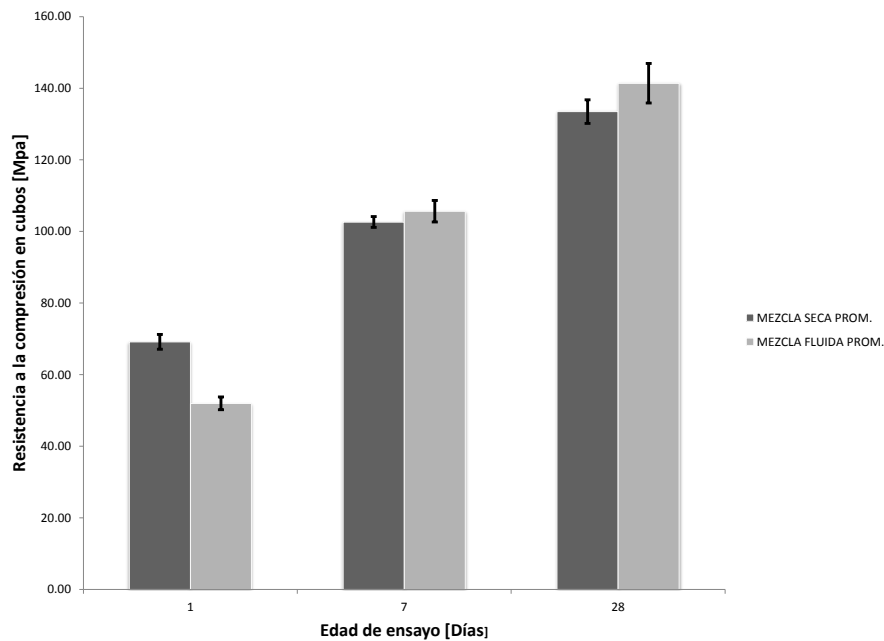


Fig. 17 Resultados a compresión en cubos de concreto de ultra alto desempeño.

En la figura 18, se muestra la evolución de las resistencias a compresión a diferentes edades de las muestras analizadas, mediante la utilización de los dos tipos de ensayo a compresión; compresión en cilindros y compresión en cubos. Ante esto, se observa que a un día de edad, las resistencias para los dos tipos de mezcla y para los dos ensayos de compresión realizados, no presentan diferencias acentuadas, oscilando entre 50 y 65 MPa. Para el caso de siete días de curado, las diferencias de resistencia conservan resultados similares, traduciendo dichas diferencias en errores del ensayo, presentando resistencias a la compresión que oscilan entre 90 y 110 MPa.

Es importante analizar el comportamiento que presentan las mezclas a la edad de 28 días, donde los resultados de compresión en cubos, la mezcla fluida presenta mayor resistencia, comparada con el ensayo en cilindros, donde la mezcla seca presenta mayor resistencia que la mezcla fluida. Esto se da, basado en el proceso de fabricación de las muestras en cubos, donde su limitado tamaño restringe el proceso de elaboración, ante lo cual la mezcla fluida presenta un mejor acomodamiento de las partículas, proporcionado por la mayor manejabilidad. Así las cosas, la mezcla fluida presenta menos vacíos, lo cual se traduce en el aumento de resistencia.

Para el caso de 28 días de edad de las muestras de concreto analizadas, se presenta un incremento diferenciador en el ensayo de compresión con cubos, generando resistencias de 133 MPa a compresión en la mezcla seca, respecto a 111 MPa obtenidos en el ensayo a compresión con cilindros. Este comportamiento es similar en la mezcla fluida, arrojando resultados a la compresión en cubos de 142 MPa, contra 105 MPa obtenidos en el análisis a compresión de cilindros. De acuerdo a (Habel et al. 2006), se considera que el desarrollo de las propiedades mecánicas, virtualmente de detienen a la edad de 90 días, basado en que el

agua disponible en la mezcla se ha agotado por completo, finalizando el proceso de adquisición de resistencia, ante lo cual, las mezclas analizadas, presentaran un resistencia media a la compresión de 140 MPa para la mezcla seca, y de 150 MPa para la mezcla húmeda, datos que soportan la mayor cantidad de cemento que posee la mezcla fluida. Las anteriores características hacen apta para la producción de concreto con este tipo de mezcla, que sumada a la buena manejabilidad en el proceso de vaciado, genera buenos resultados en su utilización.

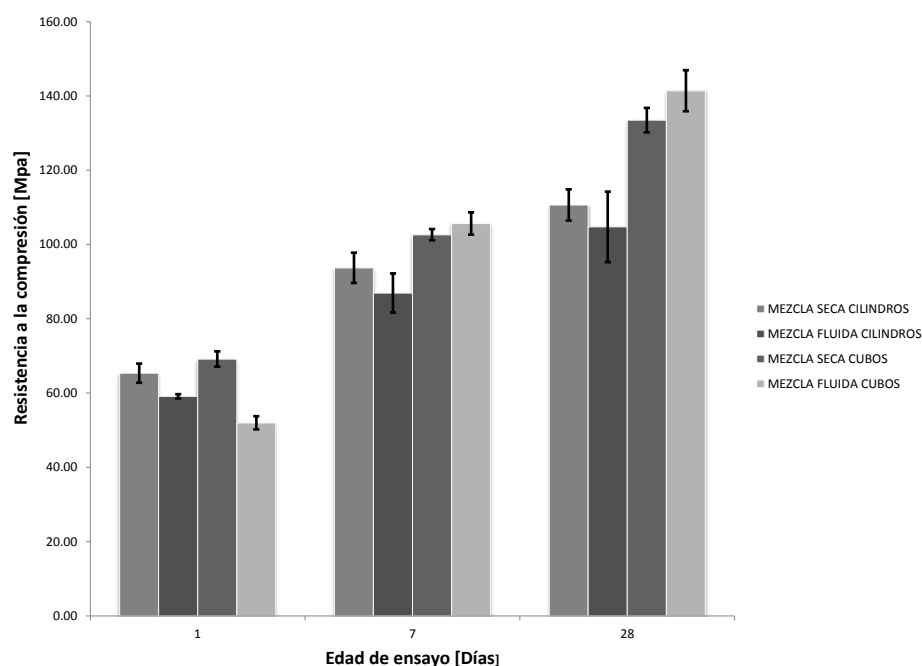


Fig. 18 Resultados a compresión en cubos y cilindros de concreto de ultra alto desempeño.

En la figura 18a, se observa la relación en porcentaje de las resistencias a compresión obtenidas entre cilindros y cubos, donde se logra un incremento de resistencia cercano al 25% a los veintiocho días de edad. Es evidente que la mayor resistencia es aportada por los cubos en las edades de 7 y 28 días, aunque a la edad de un día, la mayor resistencia fue aportada por los cilindros. Este fenómeno se explica en el volumen de concreto que posee cada muestra existiendo una relación de 4 a 1, donde el mayor volumen lo posee el cilindro. Ante esta situación, el calor de reacción del cemento es mayor en los cilindros, generando una conformación de enlaces tempranos en la matriz.

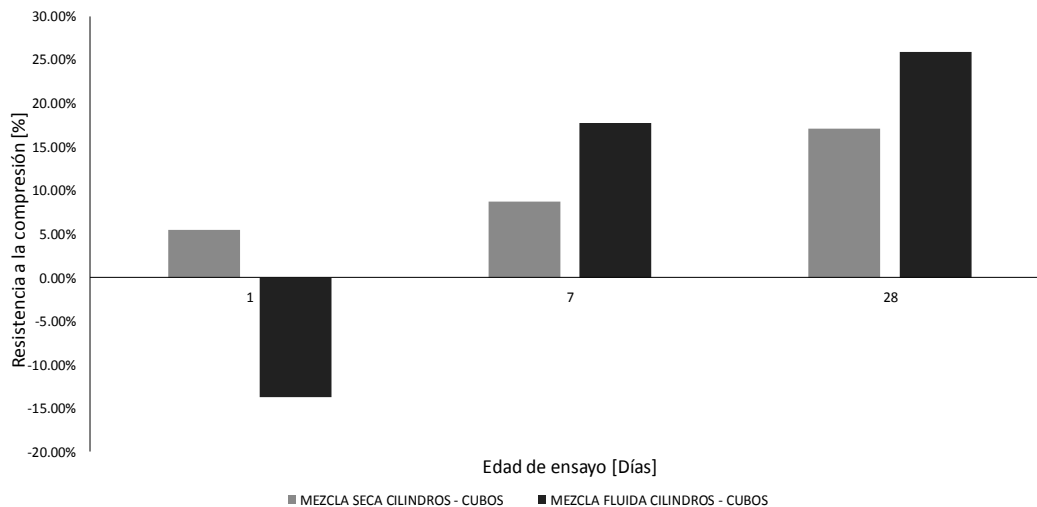


Fig. 19a Resultados a compresión en cubos y cilindros de concreto de ultra alto desempeño en %.

4.5.3 Flexión en vigas

Los resultados obtenidos en el ensayo de probetas para el análisis de vigas a flexión, son mostrados en la figura 19, donde se muestran resistencias mínimas a flexión de 15 MPa para un día y de 22 MPa para 90 días. Para la mezcla fluida la resistencia a flexión mínima es de 13 MPa a un día, y de 22 MPa a 90 días. Es de resaltar, que los mayores valores de resistencia a la flexión, los posee la mezcla seca en todas las edades de falla propuestas en el presente estudio, respecto a la mezcla fluida. El análisis de resultados para los ensayos a flexión en concretos de ultra alto desempeño, presentan mejoras sustanciales con respecto a los concretos convencionales, cuando se emplean fibras metálicas. La resistencia a la flexión, se incrementa cuando se ha tomado el análisis realizado al comportamiento de diferentes tipos de fibras, tanto es su forma como en su longitud, (Yu, Spiesz, y Brouwers 2015). En los ensayos propuestos, se llegó a una cantidad óptima del 2% de fibras en las mezclas de concreto, distribuido entre fibras lisas y con ganchos, sumado a una buena manejabilidad del concreto a causa de la restricción de rotación en las fibras con ganchos. Este fenómeno restringe el movimiento de las fibras lisas, generando un aumento en la resistencia y ductilidad del material.

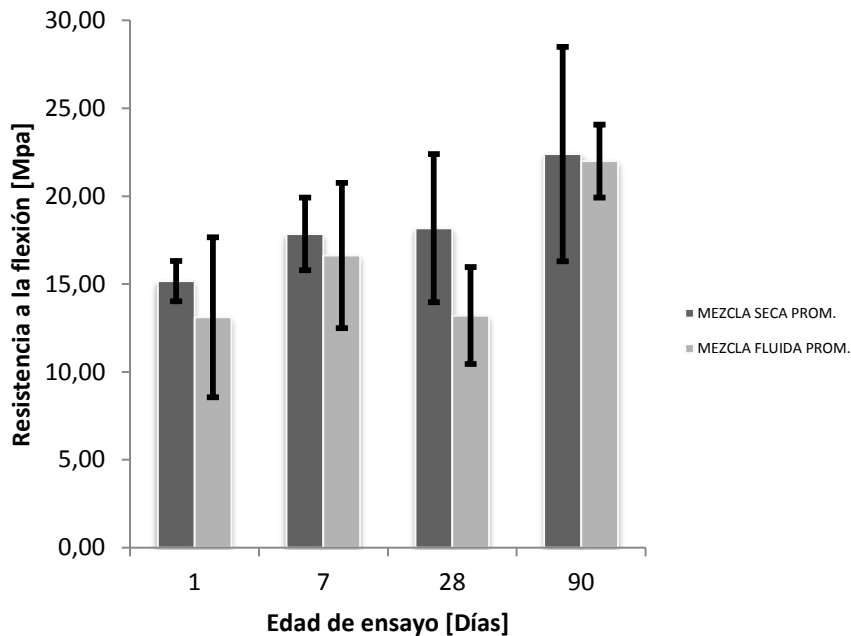


Fig. 20 Resultados a flexión en vigas para concretos de ultra alto desempeño.

Así mismo, la adición de fibras metálicas mejora notablemente la resistencia a la compresión y flexión, así como la capacidad de asumir esfuerzos después de la aparición de fisuras, mostrando la gran capacidad de recuperación y ductilidad del material, donde el contenido de fibras debe ser mayor a 1.5%, lo que permite eliminar la pérdida de la resistencia a la flexión (González et al. 2014).

A raíz de los avances en el comportamiento de los concretos de ultra alto desempeño, se ha observado que el contenido en fibras y la adherencia que se genera entre las mismas y la matriz de concreto son aspectos de gran importancia, lo cual permite garantizar que no haya pérdida de la resistencia a la flexión. Esto significa además, que las fibras metálicas asumen esfuerzos en la matriz de concreto, sin tener en cuenta la edad en la cual van a aparecer fisuras con retracción del elemento.

Las mezclas de concreto de ultra alto desempeño seleccionadas, presentan un comportamiento acorde a los resultados encontrados (Habel et al. 2006). Ahora bien, la mezcla seca, presenta un mejor comportamiento ante la imposición de cargas sobre las muestras con sección rectangular, obteniendo un 16% más de resistencia a la flexión, que las muestras ejecutadas a un día de edad con mezcla fluida. En los resultados obtenidos a siete días, existe un aumento a la flexión del 7%, respecto a la mezcla fluida. A la edad de

28 días, el incremento resistencia favorece a la mezcla seca cerca del 38%, para finalmente generar una diferencia del 2% de incremento de la resistencia a la flexión de la mezcla seca sobre la mezcla fluida a 90 días de edad.

Al respecto, se evidencia que las muestras curadas en ambientes controlados, incrementa la resistencia durante los primeros 28 días, y de esta edad en adelante, el desarrollo de las propiedades no posee aumentos considerables, evidencia que demuestra, que el proceso de curado para obtener buenas características a flexión, es aconsejable hasta el mes de fabricación, de ese día en adelante la formación de enlaces producidos por el cemento, son despreciables en menos del 2% de diferencia entre los dos tipos de mezclas.

Los resultados obtenidos en los siete, catorce y veintiocho días de ensayo presentan una variabilidad importante en los dos tipos de mezcla, siendo la más relevante la obtenida a los 28 días de edad con una diferencia del 33%. Esta variación está asociada a la formación de enlaces y la acomodación de las fibras dentro de la matriz. Es de aclarar que el proceso de curado fue el mismo, ante lo cual la hidratación de las muestras fue similar, descartando este factor en la dispersión de los resultados. Así las cosas, la correcta vibración de las muestras se hace fundamental en el alcance de resultados, teniendo en cuenta que es complejo la acomodación de las fibras en moldes con poca área superficial, lo que genera una acomodación heterogénea en cada una de las muestras analizadas (Yoo et al. 2013) ,

En la figura 20, se observa el comportamiento del material en estudio comparado con otros autores, donde se evidencia que el esfuerzo a flexión del autor es mayor en 20%, basado en el porcentaje de fibras que posee su mezcla, el cual corresponde al 3% del total del peso de la mezcla presentada. A lo anterior se suma la incorporación de fibras, lo que permite una mejora en el comportamiento dúctil y de recuperación ante los esfuerzos, con lo que se requiere 5 veces más de energía para para generar fisuras a flexión, respecto a un concreto convencional.

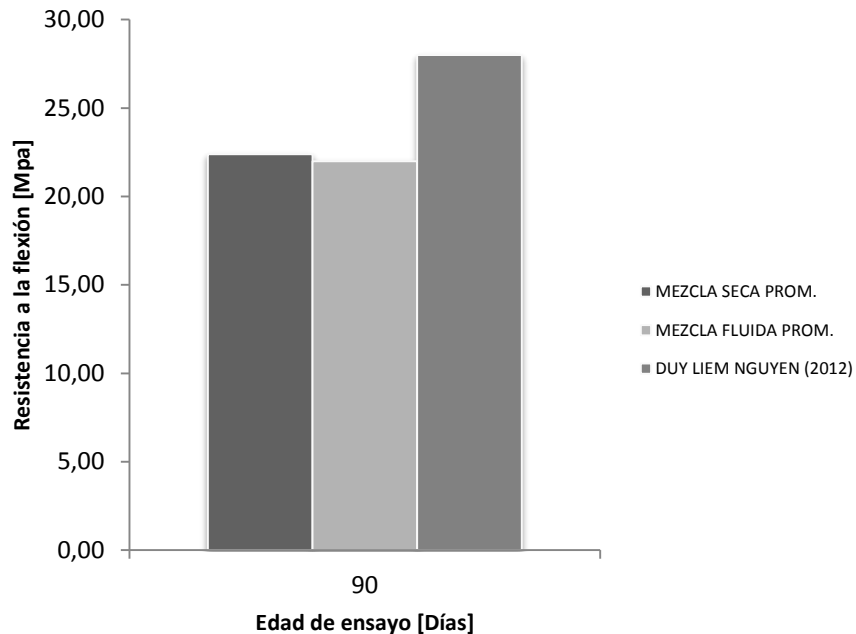


Fig. 21 Resultados a flexión en vigas para concretos de ultra alto desempeño a 90 días de fabricación.

4.5.4 Flexión en plaquetas

En la figura 21, se muestran los resultados generados en el ensayo a flexión en plaquetas. Esto define el comportamiento del material apoyado en sus extremos (simplemente apoyado), ante una carga puntual en el centro de la luz. Así mismo, este ensayo permitió evaluar el aporte de las fibras metálicas en la distribución y transferencia de esfuerzos antes y después de la aparición de las primeras fisuras. Teniendo en cuenta que los ensayos de concreto para vigas y plaquetas se implementaron bajo la metodología de flexión, el comportamiento de cada uno de ellos es diferente. Lo anterior se da teniendo en cuenta la sección de cada uno de los elementos, implementando resultados lógicos existentes en las estructuras convencionales. Las probetas con secciones cuadradas, reciben los esfuerzos en una relación 1:1, lo cual aumenta la capacidad de respuesta ante cargas impuestas. Por el contrario, en plaquetas, el esfuerzo genera mayor impacto sobre la muestra, llevándola a la falla con un menor esfuerzo, acción dada en la esbeltez de las muestras.

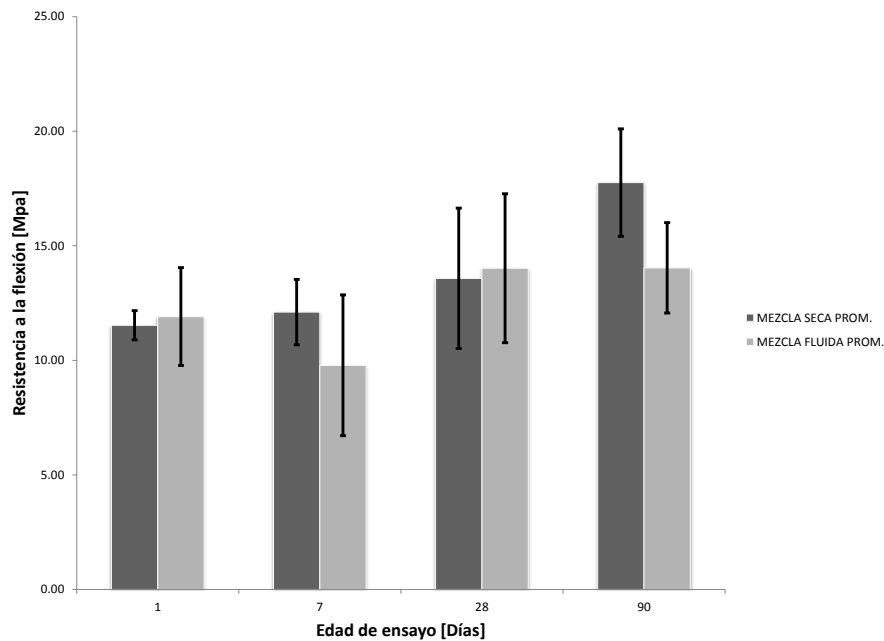


Fig. 22 Resultados a flexión en plaquetas para concretos de ultra alto desempeño.

Sin embargo, las plaquetas analizadas de concreto de ultra alto desempeño, presentan un comportamiento óptimo en la resistencia a esfuerzos de tensión, que el concreto convencional no lo hace. Esto se explica en la cantidad de fibras metálicas presentes. Bajo estas apreciaciones, el estado del arte en UHPC, menciona la presencia de asentamientos de 12 pulgadas, lograda mediante la incorporación de fibras metálicas mixtas en una proporción de 2.5% del peso, incrementando de 71 a 174% el cálculo de esfuerzo a tensión (Graybeal 2012). Cabe resaltar que la cantidad de esfuerzos que soportan las muestras dependen de su geometría.

De otra manera, al realizar los ensayos del material, se observa que el material cementante no reaccionó en su totalidad a causa de la baja relación agua cemento, que sumada a la alta presencia de material fino, impide la hidratación interna en el proceso de curado propuesto, sugiriendo el reemplazo de material cementante por material de llenado, sin generar efectos negativos en las resistencias finales obtenidas.

En la figura 22, se aprecia el comportamiento a la flexión en plaquetas de las dos mezclas seleccionadas, comparadas con resultados encontrados en el estado del arte. Se evidencia que las mezclas tienen un crecimiento a lo largo de los periodos de ensayo. Como dato relevante, se observa un incremento del 27% de resistencia a la flexión de las dos mezclas. Cuando se comparan los resultados con otros autores, se observa un valor de 12.6 MPa a 90 días, comparado con 17.76 MPa.

Wang et al (2014), hacen referencia a que en ensayos de flexión en plaquetas, se han obtenido valores de 30 MPa, con 28 días de edad y 2.5% de fibras metálicas, datos logrados utilizando el modelo de empaquetamiento Andreasen & Anderse. Adicional a lo anterior, también se controló la manejabilidad, el contenido de aire y la porosidad, parámetros que permiten estabilizar las mezclas y obtener los resultados expuestos con anterioridad.

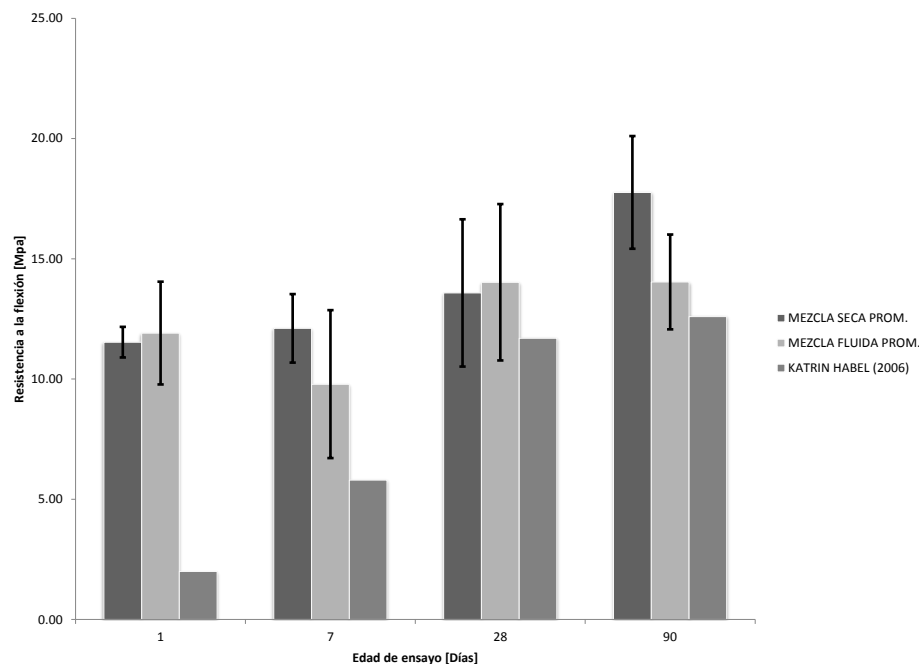


Fig. 23 Resultados a flexión en plaquetas vs literatura para concretos de ultra alto desempeño.

Es importante establecer puntos de control en los resultados de flexión en vigas y en plaquetas, con el propósito de generar una mayor comprensión del comportamiento del material en condiciones donde el concreto convencional no presenta buenos resultados. En primer lugar, la geometría de los elementos influye directamente en la resistencia a obtener, toda vez que las vigas analizadas demuestran un 27% más de resistencia a 28 días de edad comparadas con las plaquetas. No obstante, si se analiza el comportamiento de las mezclas por separado, en el ensayo de flexión en vigas a 28 días, la mezcla seca posee mayor desempeño que la fluida. En el caso de resistencia a flexión en plaquetas, la mezcla fluida posee mayor resistencia que la mezcla seca. Lo se explica de la siguiente manera.

La mezcla fluida presenta una mayor manejabilidad en la etapa de mezcla, permitiendo una mejor acomodación de las fibras metálicas dentro de la matriz, requiriendo mayor carga para llevar la muestra a la falla. En el caso de las vigas, el aporte de las fibras no es alto, siendo la geometría del elemento lo que mayor aporte tiene en la resistencia de esfuerzos, dado que la recuperación del elemento después de la aparición de la primera fibra es bajo, induciendo al elemento a una falla general.

En la figura 22a, se muestra el comportamiento de una plaqueta de mezcla moderada con 7 días de edad evidenciando la ductilidad del material. La primera fisura en el elemento aparece con un esfuerzo de 23 MPa, llegando hasta un punto máximo de 30 MPa. Las fibras metálicas permiten este comportamiento teniendo en cuenta su distribución dentro de la matriz, donde cada lámina de fibras aporta en el proceso de aplicación de carga, lo que permite generar un comportamiento dúctil en el ensayo.

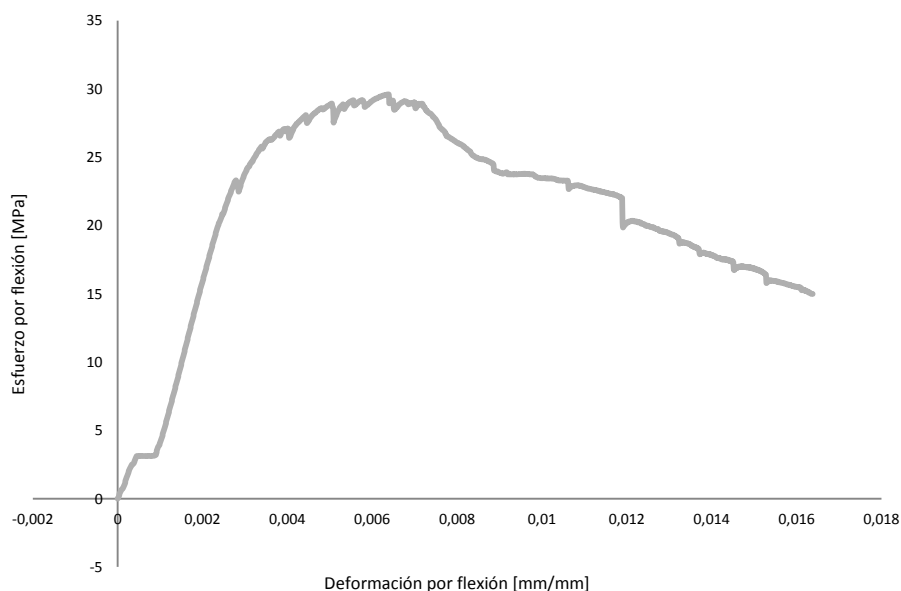


Fig. 24a Resultados a flexión en plaquetas vs literatura para concretos de ultra alto desempeño.

4.6 Propiedades a largo plazo

La investigación del comportamiento de nuevos materiales, implica expandir las fronteras del conocimiento y de la investigación, en la actualidad no basta obtener datos del comportamiento mecánico de los materiales, se requiere analizar su comportamiento a periodos de tiempo prolongados, lo cual permite correlacionar datos con las hipótesis planteadas en las normas y en aspectos de durabilidad de estructuras.

Para tal fin, la investigación se centra en realizar ensayos y obtener resultados, los cuales se analizarán y permitirán obtener conclusiones relevantes al respecto. Así las cosas, se realizaron ensayos de permeabilidad al agua bajo presión, determinando la capacidad del material en permitir el paso del líquido por su estructura, dato relevante en la identificación del ingreso o no de agentes externos que puedan deteriorar la matriz de concreto. Así mismo, se realizaron ensayos para determinar la retracción del material ante diferentes condiciones del entorno, tema fundamental en el análisis de la presencia de fisuras.

Por último, se elaboraron probetas para obtener las deflexiones de elementos ante cargas constantes causadas por la fluencia, tema fundamental en la capacidad de recuperación de los

elementos sometidos a cargas y su respuesta ante estas en lapsos de tiempo prolongados, así como la reacción de este material en el momento del retiro de las cargas.

4.6.1 Permeabilidad

Para el análisis correspondiente, se ejecutaron 8 ensayos para determinar la permeabilidad de los dos tipos de muestras, mediante la fabricación de cilindros de concreto de 101.6 mm x 203.2 mm, los cuales se revistieron con material impermeabilizante, de tal manera que no se presentara fuga de líquido por los costados, generando un flujo de agua ascendente, el cual permite la toma de lecturas de penetración. Un día, siete, veintiocho y noventa días, hace referencia al tiempo de ensayo que se estableció con el objetivo de analizar la permeabilidad en diferentes etapas de maduración del concreto. En la figura 23, se observan los datos obtenidos de permeabilidad, donde todos los resultados están por debajo del milímetro de profundidad. Por su parte, la mezcla moderada presenta lecturas insignificantes igual que la mezcla alta, apoyada en los resultados de cada día de ensayo, donde la mezclas presentaban lecturas incomprensibles.

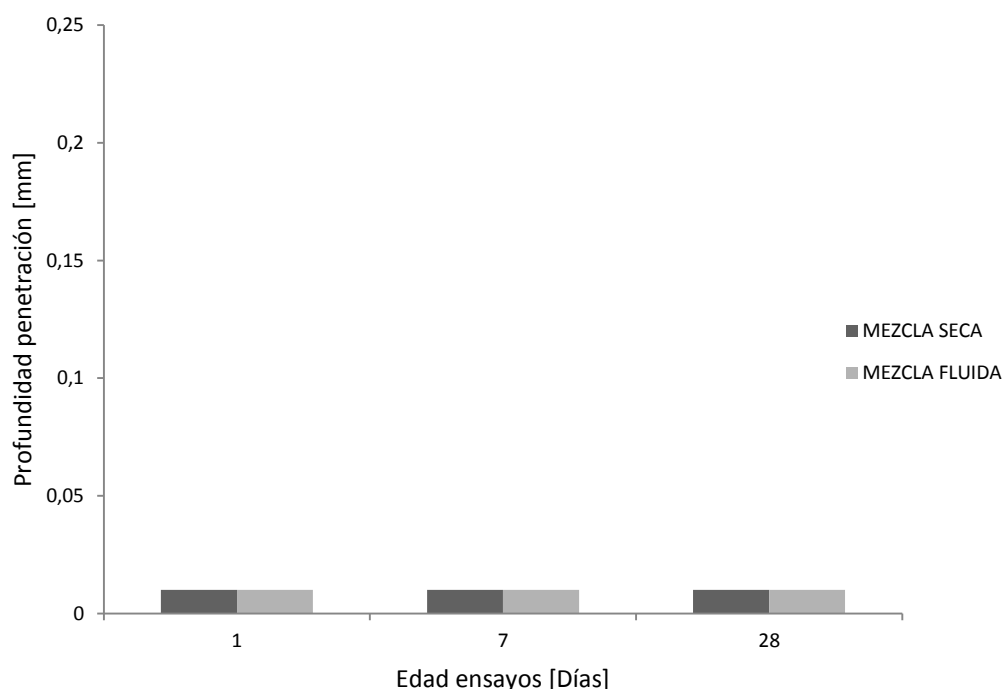


Fig. 25 Resultados de permeabilidad en concretos de ultra alto desempeño

La permeabilidad en este tipo de material, presenta resultados que no son apreciables a simple vista, teniendo en cuenta que los materiales utilizados para realizar las mezclas son finos, reduciendo considerablemente la presencia de poros, así como su tamaño y la falta de comunicación entre ellos, ocasionado por la alta capacidad de empaquetamiento de la mezcla (Tam, Tam, y Ng 2012) .

Para el caso de las mezclas analizadas, la permeabilidad del concreto es muy baja, basada en que el humo de sílice ocupa los vacíos existentes en la mezcla, generando homogeneidad y una estructura densa, así mismo, la permeabilidad al agua decrece, cuando se maneja una relación agua cemento de 0.26. Dentro de las normas existentes, se considera que un concreto tiene una permeabilidad baja, cuando la penetración del fluido está por debajo de los 30 mm (ver tabla 5). Con lo anterior, se determinó que los dos tipos de concreto evaluados, presentan permeabilidades despreciables, basado en los resultados obtenidos a las edades de 1, 7, 28 y 90 días, donde ninguna muestra supera el milímetro de penetración, después de durar 4 días sometidas a presión de agua. Esto se da basado en los procedimientos estipulados, Kameche (2014) sugiere que para obtener resultados reales de la permeabilidad del concreto, las probetas se deben someter a procesos de saturación con diferentes porcentajes, esto permite determinar la velocidad de ingreso del flujo, a menor saturación, mayor es el tiempo que demora el líquido en ingresar a la masa de concreto. Así mismo, se observó que a mayor saturación de una probeta, la permeabilidad mediante la utilización con gas es menor, teniendo en cuenta que las partículas de agua han ocupado el espacio que podía llenar el gas. Como conclusión al respecto, se recomienda utilizar el método de permeabilidad con gas a muestras en condición de no saturación y el método de permeabilidad con agua es viable en procesos de saturación de las mezclas.

Es de resaltar, que durante el proceso de fabricación y curado hasta el momento de realizar el ensayo, las muestras no presentaron fisuras visibles, en oposición a lo comentado por (Park et al. 2012), quienes realizaron investigaciones ante la aparición de grietas en concretos con tempranas edades, donde estas inciden directamente en el aumento de la permeabilidad de las muestras de concreto y aparición de problemas de durabilidad. Ante esto, se planteó un modelación numérica que permita determinar el aumento o disminución de la permeabilidad de acuerdo al tamaño de las fisuras detectadas en el proceso de retracción del concreto, analizando fisuras entre 0.1 mm a 0.4 mm.

Como era de esperarse, la incorporación de humo de sílice, como parte de reemplazo del material cementante, permite obtener mejoras en el comportamiento mecánico, debido a que los vacíos generados en las mezclas, son llenados por este tipo de materiales, aumentando la capacidad de soporte de cargas externas, así mismo (Güneyisi et al. 2012), determina que estos materiales generan una mezcla de concreto más densa reduciendo la permeabilidad y el agrietamiento por contracción, basado en la reacción cementante que poseen estos elementos, que para el análisis de resultados obtenidos, se utilizó el humo de sílice, el cual mejora la manejabilidad de la mezcla, teniendo en cuenta que sus partículas son redondeadas. Este material, posee características puzolánicas, lo cual permite una reacción tardía comparado con el cemento, que a la larga permite generar enlaces para el aumento de resistencias y la reducción de vacíos y por consiguiente, la baja permeabilidad en el material.

Si bien es cierto, para el caso específico, no se visualizaron fisuras, es de tener especial cuidado en el manejo de las mezclas, puesto que el comportamiento de la aparición de fisuras no tiene un parámetro fijo establecido, lo cual no es fácil de controlar, dependiendo de la cantidad de carga aplicada y del tipo de material utilizado (Aldea, Shah, y Karr 1999). La permeabilidad del concreto aumenta a medida que el tamaño de las fisuras se incrementa, siendo proporcional con el coeficiente de permeabilidad hallado en cualquier momento de la prueba. Adicional a lo anterior, y teniendo en cuenta el uso necesario de fibras metálicas para mejorar las propiedades del concreto, estas aumentan la posibilidad de aparición de fisuras en toda la superficie del mismo, dado a que las fibras distribuyen los esfuerzos por toda la matriz (Yoo et al. 2013). La adición del 1% de fibras disminuye la permeabilidad por encima de la adición del 0.5%. Por debajo de fisuras de 100 micras, el refuerzo con fibras metálicas, no aumenta ni disminuye la permeabilidad del concreto.

Por otra parte, se indica que al evaluar probetas de concreto con diferentes proporciones de fibras y longitudes de las mismas, a mayor cantidad de fibras, mayor es la disminución de la permeabilidad, lo cual se corrobora con el paso del tiempo de curado (Singh y Singhal 2011), lo cual conduce que la longitud de las fibras, no influye en el comportamiento de las mezclas ante las pruebas de permeabilidad o es tan baja que no es relevante.

Como punto de comparación en concretos de ultra alto desempeño, los cuales presentan permeabilidades bajas, (A. S. El-Dieb y Hooton 1995) propone el uso del ensayo triaxial, el cual permite determinar la permeabilidad de concretos de alto desempeño, teniendo en cuenta que el método convencional no permite la toma de lecturas con exactitud. Este método permite rangos de permeabilidad de 10^{-12} m/s hasta 10^{-14} m/s, apoyado en la cantidad de agua que entra y sale de cada una de las muestras evaluadas.

4.6.2 Estabilidad volumétrica – Retracción

Como parte de los objetivos trazados en esta investigación, se ha incorporado la medición de la retracción de secado en especímenes de concreto de ultra alto desempeño. Entendiendo que es fundamental ensayar y documentar el comportamiento de este material ante cambios volumétricos producidos por el efecto del secado y teniendo en cuenta que existe una importancia superlativa de conocer los principios y las causas de las fisuras en este material, dado que afectan directamente la vida útil y por tanto la durabilidad de los elementos elaborados con concretos de ultra alto desempeño.

En consecuencia, como se describió en el apartado de materiales y métodos, se desarrolló, un sistema experimental que nos permita obtener datos orientados al encuentro del conocimiento requerido. De tal forma que se estableció obtener dos tipos de mezclas, en las que se variaron diferentes factores, como la relación agua / materiales cementantes, dentro de los cuales específicamente se cambiaron las proporciones de cemento y humo de sílice y estos cambios fueron subordinados a conseguir dos tipos de manejabilidad, desarrollando una mezcla seca y una mezcla fluida, con características autocompactantes. Posteriormente, en búsqueda de robustecer la investigación, se estableció evaluar la retracción de secado en

especímenes sometidos a diferentes ambientes de secado, entre los cuales podemos citar, ambiente de cámara de curado, que tiene condiciones de 100% de humedad relativa y $23 \pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura. El siguiente ambiente de secado es el ambiente propio del laboratorio de materiales de la Pontificia Universidad Javeriana, en donde es posible conocer las condiciones ambientales, que para este caso oscilan en $50 \pm 5\%$ de humedad relativa y $23 \pm 3^\circ\text{C}$ de temperatura. Finalmente se ha escogido el ambiente de intemperie, en el cual se someten los especímenes a condiciones de intemperie del patio de mezclas de concreto de la Pontificia Universidad Javeriana, en donde sobra decir que las condiciones ambientales son muy variables dependiendo de la época del año, las horas del día y en fin condiciones atmosféricas que reflejan la realidad a la que estará expuesto un elemento de infraestructura construido con este material.

4.3.3 Retracción en prismas con 28 días de curado estándar

La importancia que tiene la evaluación de la retracción en especímenes de UHPC, hace que se inicie la revisión en elementos curados durante 28 días en condiciones estándar, buscando generar los primeros parámetros de datos a correlacionar, en la búsqueda de elementos de juicio que permitan obtener indicios de comportamientos esperados de este material ante cambios volumétricos en ausencia de carga. Para este caso podemos observar en la figura 24, que se han realizado mediciones durante 72 días, en especímenes conformados por dos tipos de mezclas, seca y fluida, enfrentados a tres diferentes ambientes de secado, encontrando diferentes comportamientos.

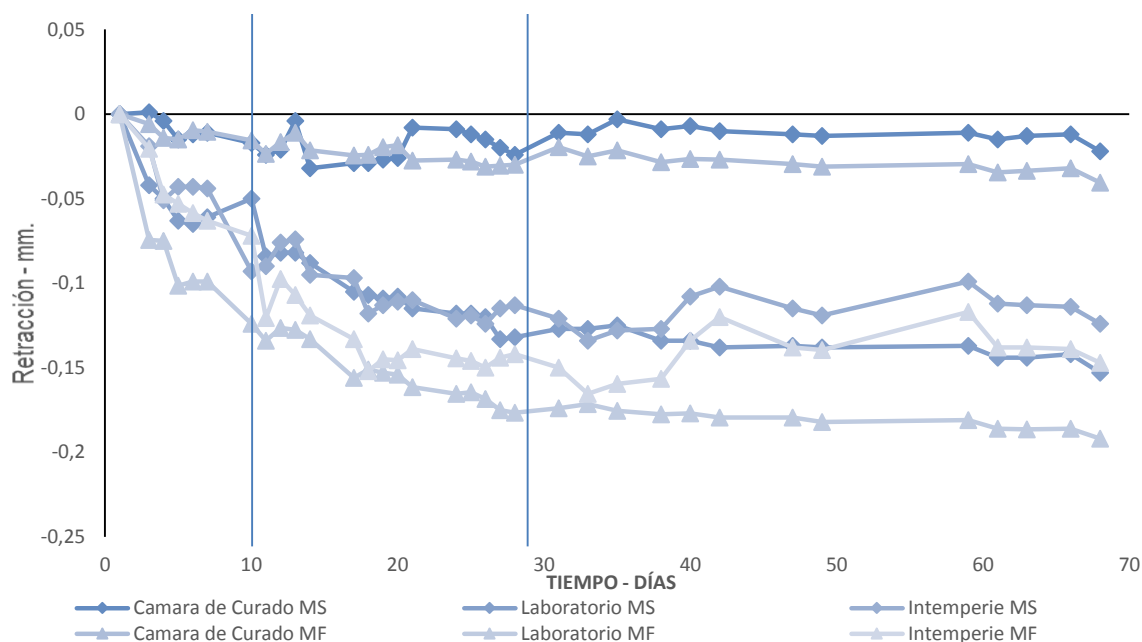


Fig. 26 Retracción en prismas, con 28 días de curado estándar, dos tipos de mezclas y tres tipos de ambientes de secado

Es necesario mencionar que las letras MS hacen referencia a la mezcla seca o de manejabilidad moderada, y las letras MF hacen referencia a la mezcla fluida o de alta manejabilidad. En la figura 24 se evidencia tres comportamientos que correlacionan los dos tipos de mezclas propuestos, en primer lugar, las mezclas moderada y alta localizadas en la cámara de curado presentan retracciones inferiores a 0.04 milímetros, comportamiento atribuido a las condiciones de control dadas en el lugar, es decir, temperatura constante de 23 grados centígrados y humedad relativa del 100 %. Para el caso de las probetas localizadas en intemperie, la retracción es más evidente, localizándose cerca de los 0.15 milímetros para los dos tipos de mezclas, este comportamiento es atribuible a la falta de control en las variables de temperatura y humedad, teniendo en cuenta las condiciones climáticas de Bogotá. El tercer escenario, hace referencia al laboratorio de resistencia de materiales, donde las condiciones de temperatura están cerca de los 21 grados, y la humedad está al 50%. Las anteriores condiciones son las más críticas en el análisis de retracción, generando valores de 0.2 milímetros para la mezcla con manejabilidad alta. La anterior explicación hace visible la importancia que tiene la humedad a la que está expuesta cada probeta, entre más bajo sea el grado de humedad, mayor es la retracción presentada, así mismo, es de destacar en los tipos de condiciones que durante los primeros 10 días se presenta el 50 % de la retracción total de cada probeta, en el día 28, se da cerca del 95% de la retracción, llevando a cumplir con el periodo de retracción de las muestras, es decir después de este tiempo los datos analizados no presentaran un cambio volumétrico importante.

4.3.4 Retracción en prismas con 7 días de curado estándar

De la misma manera en que se desarrollaron los ensayos de las muestras curadas durante 28 días, descritas en el numeral anterior, nos permitimos señalar que para los especímenes curados por 7 días, se establecieron las mismas condiciones de mezclas y de secado, aclarando nuevamente que la diferencia radica básicamente en el tiempo de curado de las muestras.

En la figura 25, podemos apreciar el comportamiento de los especímenes durante la etapa de medición, que corresponde a 72 días después de su curado, encontrando comportamientos y tendencias fácilmente identificables. Se identifica una tendencia muy marcada en todos los especímenes medidos, que se aprecia se rige por el ambiente de secado al que se encuentran expuestos, más no por el tipo de mezcla. Sin embargo, al realizar un análisis detallado se tiene: las mezclas moderada y alta localizadas en la cámara de curado presentan expansiones cercanas a los 0.03 mm, siendo un dato bajo atribuible al error del ensayo, adicional a lo anterior, este fenómeno es atribuido a las condiciones de control dadas en el lugar, es decir, temperatura constante de 23 grados centígrados y humedad relativa del 100 %. Para el caso de las probetas localizadas en intemperie, la retracción es más evidente, localizándose cerca de los 0.11 milímetros para los dos tipos de mezclas, este comportamiento es atribuible a la falta de control en las variables de temperatura y humedad, teniendo en cuenta las condiciones climáticas de Bogotá. El tercer escenario, hace referencia al laboratorio de resistencia de materiales, donde las condiciones de temperatura están cerca de los 21 grados, y la humedad está al 50%. Las anteriores condiciones son las más críticas en el análisis de retracción, generando valores de 0.17 milímetros para la mezcla con manejabilidad alta. La anterior explicación hace visible la importancia que tiene la humedad a la que está expuesta cada probeta, entre más bajo sea el grado de humedad, mayor es la retracción presentada, así

mismo, es de destacar en los tipos de condiciones que durante los primeros 10 días se presenta el 50 % de la retracción total de cada probeta, en el día 28, se da cerca del 95% de la retracción, llevando a cumplir con el periodo de retracción de las muestras, es decir después de este tiempo los datos analizados no presentaran un cambio volumétrico importante.

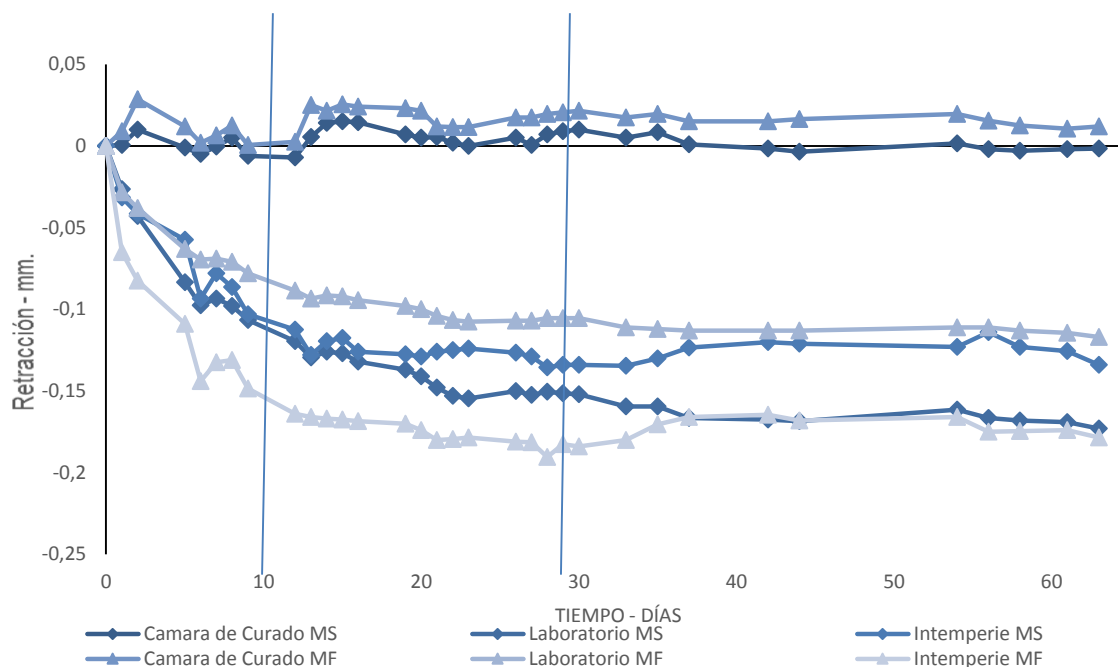


Fig. 27 Retracción en prismas, con 7 días de curado estándar, dos tipos de mezclas y tres tipos de ambientes de secado.

4.3.4 Retracción en prismas, en ambiente de cámara de curado

En línea con el comportamiento observado en los especímenes que son objeto de la investigación, se determinó que la tendencia principal de su comportamiento se rige principalmente por el ambiente de secado al que se han expuesto las muestras, razón por la que se ha decidido separar las mediciones para iniciar su evaluación y posterior correlación con otros factores y por tanto para este caso se ha separado para el ambiente de cámara de curado. De otro lado tenemos otra variable como el tipo de mezcla, que aunque tiene alguna incidencia en el comportamiento es mucho menor en comparación con la variable anterior. Finalmente, la edad de curado en el momento de iniciar el secado, es otra variable importante que se visualiza afecta el comportamiento de los especímenes.

En la figura 26, podemos encontrar las mediciones de retracción en prismas con 7 y 28 días de curado, mezclas secas y fluidas, sometidas a ambiente de “secado” cámara de curado. Se puede observar dos tendencias muy marcadas en el comportamiento del material, las que obedecen directamente a la edad de curado, en donde los especímenes con 7 días de curado, independiente de su tipo de mezcla, muestran un comportamiento asociado al hinchamiento

o expansión, producido probablemente por una retracción química, conducida por la hidratación del cemento, en donde puede ser razonable pensar que debido a su relativa juventud desde el momento de la fundida, tenga aun en su interior una proporción de agua que al no poderse evaporar, continua reaccionando en el tiempo. Cabe decir que es la mezcla fluida, la que marca en mayor medida este comportamiento. Es importante mencionar que las magnitudes en estas muestras no superan los 0,04 mm, en el caso más marcado, por tanto creemos que estos datos deben ser tenidos en cuenta con una adecuada prudencia.

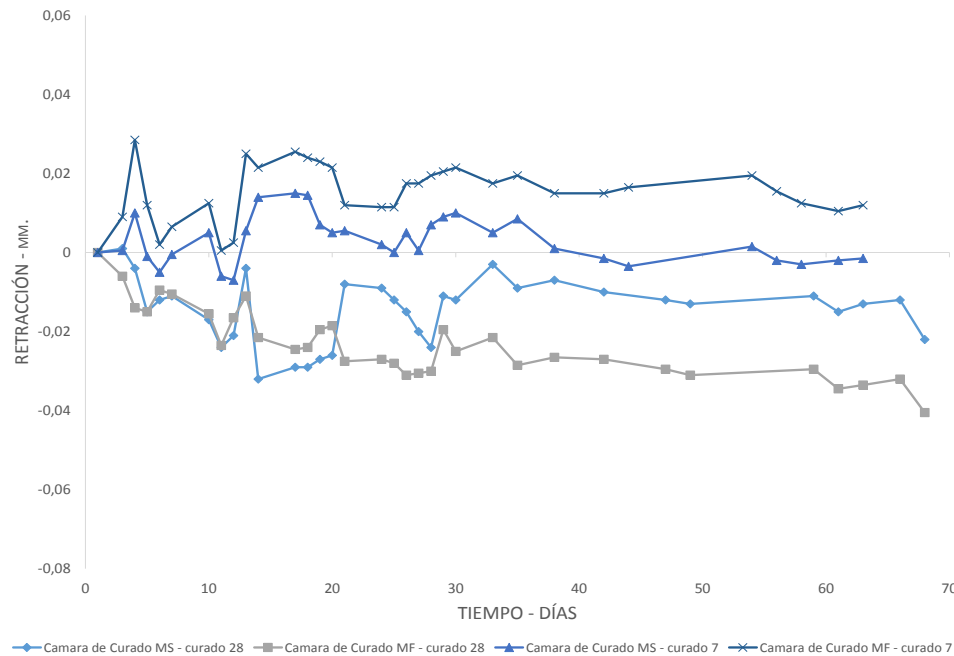


Fig. 28 Retracción en prismas, con 7 y 28 días de curado estándar, dos tipos de mezclas y en ambiente de cámara de curado al 100% de humedad.

Por otra parte, para las mezclas que han tenido 28 días de curado estándar, se observa un comportamiento en el cual, ya se evidencian algunas muestras de retracción de secado, a pesar de que su ambiente de “secado” está al 100% de humedad. Este comportamiento puede estar relacionado con la baja relación agua / cemento, en donde para edades mayores, como esta de 28 días, es posible que sea mínima o inexistente el agua remanente al interior del espécimen y en vista de su baja permeabilidad, a pesar de estar en ambiente de 100% de humedad, el agua no puede penetrar y se genera una incipiente retracción de secado. Finalmente se recalca que los datos para este ambiente deben ser manejados con extrema prudencia, dada su mínima magnitud.

4.3.5 Retracción en prismas, en ambiente de laboratorio

Otro de los ambientes de secado que deben revisarse es el ambiente del laboratorio de materiales de la Pontificia Universidad Javeriana, en donde se encuentra una tendencia muy similar en todos los especímenes, no con esto queriendo decir que su comportamiento es idéntico. Para este ambiente de secado se puede observar la figura 27, en donde se muestran los registros de los datos obtenidos durante 68 días de secado, para muestras con 7 y 28 días de curado. Aquí podemos identificar que para analizar inicialmente las mezclas con 7 días de curado, los especímenes fundidos con la mezcla fluida, son los que menor retracción han mostrado, frente a los especímenes fundidos con la mezcla seca, generando una diferencia cercana al 30%.

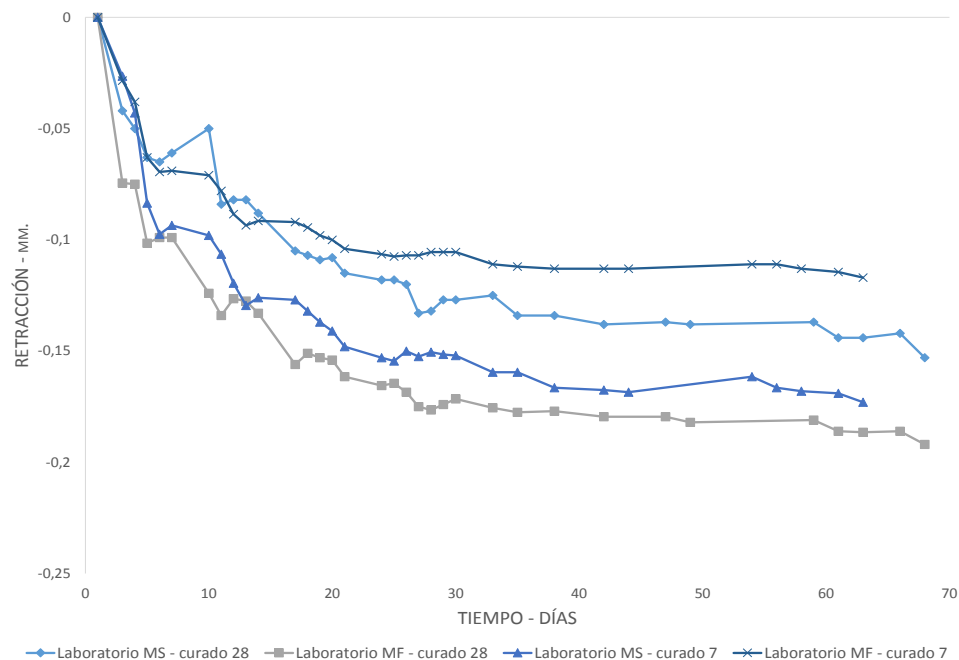


Fig. 29 Retracción en prismas, con 7 y 28 días de curado estándar, dos tipos de mezclas y en ambiente de laboratorio.

Para los elementos que han tenido 28 días de curado, encontramos que son en este caso los elementos fundidos con mezcla seca los que han tenido la menor retracción, lo que puede estar asociado a la menor relación de agua / materiales cementantes y a la menor cantidad de cemento presente en esta mezcla. Sin embargo, la diferencia final encontrada entre los especímenes con 28 días de curado y dos tipos de mezcla es de 0,039 mm, que corresponde a un aumento del 25% con respecto a la magnitud de retracción de la mezcla seca, lo que constituye una diferenciación marcada entre los dos tipos de mezcla, indicando que la variable de tipo de mezcla, tiene una importante incidencia en su comportamiento y como se mencionó anteriormente, está relacionada fuertemente con la cantidad de cemento.

Para los elementos curados durante 7 días, encontramos comportamientos contradictorios frente a la tendencia mostrada por las muestras curadas durante 28 días. Para este caso, la mezcla fluida mostro la menor retracción de todas las mezclas comparadas en la figura 25. La diferencia final encontrada entre los especímenes con 7 días de curado y dos tipos de mezcla es de 0,056 mm, que corresponde a un aumento del 48% con respecto a la magnitud de retracción de la mezcla fluida, lo que constituye una diferenciación significativamente marcada entre los dos tipos de mezcla, indicando que la variable de tipo de mezcla para este curado, también tiene una importante incidencia en su comportamiento, aunque el resultado puede interpretarse como contradictorio frente a la afectación que la cantidad de cemento tiene en la retracción. Por otra parte es importante indicar que la retracción en ambiente de laboratorio, muestra que en promedio se alcanza el 93% de la retracción total, en los primeros 28 días de secado. Este comportamiento se alinea con lo encontrado por (Graybeal, 2006), en donde encontró que el 95% de la retracción total se desarrollaba en los primeros 60 días de secado.

Por otra parte podemos observar, que en el laboratorio de materiales, se logran obtener condiciones ambientales que no presentan una gran variabilidad, como se puede verificar en la figura 28, en donde el evento más marcado, se evidencia entre los días 24 y 28, en donde se aumentó la humedad relativa alrededor del 20%, pero, que con relación al comportamiento de los especímenes, no se logra encontrar una relación de causalidad con éste, probablemente por la edad avanzada con la que contaban los especímenes de concreto en este ambiente de secado. Para los elementos que han tenido 28 días de curado, encontramos que son en este caso los elementos fundidos con mezcla seca los que han tenido la menor retracción, lo que puede estar asociado a la menor relación de agua / materiales cementantes y a la menor cantidad de cemento presente en esta mezcla. Sin embargo, la diferencia final encontrada entre los especímenes con 28 días de curado y dos tipos de mezcla es de 0,039 mm, que corresponde a un aumento del 25% con respecto a la magnitud de retracción de la mezcla seca, lo que constituye una diferencia marcada entre los dos tipos de mezcla indicando que la variable de tipo de mezcla, tiene una importante incidencia en su comportamiento y como se mencionó anteriormente, está relacionada fuertemente con la cantidad de cemento.

Para los elementos curados durante 7 días, encontramos comportamientos contradictorios frente a la tendencia mostrada por las muestras curadas durante 28 días. Para este caso, la mezcla fluida mostró la menor retracción de todas las mezclas comparadas en la figura 27. La diferencia final encontrada entre los especímenes con 7 días de curado y los dos tipos de mezcla es de 0,056 mm, que corresponde a un aumento del 48% con respecto a la magnitud de retracción de la mezcla fluida, lo que constituye una diferencia significativamente marcada entre los dos tipos de mezcla. Esto indica que la variable de tipo de mezcla para este curado, también tiene una importante incidencia en su comportamiento, aunque el resultado puede interpretarse como contradictorio frente a la afectación que la cantidad de cemento tiene en la retracción. Por otra parte es importante indicar que la retracción en ambiente de laboratorio, muestra que en promedio se alcanza el 93% de la retracción total, en los primeros 28 días de secado. Este comportamiento se alinea con lo encontrado por (Graybeal 2006), en donde encontró que el 95% de la retracción total se desarrollaba en los primeros 60 días de secado.

Por otra parte podemos observar, que en el laboratorio de materiales, se logran obtener condiciones ambientales que no presentan una gran variabilidad, como se puede verificar en la figura 28, en donde el evento más marcado, se evidencia entre los días 24 y 28, en donde se aumentó la humedad relativa alrededor del 20% pero, que con relación al comportamiento de los especímenes, no se logra encontrar una relación de causalidad con éste, probablemente por la edad avanzada con la que contaban los especímenes de concreto en este ambiente de secado.

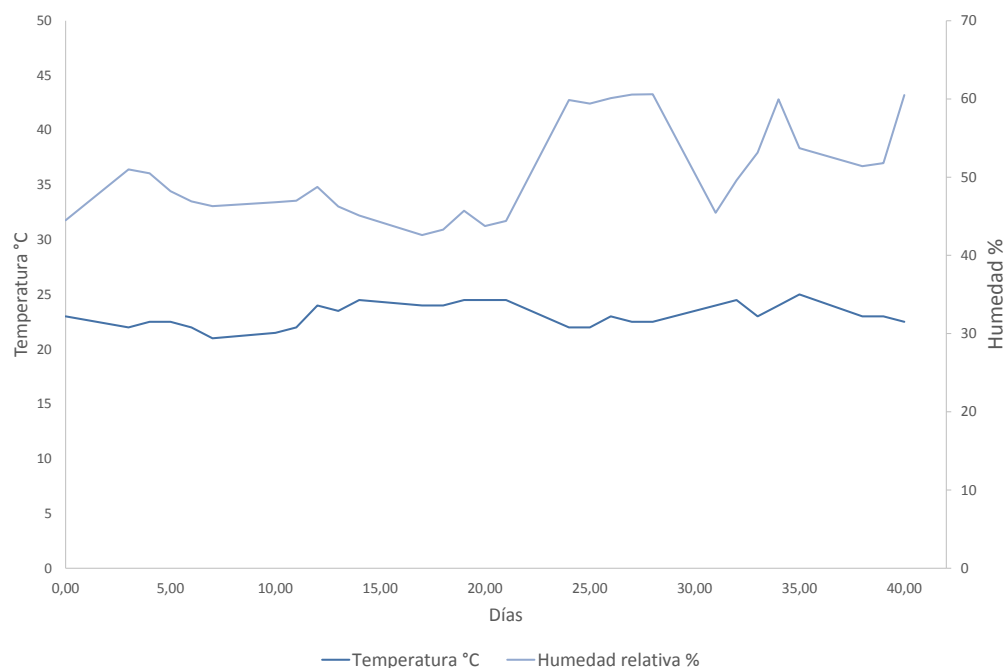


Fig. 30 Condiciones ambientales laboratorio de materiales PUJ.

4.3.6 Retracción en prismas, en intemperie

Finalmente se identifican los resultados de las mediciones de especímenes expuestos a ambiente de secado en intemperie, ubicados en el patio de mezclas de concreto de la Pontificia Universidad Javeriana.

En general se observa un comportamiento con una tendencia marcada para todas las muestras ensayadas. Sin embargo, es importante resaltar que para las muestras de 7 días de curado, su comportamiento resultó inverso al presentado en el ambiente de laboratorio como se puede observar en la figura 29. En donde las muestras con mayor retracción para este ambiente de

secado, resultaron ser los especímenes elaborados con mezcla fluida. Para el caso de las muestras curadas durante 28 días, el comportamiento fue muy similar al presentado en el ambiente de laboratorio, sin embargo, las magnitudes de retracción fueron menores en 24 y 32% para las mezclas secas y fluidas respectivamente. Lo anterior puede ser relacionado con una exposición a condiciones ambientales de humedad relativa más alta, como lo podemos observar en la figura 30, que aunque son muy variables, su promedio evidentemente es casi 19% superior a la humedad relativa del ambiente de laboratorio. De la misma manera podemos relacionar los datos obtenidos en las mezclas curadas durante 7 días, comparándolas con los datos obtenidos en las condiciones de secado del laboratorio de materiales, encontrando que para las mezclas fluidas se aumentó un 34% en la condición de intemperie y para las mezclas secas se disminuyó un 18,5%.

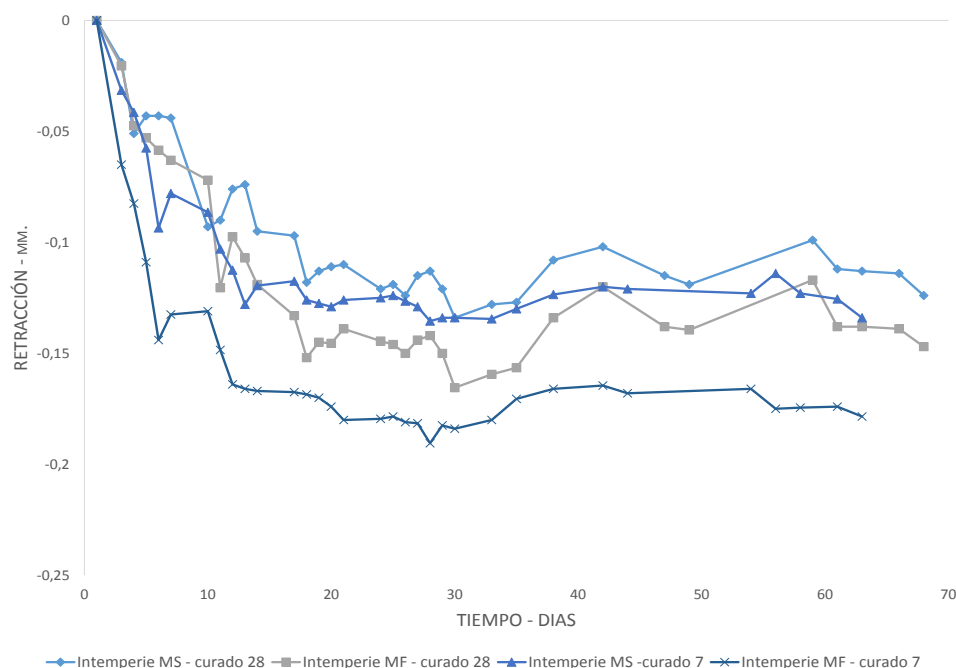


Fig. 31 Retracción en prismas, con 7 y 28 días de curado estándar, dos tipos de mezclas y en intemperie

La evaluación de la retracción en ambiente de intemperie, muestra que su comportamiento en comparación con las muestras ubicadas en ambiente de laboratorio, es más variable entre una medición y otra, demostrando la influencia que tienen los cambios de humedad y temperatura en el comportamiento de la retracción.

A pesar de que en este ambiente se presentaron lecturas de humedad más altas y de temperatura más bajas de acuerdo con la figura 30, las mediciones a 28 días de todos los especímenes llegaron al 100% de su retracción total, sin embargo es importante tener en cuenta que aunque en promedio la humedad relativa es mayor, se tienen picos bajos todos

los días. Es importante resaltar que en este ambiente las mezclas fluidas, quienes tienen el mayor porcentaje de cemento presentaron la mayor retracción.

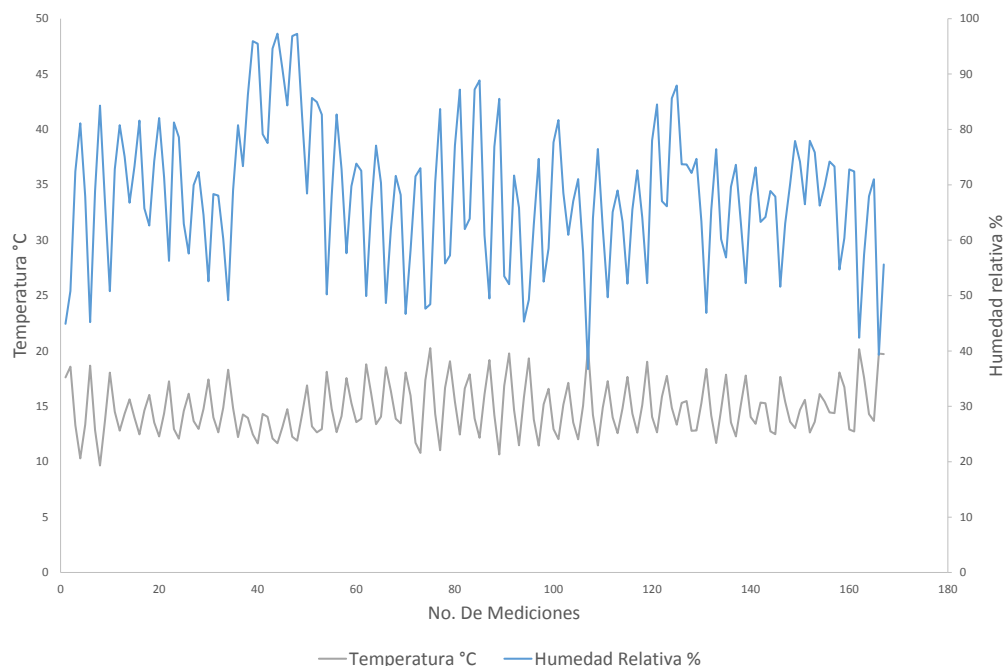


Fig. 32 Condiciones ambientales en intemperie PUJ.

Finalmente es importante mencionar, que para todas las mezclas, excepto MF7, se presentaron magnitudes de retracción en promedio mayores en un 15% en el ambiente de laboratorio en comparación con el ambiente de intemperie. Este comportamiento demuestra la fuerte influencia que representa para los especímenes, permanecer en un ambiente de mayor temperatura y de menor humedad relativa, como es el caso del laboratorio.

4.3.7 Predicción de la retracción según ACI 209R-92

Con el objetivo de generar factores de comparación frente a los resultados obtenidos, se estableció una primera modelación de predicción de la retracción para las características de los especímenes fabricados, utilizando las recomendaciones establecidas en el ACI 209R-92, aclarando que entendemos que todos los factores estadísticos inmersos en esta modelación están basados en concretos normales.

4.3.8 Ejemplo del cálculo de la retracción según ACI 209R-92, para muestras con 28 de días de curado, 28 días de secado y para mezclas secas.

Datos de entrada:

- $f'_c = 110,63 \text{ Mpa.}$

- Humedad relativa $h = 68 \%$
- Relación volumen / superficie $V/S = 28mm$
- Curado inicial $t_c = 28 \text{ días}$
- Edad al ensayar: $t_o = 56 \text{ días}$
- Cemento tipo: I
- Tamaño del agregado máximo: 0,6 mm.
- Contenido de cemento $c = 900 \text{ Kg/m}^3$
- Contenido de agua $a = 234 \text{ Kg/m}^3$
- Relación agua / cemento $\frac{a}{c} = 0,28$
- Relación agregado / cemento: 0,99.
- Porcentaje de agregado fino $\psi = 100\%$
- Contenido de aire $\alpha = 5\%$
- Asentamiento $s = 65mm$
- Densidad del concreto $\gamma_c = 2250 \text{ Kg/m}^3$

Deformaciones por retracción:

Retracción nominal última para condiciones estándar:

$$\varepsilon_{shu} = 780 \times 10^{-6}$$

Factores de corrección:

Factor de corrección por curado húmedo:

Por tabla A-2 = 0,86.

Por formula:

$$\gamma_{sh,tc} = 1,202 - 0,2337 \log(tc) =$$

$$\gamma_{sh,tc} = 1,202 - 0,2337 \log(28) = 0,864$$

Factor de corrección por humedad relativa:

$$\gamma_{sh,RH} = 1,40 - 1,02h$$

$$\gamma_{sh,RH} = 1,40 - 1,02(0,68) = 0,703$$

Factor de corrección por la relación volumen / superficie:

Para espesores promedio menores a 3,75mm. Se usan los factores dados en la tabla A-3 de la norma ACI 209R-92:

$$\gamma_{sh,V/S} = 1,17$$

Factor de asentamiento:

$$\gamma_{sh,s} = 0,89 + 0,00161 \times s$$

$$\gamma_{sh,s} = 0,89 + 0,00161 \times 65 = 0,995$$

Factor de agregado fino:

$$\gamma_{sh,\psi} = 0,9 + 0,002\psi \text{ si } \psi > 50\%$$

$$\gamma_{sh,\psi} = 0,9 + 0,002(100\%) = 0,902$$

Factor de contenido de cemento

$$\gamma_{sh,c} = 0,75 + 0,00061c$$

$$\gamma_{sh,c} = 0,75 + 0,00061(900) = 1,299$$

Factor de contenido de aire

$$\gamma_{sh,\alpha} = 1$$

Factor de corrección acumulada

$$\gamma_{sh} = \gamma_{sh,tc} \gamma_{sh,RH} \gamma_{sh,vs} \gamma_{sh,s} \gamma_{sh,\psi} \gamma_{sh,c} \gamma_{sh,\alpha}$$

$$\gamma_{sh} = 0,864 \times 0,703 \times 1,17 \times 0,995 \times 0,902 \times 1,299 \times 1 = 0,828$$

Deformación última de retracción

$$\varepsilon_{shu} = 780 \gamma_{sh} \times 10^{-6}$$

$$\varepsilon_{shu} = 780 (0,828) \times 10^{-6} = 0,000646$$

Relación de tiempo

$$f = 26e^{0,0142 \times VS} = 38,69$$

Función de tiempo de retracción

$$f_{(t,tc)} = \left[\frac{(t - t_c)^\alpha}{f + (t - t_c)^\alpha} \right]$$

$$f_{(t,tc)} = \left[\frac{(56 - 28)^1}{38,69 + (56 - 28)^1} \right] = 0,42$$

Deformación de retracción

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \left[\frac{(t - t_c)^\alpha}{f + (t - t_c)^\alpha} \right] \times \varepsilon_{shu}$$

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \left[\frac{(56 - 28)^1}{38,69 + (56 - 28)^1} \right] \times 0,000646 = 0,271 \text{ mm.}$$

Los valores de la modelación completa de la predicción de la retracción según ACI 209R, se presentan en las figuras 31, para muestras con 28 días de curado estándar y en la figura 32 para muestras con 7 días de curado estándar.

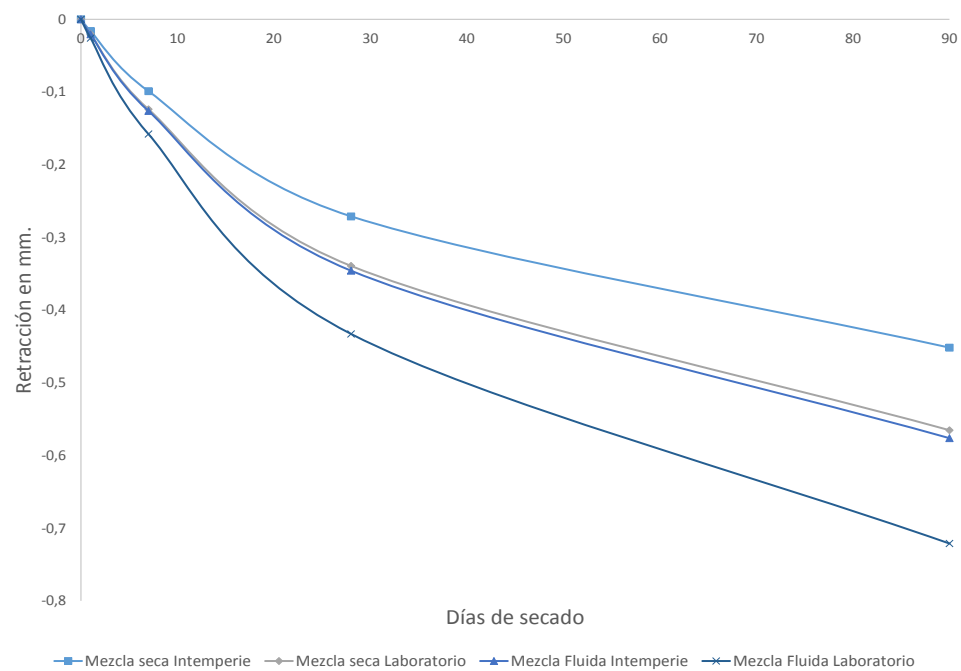


Fig. 33 Predicción de la retracción según ACI 209R-92, para muestras con 28 días de curado estándar y dos ambientes de secado.

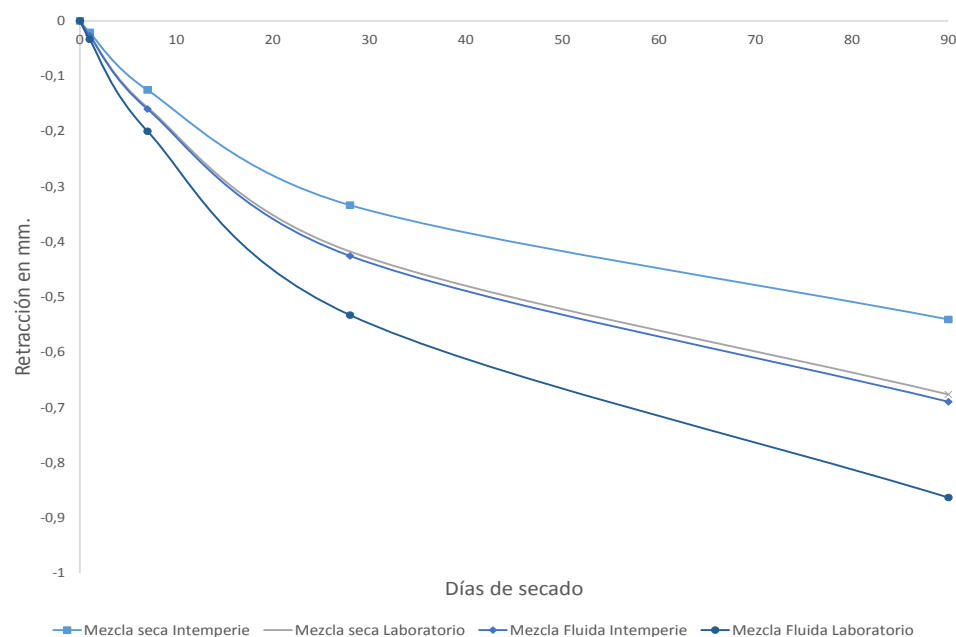


Fig. 34 *Predicción de la retracción según ACI 209R-92, para muestras con 7 días de curado estándar y dos ambientes de secado.*

4.3.9 Comparación de la retracción real y la predicción según ACI 209R-92

Con el objetivo de contrastar el resultado de la predicción de la retracción según el método propuesto por el ACI 209R, con los resultados reales obtenidos de la medición de cada uno de los especímenes que hacen parte de esta investigación, excepto los elementos “secados” en cámara de curado estándar, dado que el método de predicción no contempla retracciones en ambientes de humedad relativa del 100%, se presentan las siguientes gráficas:

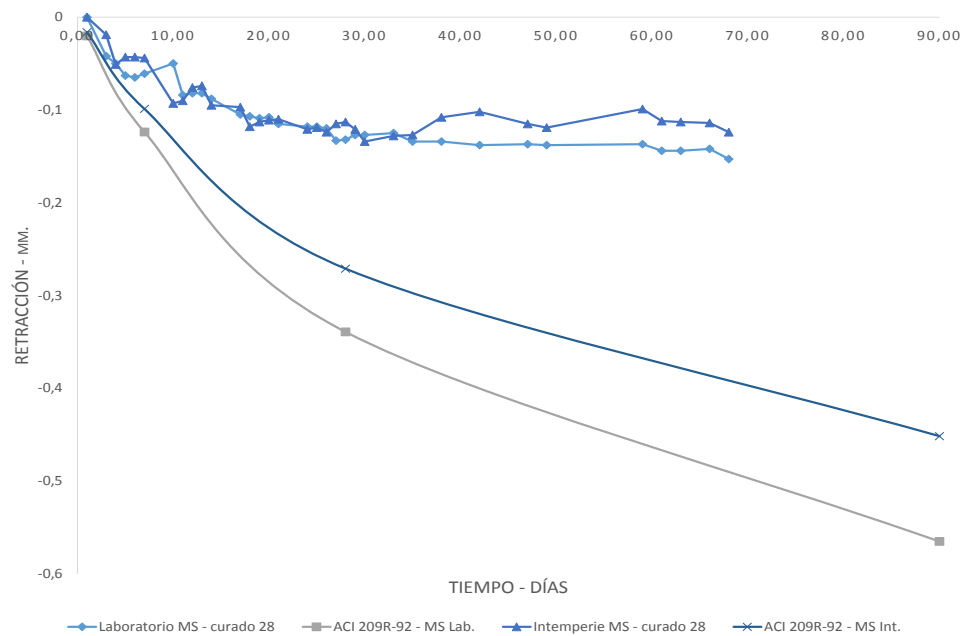


Fig. 35 Comparación de la retracción en mezclas secas medidas reales vs. ACI 209R-92, para muestras con 28 días de curado estándar y dos ambientes de secado

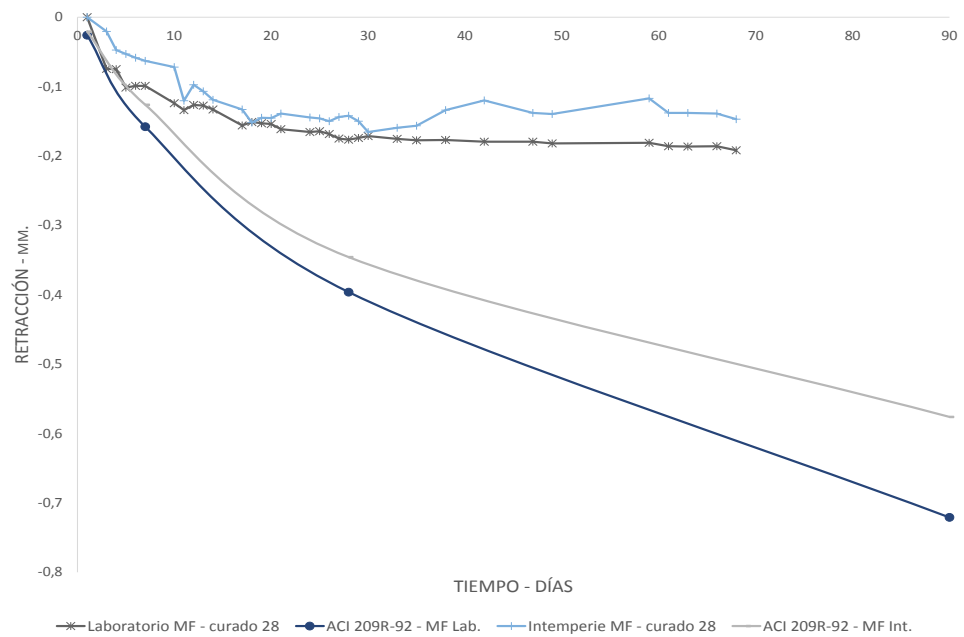


Fig. 36 Comparación de la retracción en mezclas fluidas medidas reales vs. ACI 209R-92, para muestras con 28 días de curado estándar y dos ambientes de secado

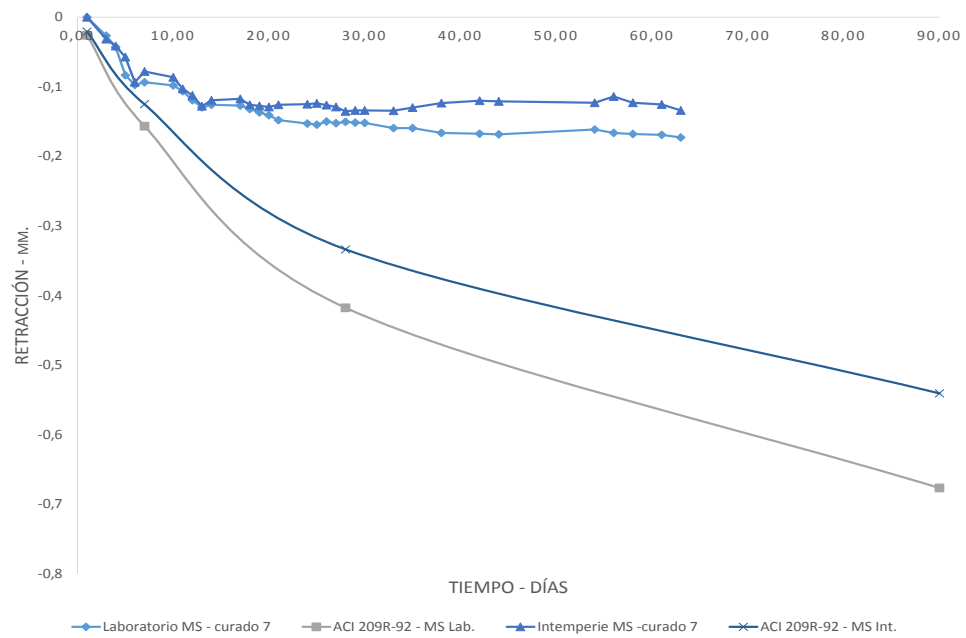


Fig. 37 Comparación de la retracción en mezclas secas medidas reales vs. ACI 209R-92, para muestras con 7 días de curado estándar y dos ambientes de secado.

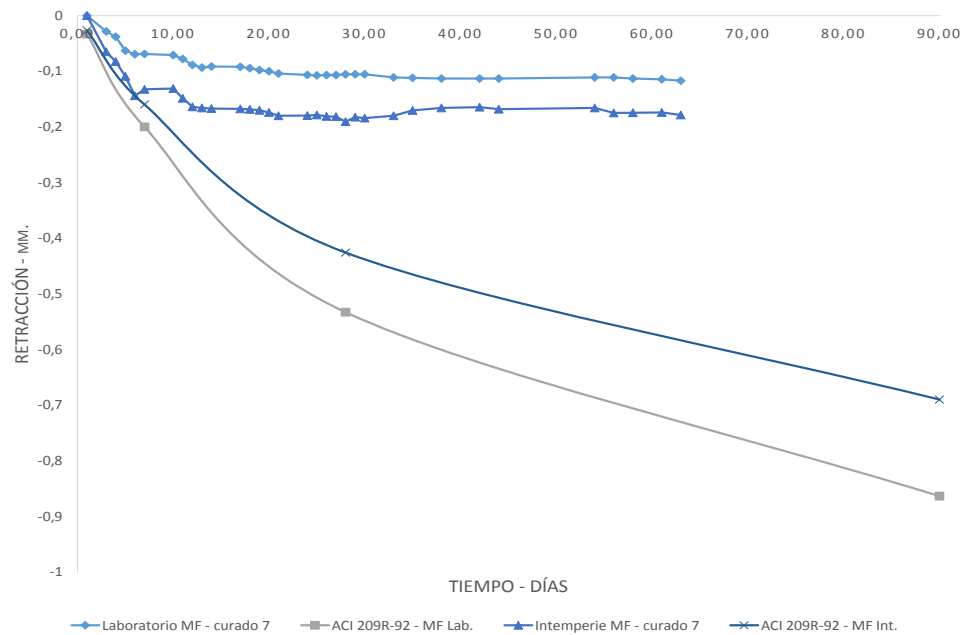


Fig. 38 Comparación de la retracción en mezclas fluidas medidas reales vs. ACI 209R-92, para muestras con 7 días de curado estándar y dos ambientes de secado.

En las figuras 33, 34, 35 y 36 se observa, que el comportamiento de los especímenes independientemente de los días de curado, para los dos ambientes de secado evaluados, no coinciden con los resultados de la predicción de acuerdo con las variables establecidas por el ACI 209R. Esta diferencia es atribuible a factores como la retracción última establecida por el ACI para concretos normales, que corresponde a 780×10^{-6} mm dado que de acuerdo con (Graybeal 2006), la retracción última para concretos de ultra alto desempeño corresponde a 555×10^{-6} mm. Otro factor encontrado que tiene incidencia en este resultado es que la medición desarrollada en esta investigación, inicia tomando como dato de entrada, la medida del espécimen después del curado, es decir que las variaciones volumétricas que ocurren desde la fundida hasta el final del curado no son tenidas en cuenta y la magnitud de las mismas pueden llegar a ser más de la mitad de la retracción total (Graybeal 2006). En las figuras 33, 34, 35 y 36, existe cerca de un 25 % de diferencia entre las predicciones y los datos obtenidos en las mezclas analizadas, donde la mayor predicción está dada en los concretos convencionales lo que lleva a establecer un control entre los concretos convencionales y los concretos de ultra alto desempeño.

4.3.10 Predicción de la retracción según ACI 209R-92 – Modificada por valores obtenidos por Graybeal

En vista de las grandes diferencias encontradas entre la predicción de la retracción según ACI 209R y los resultados reales de retracción de los especímenes, en sus diferentes ambientes de secado, se propone modificar el dato de entrada de la retracción última, pasando de 780×10^{-6} a 555×10^{-6} para buscar una predicción que sea acorde con el tipo de material que se está evaluando. Adicionalmente, también se genera una modificación en el punto en el cual se inicia la comparación, teniendo en cuenta la condición de retracción que se está midiendo. Por otra parte, antes de iniciar el ejercicio de predicción es importante aclarar que para realizar la predicción en UHPC, se deberá modificar el factor A o f en la ecuación de la función de tiempo de retracción ACI 209R, para ajustarla a la curva real de la retracción de este tipo de concretos, en donde las retracciones iniciales son mucho más altas que las retracciones de secado de los concretos normales, en donde se estima que para los UHPC, se obtendrá un 95% de la retracción total a los 56 días, mientras en concretos normales ACI-209R, predice que será del 60%, estando allí la más relevante diferencia (Graybeal 2006).

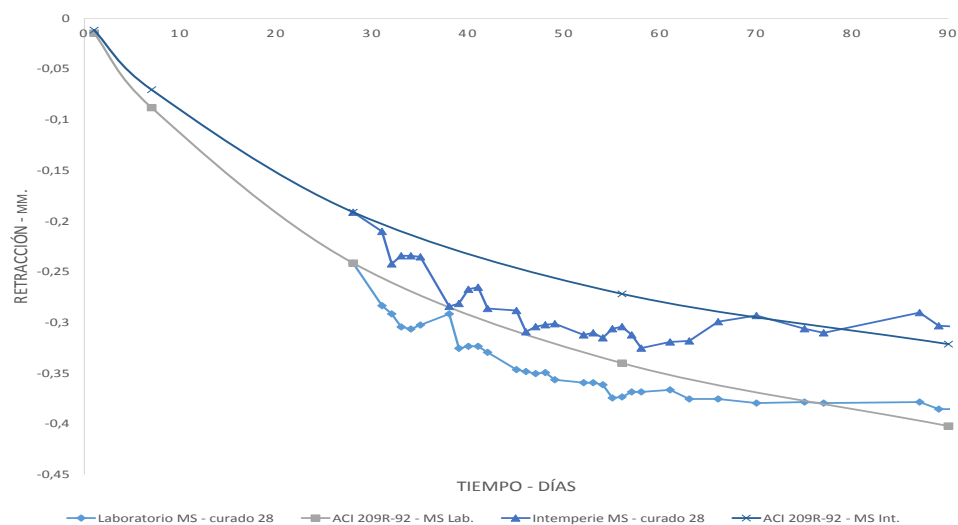


Fig. 39 Comparación de la retracción en mezclas secas medidas reales vs. ACI 209R-92 – modificado Graybeal, para muestras con 28 días de curado estándar y dos ambientes de secado.

La figura 37 muestra la comparación del comportamiento de la retracción para mezclas secas curadas por 28 días, en donde encontramos que para los datos finales, existe una diferencia mínima entre el resultado real, frente a la predicción modificada, cuya magnitud promedio es 0,00617 mm. Que corresponde al 2% de diferencia, lo que nos permite validar la veracidad de las magnitudes finales de la predicción, más no el comportamiento total de la curva.

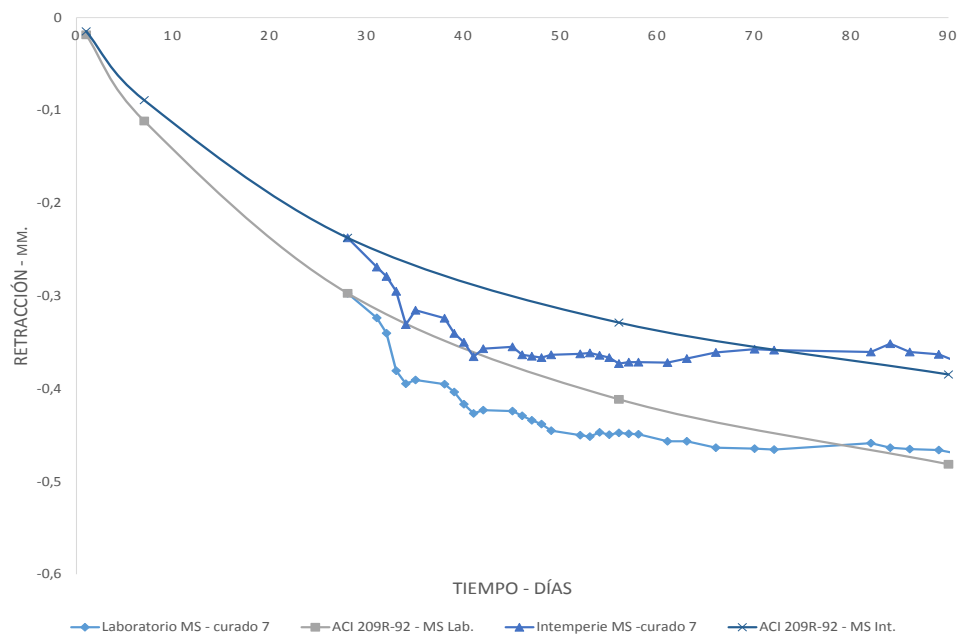


Fig. 40 Comparación de la retracción en mezclas secas medidas reales vs. ACI 209R-92 – modificado Graybeal, para muestras con 7 días de curado estándar y dos ambientes de secado.

La figura 38 muestra la comparación del comportamiento de la retracción para mezclas secas curadas por 7 días, en donde encontramos que para los datos finales, existe una diferencia mínima entre el resultado real, frente a la predicción modificada, cuya magnitud promedio es 0,011 mm, que corresponde al 2% de diferencia, lo que nos permite validar la veracidad de las magnitudes finales de la predicción, más no el comportamiento total de la curva.

Para finalizar la comparación de las mezclas secas, podemos inferir que el modelo de predicción se ajusta de manera muy precisa al comportamiento real, aclarando que se tiene en cuenta solo las magnitudes finales de la retracción, independiente del tiempo de curado, lo cual valida las métricas propuestas por el modelo en donde se ajusta la edad del espécimen que se está midiendo.

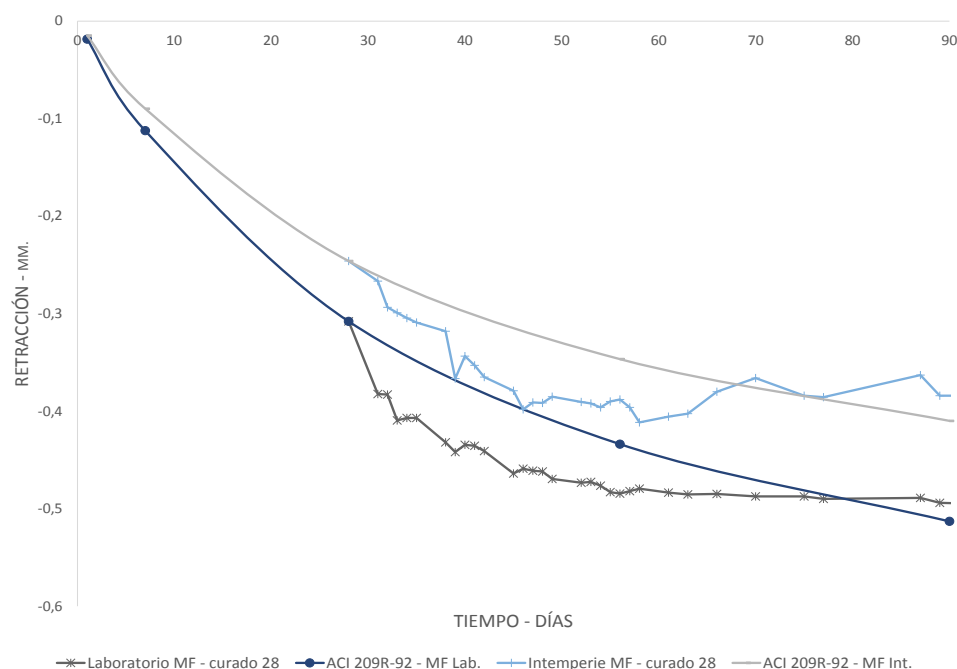


Fig. 41 Comparación de la retracción en mezclas fluidas medidas reales vs. ACI 209R-92 – modificado Graybeal, para muestras con 28 días de curado estándar y dos ambientes de secado.

La figura 39 muestra la comparación del comportamiento de la retracción para mezclas fluidas curadas por 28 días, en donde encontramos que para los datos finales, existe una diferencia mínima entre el resultado real frente a la predicción modificada, cuya magnitud promedio es 0,013 mm, que corresponde al 2,6% de diferencia, lo que nos permite validar la veracidad de las magnitudes finales de la predicción, más no el comportamiento total de la curva.

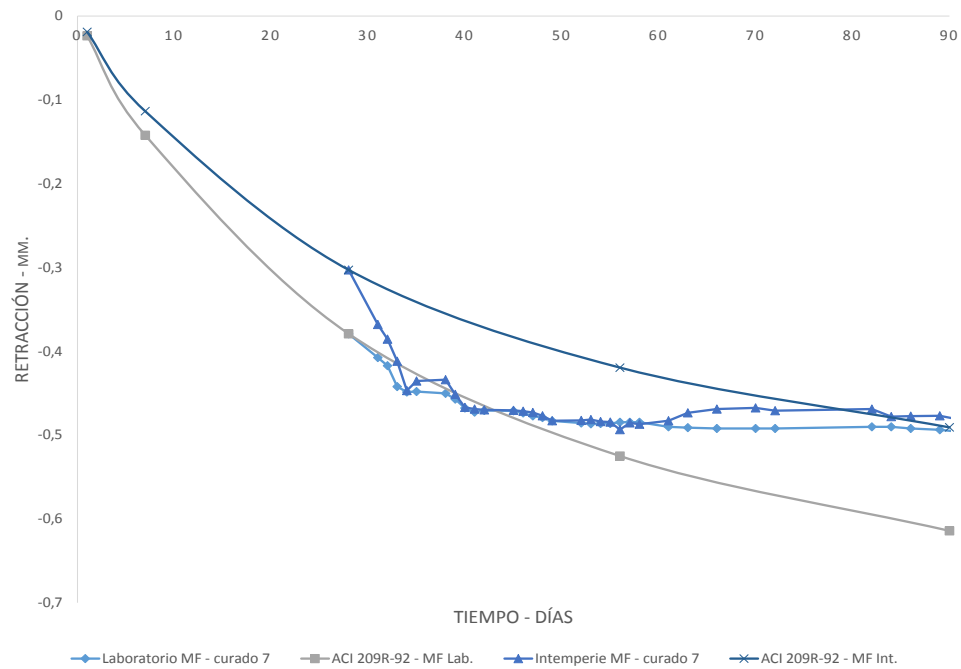


Fig. 42 Comparación de la retracción en mezclas fluidas medidas reales vs. ACI 209R-92 – modificado Graybeal, para muestras con 7 días de curado estándar y dos ambientes de secado.

La figura 40 muestra la comparación del comportamiento de la retracción para mezclas fluidas curadas por 7 días, en donde encontramos que para las mezclas fluidas secadas en intemperie en los datos finales, existe una diferencia mínima entre el resultado real, frente a la predicción modificada, cuya magnitud es 0,0093 mm, que corresponde al 1,94% de diferencia, lo que nos permite validar la veracidad de las magnitudes finales de la predicción, más no el comportamiento total de la curva. Sin embargo, dadas las características del comportamiento de las muestras secadas en ambiente de laboratorio, encontramos que para este único caso, no existe una precisión similar con respecto a la predicción, encontrando una diferencia de 0,118 mm, que corresponde al 23,8% de diferencia.

Como se observa en las comparaciones mostradas en las figuras 37, 38, 39 y 40, se usó el inicio de la comparación a partir del día 28, dado que desde ese punto se han iniciado las mediciones de retracción de los especímenes que se están comparando. Así mismo, se encuentra una coincidencia con el comportamiento predicho por (Graybeal 2006), en donde predice que las medidas de retracción para los UHPC, será del 95% del total a 56 días y este comportamiento se observa claramente en los resultados obtenidos.

4.3.11 Comparación de resultados frente a diferentes autores

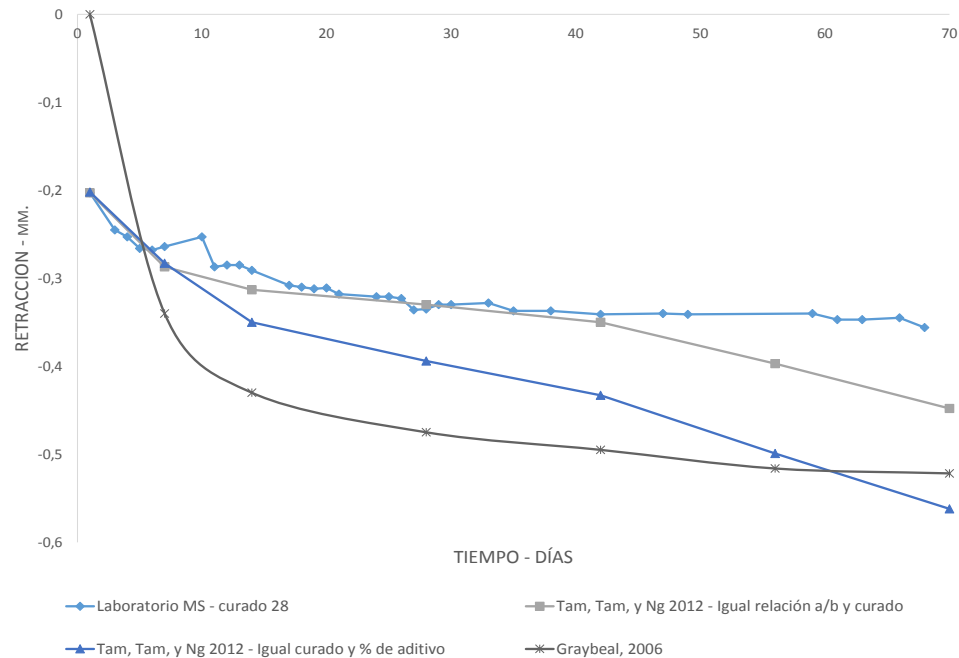


Fig. 43 Comparación de resultados de retracción en mezclas secas con 28 días de curado estándar frente a tres autores con mezclas y curado similar.

Como se puede observar en la figura 41, asumimos el inicio de nuestra retracción igual a la obtenida a los 28 días de curado por (Tam, Tam, y Ng 2012). Esto nos permite unificar las características de la comparación, teniendo en cuenta las diferencias en los momentos de inicio de la medición, además de ser las muestras con mayores coincidencias en cuanto al curado. No obstante lo anterior, es relevante resaltar los parámetros que fueron utilizados para llegar a los resultados mostrados en la comparación:

- Tam, Tam y Ng:

Los moldes de fabricación fueron cubiertos por láminas de plástico hasta el desmolde para evitar que se pierda humedad en los alrededores del concreto. Las muestras se desmoldaron al menos 24 h después de la fundida debido a la alta dosis de súper plastificante, lo que implica dicho tiempo de fraguado.

Todos los especímenes fueron curados después de desmoldados en un tanque con agua a 27°C durante 28 días, luego todos ellos se almacenaron en un ambiente de 50% de humedad relativa y 25°C.

El tamaño de los especímenes que fueron fundidos fue de 75 x 75 x 250 mm.

Relación agua / materiales cementantes = 0,23 y 0,20.

Porcentajes de aditivo= 2,5 y 3%.

- Graybeal

Los moldes de fundida, una vez fueron vaciados, se mantuvieron bajo el ambiente del laboratorio donde se llevó a cabo la investigación, donde 22 horas después fueron desmoldados.

Todos los especímenes se expusieron a secado a una temperatura y humedad controlada, aunque no se presentan los datos ambientales a los que estuvieron expuestos.

El tamaño de los especímenes que fueron fundidos corresponde a 76 x 76 x 280 mm.

Relación agua / materiales cementantes = 0,20.

Una vez identificadas las características de relación agua / materiales cementantes, curado, ambiente de secado y tamaño de muestras, podemos iniciar a comparar los resultados.

Como podemos observar en la figura 41, cuando se comparan los resultados de la mezcla seca curada durante 28 días y asumiendo que la retracción desarrollada durante el periodo de curado es igual a la obtenida por (Tam, Tam, y Ng 2012), (Se asume la misma retracción durante el periodo de curado, para poder realizar la comparación, dado que la retracción que se ha medido en esta investigación es la ocurrida después del periodo de curado). Para la mezcla que coincide con la misma relación agua / materiales cementantes y el mismo curado y prácticamente las mismas condiciones de secado y la misma edad del espécimen, encontramos un comportamiento cuya tendencia es muy similar a los resultados de esta investigación, incluso coinciden en algunas magnitudes de retracción hasta el día 42. A partir de este día se observa que nuestros resultados se estabilizan, aunque vuelven a mostrar aumentos de retracción después del día 56, pero, en magnitudes muy inferiores a la muestra con la que se compara. Debido a que las condiciones que afectan la retracción, como relación agua / materiales cementantes, % de fibras, condiciones ambientales de secado (HR y T°), son similares, enfocamos la posible sustentación del comportamiento diferencial hacia el tamaño de las muestras, dado que varía sustancialmente de 25 x 25 x 280 mm, a 75 x 75 x 250 mm, hacia la variación del porcentaje de aditivo (2,5% a 3%) y hacia la composición porcentual de los materiales cementantes, en donde varía el cemento de 900 Kg/m³ A 765 Kg/m³, y humo de sílice de 180 Kg/m³ a 247 Kg/m³. Lo anterior, permite inducir que la posible razón de este comportamiento obedece a que con menores tamaños de muestras, mayores porcentajes de aditivo y mayor cantidad de cemento, se reducen las magnitudes totales de retracción y que un porcentaje cercano al 95% de la retracción total medida, tiende a ocurrir antes del día 30. Con respecto a los resultados obtenidos por (Tam, Tam, y Ng 2012), en los que tiene una relación agua / materiales cementantes menor (0,2 frente a 0,23) y el

resto de las condiciones idénticas, se observan retracciones mayores en un 20% para las muestras sometidas a comparación, sin embargo, la tendencia observada es la misma que la anterior.

Finalmente al revisar los datos de la investigación de (Graybeal 2006), encontramos diferencias importantes como: las muestras se midieron a las 22 horas de fundidas, se sometieron a secado inmediatamente después de desencofradas y no conocemos las condiciones ambientales en las que se desarrolló el secado. Es necesario nuevamente hacer la misma salvedad en el punto de inicio de las mediciones, para tener claridad en la discusión. El comportamiento mostrado por (Graybeal 2006), al dejar secar las muestras desde el mismo momento de la fundida, sin permitir ningún tipo de curado, hace que las magnitudes de la retracción inicial sea extremadamente alta frente a (Tam, Tam, y Ng 2012), y nos permitimos compararlos, dado que para esta investigación no se realizaron estas medidas iniciales. No obstante a lo anterior, encontramos que a pesar de que existe una diferencia de magnitudes del 32% entre la retracción medida por (Graybeal 2006) y la retracción medida en esta investigación (partiendo de la retracción inicial de (Tam, Tam, y Ng 2012) la tendencia en el comportamiento es muy similar después del día 14, incluso comprobando el comportamiento demostrado por (Graybeal 2006), de obtención del 95% de la retracción total en los primeros 56 días de edad de las muestras. La diferencia de magnitudes las podemos atribuir a dos factores, en primer lugar a que al iniciar la medición a las 22 horas, logra medir parte de la retracción autógena que no puede medirse en la etapa de secado y en segundo lugar, que las muestras de UHPC, que se someten a secado inmediatamente después de fundidas obtienen su magnitud de retracción mucho más rápido.

4.7 Deflexión por Fluencia

El control de las deflexiones instantáneas o diferidas, puede condicionar los parámetros de diseño y funcionalidad de las estructuras. En puentes, una correcta estimación de la flecha evita problemas de acumulaciones de agua, vibraciones excesivas, o en el caso más desfavorable, problemas de colapso. En edificios, donde las luces son notoriamente más reducidas, las deformaciones diferidas no producen colapsos generalmente, pero si implican daños sobre elementos no estructurales como los muros divisorios, así como vibraciones no deseadas en placas de entrepiso. (Duarte Gómez, 2010). En razón a lo anterior, se hace necesario conocer las variables que controlan el fenómeno de deflexiones por carga diferida para el tipo de material que constituya el sistema de resistencia de cargas.

4.4.1 Deflexión por fluencia en elementos sometidos a curado estándar por 28 días

Se definió realizar ensayos de muestras de UHPC, para dos tipos de mezclas y dos tipos de curado. En donde se desarrollaron especímenes de 100 x 20 x 600 mm., que fueron sometidos a una carga puntual de flexión en el centro de la luz, que tiene una magnitud de 490 N.

correspondiente al 50% de su momento de fisuración. El objetivo del ensayo es medir las deflexiones causadas por el fenómeno de fluencia y para tal efecto se mantuvo la carga sostenida por 70 días.

Se inició el ensayo con las plaquetas correspondientes a curado de 28 días, tiempo en el cual se sacaron de la cámara de curado en donde habían permanecido en condiciones ambientales controladas de humedad y temperatura ($HR=100\%$ y $T^{\circ}=23^{\circ}C$). Procediendo a ubicarlas en el recinto construido para alojar la prueba, en el que se contó con elementos que permitieron controlar la temperatura y la humedad a lo largo de toda la prueba como se podrá ver más adelante. Se instalaron los LVDTs sobre los elementos ubicados sobre el centro de la luz de la plaqueta y se inició la medición de las deflexiones. El procedimiento de carga se realizó con una plaqueta a la vez, de forma controlada, instalando 10 elementos suspendidos de un soporte, instalado sobre el centro de la luz de la plaqueta, cada uno de 49 N. Las mediciones en los momentos de carga y descarga se programaron para que las lecturas se realicen en número de 10 datos por segundo, para obtener la precisión adecuada en dichos momentos. La periodicidad de toma de datos para el consecuente desarrollo del ensayo fue de 1 dato por segundo. Sin embargo, los datos fueron procesados y graficados a razón de un dato por minuto, dada la gran cantidad de datos recolectados.

Como podemos observar en la figura 42, las deflexiones elásticas iniciales, lograron un comportamiento que denota una tendencia similar entre ellas, en donde se resalta que las plaquetas fundidas con mezclas secas, es decir, mezclas con menor relación agua / materiales cementantes, obtuvieron menores deflexiones instantáneas. También podemos observar que las deflexiones por fluencia fueron menores en las plaquetas fundidas con mezclas fluidas.

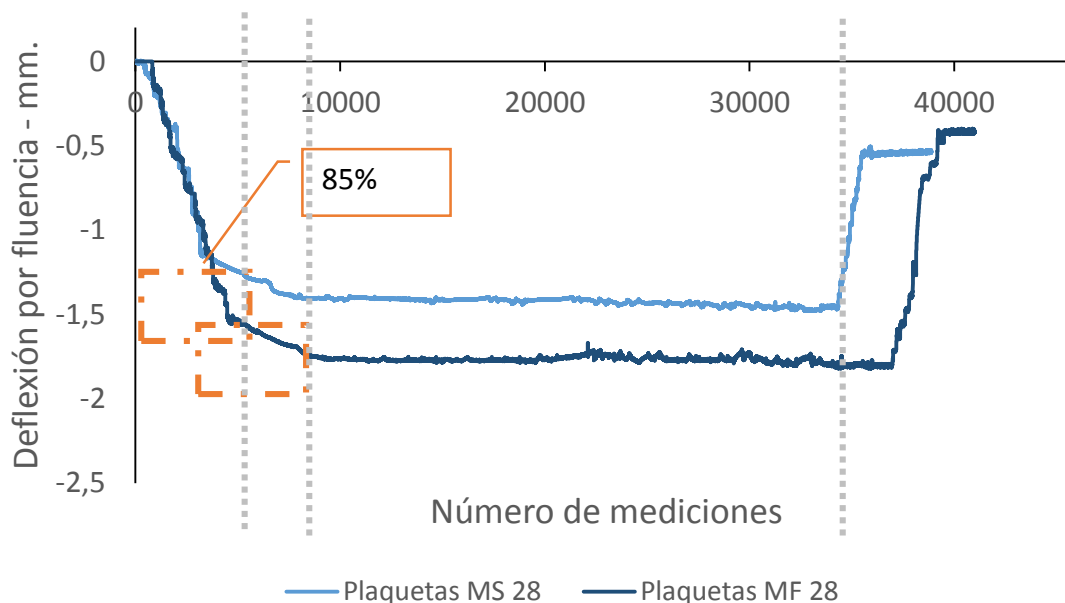


Fig. 44 Diagrama de deflexiones en plaquetas con curado estándar de 28 días, dos tipos de mezcla y sometidas a esfuerzos de flexión durante 72 días.

Este comportamiento es contradictorio con respecto a lo encontrado por (Lopez, 2005), donde se afirma que el comportamiento de la fluencia está muy relacionado con la relación agua / materiales cementantes, en donde con el incremento de ésta relación, incrementa la fluencia, dado que disminuye la resistencia y aumenta la porosidad.

Por otra parte es importante resaltar que para este ensayo se establece como principal hallazgo, que en promedio se obtiene el 85% de la deflexión total medida, cuando tan solo se llevan 5 días de secado, mostrando de esta forma la fuerte influencia que representa el diferencial de condiciones ambientales, en donde se pasa de 100% a 50% de humedad relativa, que en principio puede ser la causa de este hallazgo. Se puede entender que una vez pasan los 5 días, la muestra logra un equilibrio con el ambiente de secado y la deflexión se desarrolla de manera constante hasta el instante último en que se realizó la medición.

Finalmente , como se dijo en el apartado de materiales y métodos, las condiciones ambientales como la humedad relativa y la temperatura durante el ensayo fueron controladas, encontrando humedades relativas durante el ensayo de 50% +/- 3. Sin embargo para el caso de la temperatura, podemos observar en la figura 43, que el comportamiento de la misma durante el ensayo tuvo algunas alteraciones menores, dado que su media fue de 22,59°C, lo que nos permite aislar el comportamiento de deflexión por fluencia de las condiciones de temperatura a las que estuvieron expuestos los especímenes durante el ensayo.

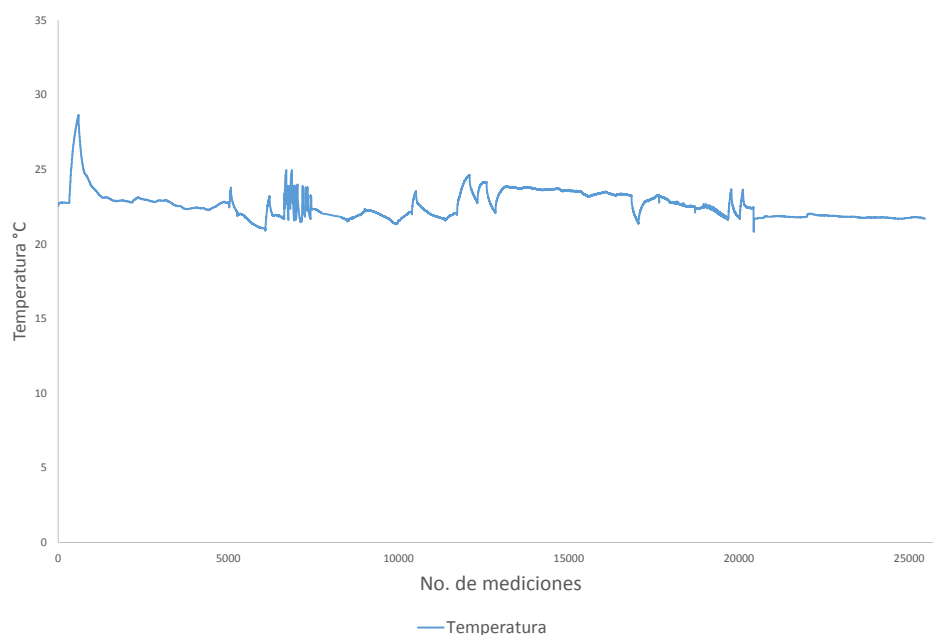


Fig. 45 Condiciones ambientales de temperatura, durante ensayo de plaquetas con 28 días de curado. Cámara de ensayos de fluencia a flexión.

4.4.2 Deflexión por fluencia en elementos sometidos a curado estándar por 7 días

Una de las variables que consideramos importantes de contrastar en la investigación, es el ensayo de especímenes a diferentes edades en su puesta en carga. Para este caso corresponde presentar los resultados de fluencia a flexión para especímenes con 7 días de fundidos y con 7 días de curado estándar.

De la misma manera que se desarrolló tanto la etapa de carga como en el desarrollo del ensayo para los especímenes con 28 días de edad y de curado estándar, se desarrolló el ensayo para las plaquetas con 7 días.

Observando los resultados reflejados en la figura 44, podemos inferir que el comportamiento frente a las deflexiones elásticas, reflejan el mismo patrón de comportamiento que en las pruebas realizadas a las plaquetas de 28 días, en donde las plaquetas fundidas con mezcla seca obtuvieron las menores deflexiones iniciales y consecuentemente las plaquetas fundidas con mezclas fluidas obtuvieron las mayores deflexiones iniciales.

Pasando a la revisión de las deflexiones producidas por el fenómeno de fluencia, encontramos dos comportamientos que consideramos necesario abordarlos separadamente. En primer lugar, es muy importante resaltar que las deflexiones por fluencia se desarrollaron aceleradamente durante la primera mitad de la prueba, en donde se llegó a cerca del 96% de la deflexión total por fluencia. A partir de ese momento las deflexiones se presentaron de manera muy controlada. Este comportamiento comprueba lo descrito por (ARANGO CAMPO 2010), en donde se establece que en concretos jóvenes se notan mucho más las variaciones de deflexión por fluencia, teniendo velocidades de fluencia mucho mayores en las primeras semanas respecto de hormigones más maduros.

A partir de una determinada edad se producen leves alteraciones en el valor de la fluencia, pues las resistencias tienden a estabilizarse. No obstante lo anterior, se presenta el mismo fenómeno de las plaquetas a 28 días, en donde las mayores deflexiones por fluencia se presentaron en las plaquetas fundidas con mezclas secas, es decir, las mezclas con menor relación agua / materiales cementantes, lo que de acuerdo con (Lopez, 2005), debería tener un comportamiento inverso. Lo anterior nos lleva a resaltar que los dos tipos de mezclas poseen la misma relación agua / cemento, que ha sido determinada en 0,28, dando paso a una discusión más profunda encaminada a determinar qué factores constituyentes del material generan la contradicción encontrada.

En primer lugar podemos citar que para el caso de las mezclas secas, el contenido de cemento fue de $900 \text{ Kg} / \text{m}^3$ mientras que para las mezclas fluidas fue de $1000 \text{ Kg} / \text{m}^3$ y el contenido de humo de sílice fue de 180 y $100 \text{ Kg} / \text{m}^3$ respectivamente. De acuerdo con lo anterior encontramos una relación de causalidad entre los resultados y lo expresado por (Lopez, 2005) en donde a pesar de que las dos mezclas poseen la misma relación agua / cemento, la mayor cantidad de cemento puede estar generando que se obtengan mayores resistencias a la flexión y por tanto ésta sea la razón que explique los resultados.

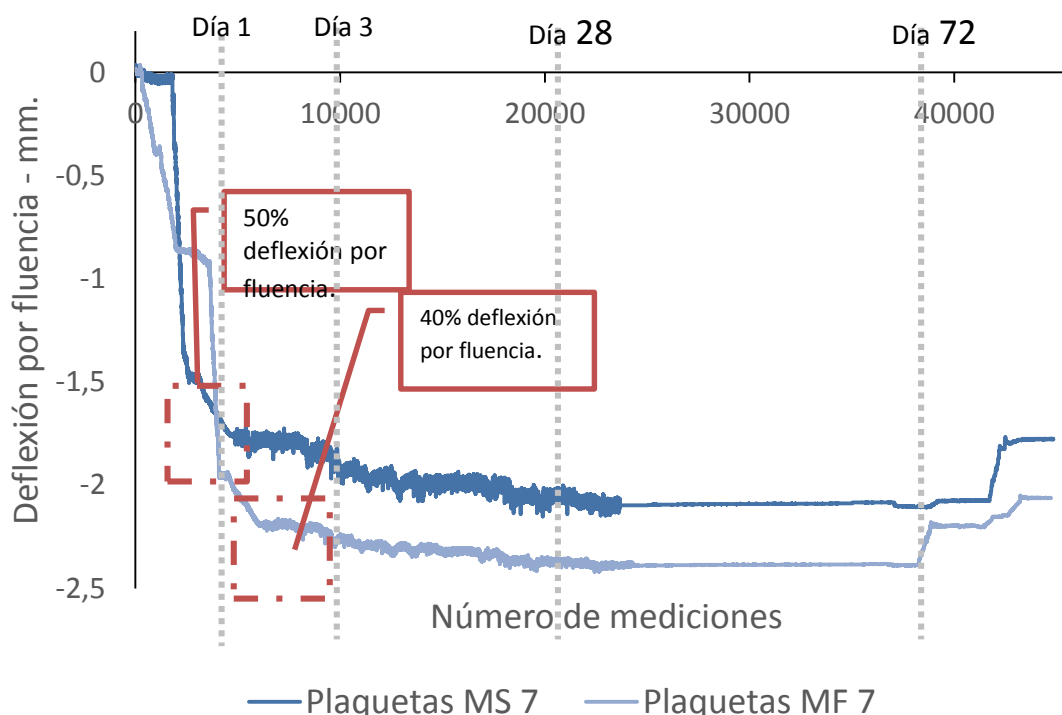


Fig. 46 Diagrama de deflexiones en plaquetas con curado estándar de 7 días, dos tipos de mezcla y sometidas a esfuerzos de flexión durante 60 días.

Por otra parte, es importante referenciar como hallazgo significativo de este ensayo, que en promedio el 50% de la deflexión por fluencia medida en las plaquetas, se obtuvo en los primeros 4 días. Después de este momento se siguen presentando deflexiones importantes hasta que las muestras alcanzan aproximadamente 28 días de secado, en donde se alcanza en promedio un 40% de la deflexión dejando tan solo un 10% restante para los siguientes días del ensayo. Lo anterior puede explicarse como ya se mencionó anteriormente, que para las deflexiones aceleradas de los primeros días, se puede atribuir al diferencial de humedad relativa hasta que el espécimen entra en equilibrio con el ambiente de secado y por otra parte, el comportamiento después de este momento puede ser atribuible a que el elemento está en proceso de adquirir su resistencia total y por tanto durante éste periodo las deflexiones son muy marcadas.

Finalmente, como ya se mencionó, las condiciones ambientales como la humedad relativa y la temperatura durante el ensayo fueron controladas, encontrando humedades relativas durante el ensayo de 50% \pm 3. Sin embargo para el caso de la temperatura, podemos observar en la figura 45, que el comportamiento de la misma durante el ensayo tuvo algunas alteraciones menores, dado que su media fue de 22,57°C, lo que nos permite aislar el comportamiento de deflexión por fluencia de las condiciones de temperatura a las que estuvieron expuestos los especímenes durante el ensayo.

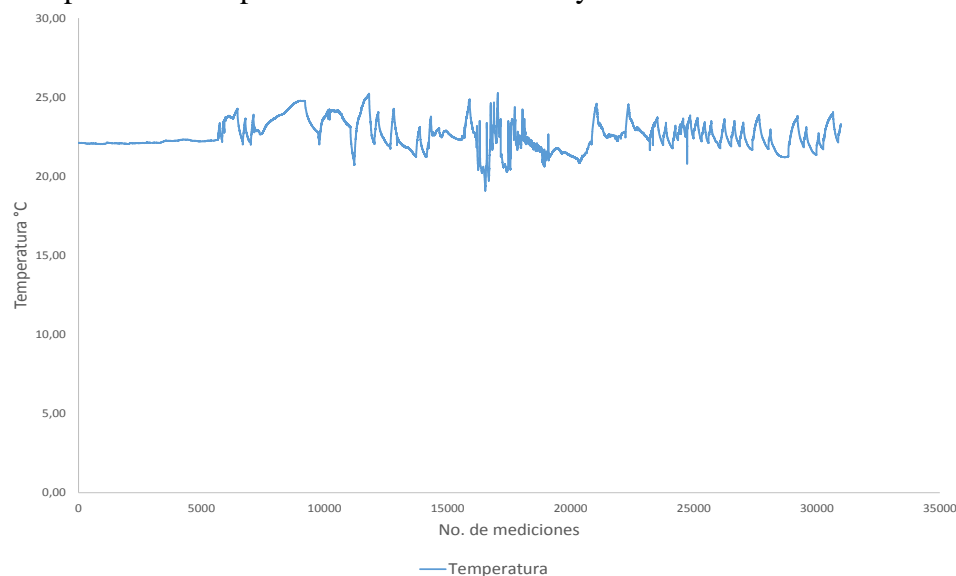


Fig. 47 Condiciones ambientales de temperatura, durante ensayo de plaquetas con 7 días de curado. Cámara de ensayos de fluencia a flexión.

4.4.3 Comparación de los resultados

En consecuencia con los resultados obtenidos en los dos escenarios de puesta en carga de la pruebas de fluencia a flexión, se ha desarrollado una comparación entre los resultados de las dos pruebas, encontrando comportamientos que están presentando condiciones que pueden analizarse como de tendencia similar.

Las diferencias en las deflexiones elásticas instantáneas, que existen entre las plaquetas con 28 días de curado y las plaquetas con 7 días de curado, pueden ser explicadas de acuerdo con las diferencias en su módulo elástico, por el diferencial de edades en el momento de la puesta en carga, dado que aumenta su resistencia y consecuentemente su módulo con la edad del espécimen.

Se puede observar en la figura 46, que se presenta un comportamiento diferencial en el desarrollo de la deflexión por fluencia frente a cargas sostenidas en el tiempo, excepto para

las deflexiones que ocurren en los primeros días de puesta en carga, en donde el comportamiento fue similar, reflejando la fuerte incidencia de la reducción de la humedad relativa en los especímenes, hasta conseguir un posible equilibrio con el ambiente de secado. Teniendo en cuenta lo anterior, se encontró que claramente las plaquetas con 7 días de fundidas y de curadas, tienen una tendencia a producir las mayores deflexiones por fluencia de forma más acelerada hasta un punto en el tiempo, que para este caso coincidió con aproximadamente la mitad del tiempo total de la prueba, punto en el que las deflexiones se estabilizaron y su tasa de crecimiento se redujo en gran medida. De otro lado encontramos que las deflexiones por fluencia en las plaquetas con 28 días de edad y de curado, presentaron un comportamiento en donde después de encontrar el equilibrio con el ambiente de secado, la tasa de deflexión fue casi constante en el tiempo, en donde no se aprecian aceleraciones, pero tampoco ralentización de la tasa.

De lo anterior se deriva que el comportamiento está en línea con lo descrito por (Brooks, 2015) en donde se considera que existe una influencia de la edad de aplicación de carga en el concreto sobre la fluencia relativa, para especímenes cargados a temperatura ambiente se tienen mayores mediciones de fluencia relativa a menor edad y en relación con ello, a mayor edad se obtienen valores menores de fluencia relativa. Lo que es consecuente con las mayores magnitudes de deflexión por fluencia presentadas en los resultados de las plaquetas con 7 días de edad y curado.

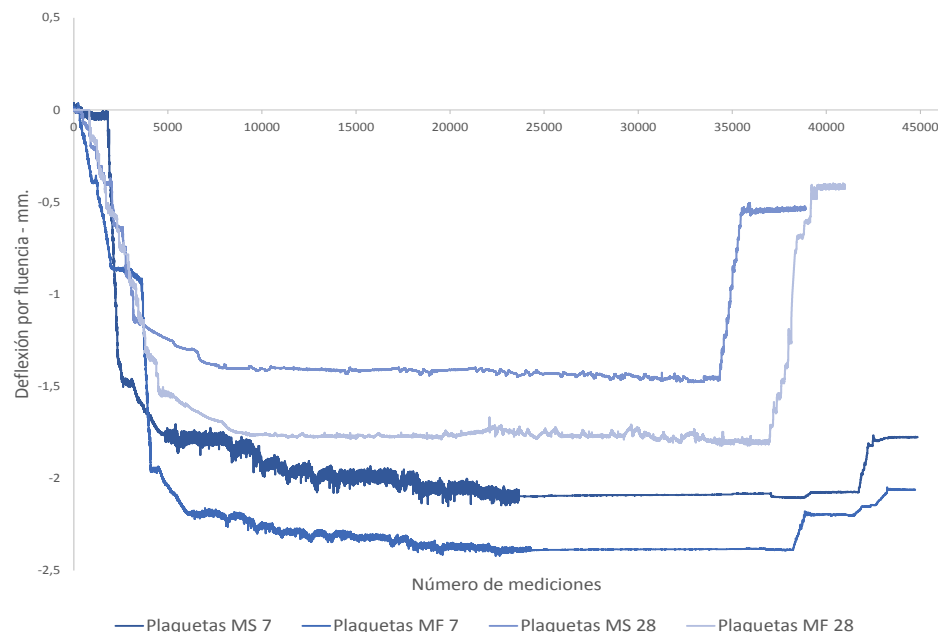


Fig. 48 Diagrama unificado de deflexiones en plaquetas con curado estándar de 7 y 28 días, dos tipos de mezcla y sometidas a esfuerzos de flexión durante 72 días.

Por último es importante mencionar la diferencia encontrada en la recuperación de la deflexión de las plaquetas en el momento de la descarga, en donde se observa que las plaquetas que se cargaron a los 28 días de edad recuperaron en promedio el 85% de su deflexión instantánea, mientras que en comparación con la deflexión recuperada por las plaquetas que se pusieron en carga con 7 días de curado, mostraron una muy pequeña recuperación, del orden del 18,5% de su deflexión instantánea. Por tanto podemos inferir que la edad de puesta en carga de las plaquetas ha dominado no solo su comportamiento frente a las deflexiones por fluencia, sino que también tiene un grado importante de responsabilidad frente a las magnitudes de las deflexiones tanto iniciales como de recuperación en el momento de la descarga, lo que de manera consecuente puede ser soportado en las diferencias de resistencia y módulo de elasticidad en el momento en el que cada uno de los especímenes fue puesto en carga, explicando las diferencias de la deflexión instantánea donde el módulo de elasticidad promedio para las plaquetas de 7 días fue de 35800 GPa mientras que para las plaquetas de 28 días fue en promedio de 43800 GPa. Así mismo en el momento de la descarga, es claro que las plaquetas de 7 días de curado lograron una ganancia de rigidez tan grande que género una recuperación mínima. En vista de que no contamos con las magnitudes de modulo elástico en el momento exacto de la descarga, nos permitimos realizar una modelación de acuerdo con las especificaciones dadas en la ACI 209 R, donde se relaciona el módulo de elasticidad con la resistencia del concreto en el momento requerido. $E = 0,43 \gamma_c^{1,5} \sqrt{f_{cmto}}$ el precesamiento de los datos nos proporciona el valor de modulo de elasticidad en promedio para las mezclas a 90 días de $E = 50075$ MPa. Lo que representa en terminos de comparación frente al modulo de elasticidad en el momento de la puesta en carga de un aumento del 12,53%, que puede relacionarse directamente con la recuperación promedio de estas plaquetas, el cual fue del 85%. Ahora realizaremos el mismo ejercicio para las plaquetas de 7 días, que por el mismo metodo de calculo nos reporta un módulo de elasticidad a 90 días de $E = 48398$ MPa. Lo que representa en terminos de comparación frente a su modulo promedio en la edad de puesta en carga de un 26% de ganancia de modulo y consecuentemente de rigidez, lo que explica el bajo porcentaje de recuperación de la deflexión.

En la tabla 6, se puede observar las magnitudes de cada una de las deflexiones medidas en las plaquetas que han sido objeto del ensayo.

Tabla 6 Cálculo de la deflexión por fluencia

| | DEFLEXIÓN POR FLUENCIA EN UHPC | | | |
|-----------------------|--------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| | PLAQUETAS MS 28 | PLAQUETAS MF 28 | PLAQUETAS MS 7 | PLAQUETAS MF 7 |
| Deflexión instantánea | -1,154 | -1,534 | -1,494 | -1,954 |

| | | | | |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Deflexión última | -1,456 | -1,803 | -2,053 | -2,387 |
| Deflexión permanente | -0,538 | -0,422 | -1,777 | -2,062 |
| Deflexión por fluencia | -0,302 | -0,269 | -0,560 | -0,433 |

4.4.4 Predicción de la deflexión por fluencia según el Euro código – 2.

Como parte fundamental en la comparación de los resultados de deflexión por acción de las cargas sostenidas en el tiempo, es importante realizar la predicción de dicha deflexión o flecha, de modo que se pueda aportar un nivel de precisión que pueda llegar a tener el método escogido. Entendiendo que hace referencia a estimaciones aproximadas en función de algunas de las características de la mezcla, su curado, su edad y las condiciones ambientales de secado. Para cumplir este propósito se ha dispuesto realizar la predicción de la flecha producida por cargas sostenidas mediante la metodología propuesta por el Euro código – 2, obteniendo resultados interesantes que se describirán más adelante.

Condiciones para predecir la deflexión por fluencia según EC-2

Coeficiente de fluencia

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta_c(t - t_0)$$

Coeficiente básico de fluencia

$$\varphi_0 = \varphi_{HR} \beta(f_{cm}) \beta(t_0)$$

Coeficiente de influencia de la humedad relativa

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \left(\frac{1 - HR/100}{0,1 * \sqrt[3]{e}} \right) * \alpha_1 \right] * \alpha_2$$

Factor de resistencia del concreto

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{ck} + 8}}$$

Factor de edad de carga

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + t_0^{0,2}}$$

Función de fluencia en el tiempo

$$\beta_c(t - t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{\beta_H + (t - t_0)} \right]^{0,3}$$

$$\beta_H = 1,5[1 + (0,012 * HR)^{18}]e + 250$$

$$\leq 1500 * \alpha_3$$

$$\alpha_1 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,7} \quad \alpha_2 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,2} \quad \alpha_3 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,5}$$

Cálculo simplificado de flecha

$$y_{tot} = y_{inst} + y_{diferida} = y_{inst} * (1 + \varphi(t, t_0))$$

Tabla 7 Cálculo de la predicción de la deflexión por fluencia

| | Inicial | Final | Inicial | Final | Inicial | Final | Inicial | Final |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | MS 28 | MS 28 | MF 28 | MF 28 | MS 7 | MS 7 | MF 7 | MF 7 |
| fc | 110,630 | 119,060 | 104,740 | 111,220 | 93,720 | 117,515 | 86,940 | 110,032 |
| t0= | 28,000 | 28,000 | 28,000 | 28,000 | 7,000 | 7,000 | 7,000 | 7,000 |
| t= | 28,000 | 90,000 | 28,000 | 90,000 | 7,000 | 79,000 | 7,000 | 79,000 |
| $\alpha_1 =$ | 0,447 | 0,424 | 0,464 | 0,445 | 0,502 | 0,428 | 0,529 | 0,449 |
| $\alpha_2 =$ | 0,794 | 0,783 | 0,803 | 0,794 | 0,821 | 0,785 | 0,834 | 0,795 |
| $\alpha_3 =$ | 0,562 | 0,542 | 0,578 | 0,561 | 0,611 | 0,546 | 0,634 | 0,564 |
| HR | 0,500 | 0,500 | 0,500 | 0,500 | 0,500 | 0,500 | 0,500 | 0,500 |
| $\sqrt[3]{e} =$ | 1,396 | 1,396 | 1,396 | 1,396 | 1,396 | 1,396 | 1,396 | 1,396 |
| $\varphi_{RH} =$ | 2,066 | 1,973 | 2,139 | 2,059 | 2,298 | 1,989 | 2,413 | 2,073 |
| $\beta(f_{cm}) =$ | 1,542 | 1,490 | 1,582 | 1,539 | 1,666 | 1,500 | 1,724 | 1,546 |
| $\beta(t_0) =$ | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,635 | 0,635 | 0,635 | 0,635 |
| e = | 2,718 | 2,718 | 2,718 | 2,718 | 2,718 | 2,718 | 2,718 | 2,718 |
| $\beta_H =$ | 254,078 | 254,078 | 254,078 | 254,078 | 254,078 | 254,078 | 254,078 | 254,078 |
| Chequeo | 843,702 | 813,284 | 867,100 | 841,461 | 916,662 | 818,615 | 951,734 | 845,991 |
| $\beta_c(t - t_0) =$ | 0,000 | 0,613 | 0,000 | 0,613 | 0,000 | 0,636 | 0,000 | 0,636 |
| $\varphi_o =$ | 1,557 | 1,436 | 1,653 | 1,548 | 2,429 | 1,893 | 2,641 | 2,034 |
| $\varphi(t, t_0) =$ | 0,000 | 0,881 | 0,000 | 0,949 | 0,000 | 1,203 | 0,000 | 1,293 |
| $y_{inst} =$ | 0,398 | 0,398 | 0,484 | 0,484 | 0,525 | 0,525 | 0,545 | 0,545 |
| $y_{tot} =$ | 0,398 | 0,749 | 0,484 | 0,943 | 0,525 | 1,156 | 0,545 | 1,249 |

La predicción de la deflexión por fluencia según el euro código – 2, se rige por parámetros básicos como la edad del espécimen en el momento de puesta en carga, la humedad relativa y la resistencia del concreto.

Como se puede observar en la figura 47, existen comportamientos muy similares diferencias muy importantes, tanto para las deflexiones de fluencia de los concretos con 28 días de edad, como para los concretos con 7 días, con respecto a la predicción de la fluencia por el método escogido. Describiendo de forma cercana el comportamiento de la deflexión frente a las deflexiones previstas por el EC-2.

Revisando el comportamiento de los concretos curados por 28 días, evidenciamos una importante similitud en el porcentaje de deflexión alcanzado para los primeros 28 días de secado, en comparación con lo establecido en el procesamiento de datos del EC-2, en donde para los primeros 28 días de secado se debe llegar al 85% de la deflexión y de acuerdo con los datos obtenidos, las muestras llegan al 86% a dicha edad. Sin embargo, es importante resaltar que la similitud reportada esta expresada en porcentajes. Las magnitudes de la deflexión en éste concreto, son en promedio el 72% de las estimadas por el método de predicción. No obstante lo anterior, el orden de magnitudes reportado es inverso al establecido por la predicción, en donde las mezclas fluidas presentan mayores deflexiones que las mezclas secas según la predicción y los resultados de la medición de las deflexiones en los especímenes da como resultado que las deflexiones son menores en las mezclas fluidas. Para poder generar una conexidad entre los resultados obtenidos y los esperados por el EC-2, es necesario hacer mención de dos probables causas para las diferencias en magnitud con respecto a lo esperado y en el orden de acuerdo al tipo de mezcla, en donde en primer lugar para intentar explicar las diferencias en las magnitudes, es necesario hacer referencia a que la predicción no toma en cuenta si el concreto tiene o no fibras y el uso de ellas puede modificar el comportamiento frente a las deflexiones con respecto a concretos que no tengan fibras en la mezcla. En segundo lugar, es posible que para las mezclas fluidas el mayor porcentaje de cemento este representando una mayor adherencia con las fibras y esto puede potencializar las menores deflexiones en este tipo de mezcla (59% de la predicción), encontrando de esta manera dos variables que deberán ser tenidas en cuenta para generar una predicción más precisa.

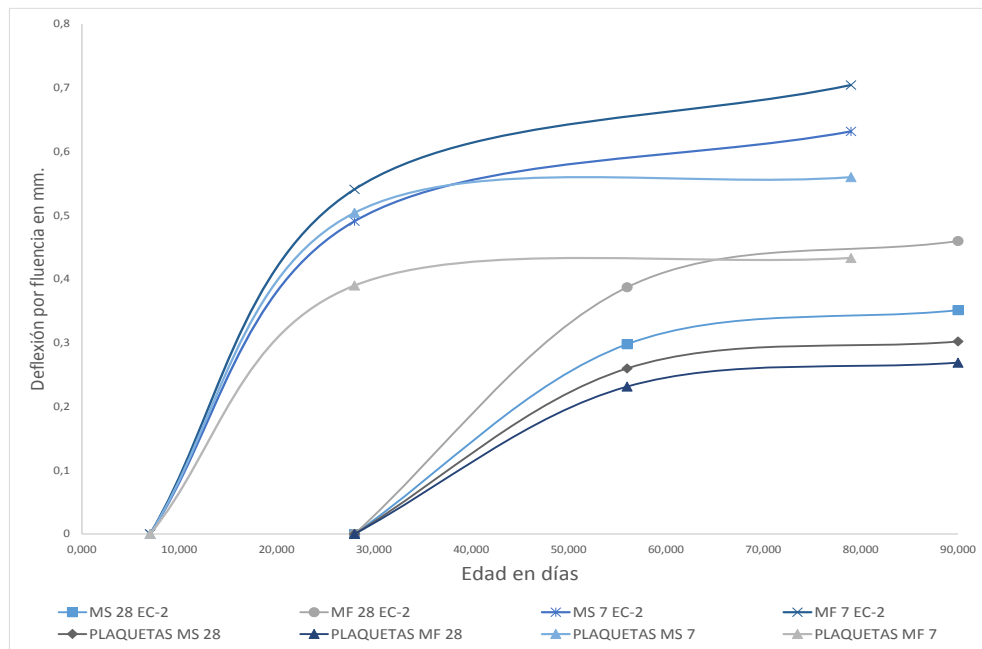


Fig. 49 Diagrama de comparación entre las deflexiones calculadas por el método del Eurocodigo – 2 y las mediciones reales de deflexión por fluencia en plaquetas de 7 y 28 días de curado..

De otro lado, para las mezclas con curado de 7 días, encontramos que su comportamiento se diferencia un poco más que la mezcla anterior. La predicción de la deflexión para los primeros 21 días de secado según el EC-2, debe estar en un 77% de su deflexión total mientras que los resultados obtenidos, muestran que para esta misma condición de secado el porcentaje alcanzado de deflexión corresponde al 90% en los dos tipos de mezcla, mostrando así, una diferencia significativa en el comportamiento real frente al esperado. Las magnitudes de deflexión encontradas son en promedio el 75% de las previstas por el EC-2, lo que puede explicarse por las dos variables encontradas y descritas en el párrafo anterior, que hacen referencia a la variación del comportamiento del concreto por la inclusión de fibras y a la mayor cantidad de cemento de las mezclas fluidas.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES, APORTES Y PROPUESTAS DE NUEVAS INVESTIGACIONES

5.1 Conclusiones

En el presente trabajo de investigación, se han analizado las propiedades mecánicas, de permeabilidad y de deformaciones a largo plazo en concretos de ultra alto desempeño elaborados con materiales locales, mediante el desarrollo de ensayos que permitieron evaluar las condiciones expuestas, lo cual genera las siguientes conclusiones.

- Los concretos de ultra alto desempeño, permiten el incremento de resistencias a compresión asociadas a la alta capacidad de empaquetamiento de los materiales utilizados en los diseños.
- El aporte de resistencia a flexión en concretos de ultra alto desempeño se incrementa notablemente, basado en el aporte de las fibras metálicas y su unión con la mezcla de concreto dentro de la matriz.
- Una geometría 1:1 en los moldes de las mezclas, genera un incremento de resistencia a compresión a causa de la distribución uniforme de los esfuerzos en toda su sección.
- Las fibras metálicas generan un mayor aporte en la resistencia a la flexión en elementos esbeltos, lo cual se evidencia en la adquisición de resistencia después de la aparición de fisuras.
- La baja permeabilidad en concretos de ultra alto desempeño puede incrementar la durabilidad de los elementos debido a la restricción en el ingreso de agentes nocivos dentro de la matriz.
- Los concretos de ultra alto desempeño desarrollados con materiales colombianos, muestran aumentos considerables de las propiedades mecánicas frente a los concretos convencionales. Particularmente se resalta que el aumento de resistencia a la compresión es proporcional al aumento de la resistencia a la flexión, incluso en proporciones mayores a las de los concretos convencionales, fenómeno atribuido al aporte de las fibras metálicas, las cuales conducen a un comportamiento dúctil de los elementos fabricados con éste material.
- El curado en concretos de ultra alto desempeño no es relevante en la adquisición de resistencias finales teniendo en cuenta la baja permeabilidad de los elementos fabricados con este material.
- La baja relación agua cemento de las mezclas de concreto contribuye a que parte del material cementante presente en la mezcla no reaccione, por tanto, se genera la necesidad de reemplazar parte del cemento con materiales llenantes que permitan reducir el costo de fabricación y comercialización del producto.

- La evaluación de la retracción en ambiente de intemperie, muestra que su comportamiento respecto a las muestras ubicadas en ambiente de laboratorio, es más variable entre una medición y otra, demostrando la influencia que tienen los cambios de humedad y temperatura en el comportamiento de la retracción.
- De acuerdo a los resultados obtenidos, se infiere que cuando las condiciones ambientales son muy variables, como es el caso de las muestras que estuvieron expuestas al ambiente de intemperie, la retracción se acelera en los especímenes llegando al 100% de su retracción total en los primeros 28 días de medición independiente del tiempo de curado. También se concluye que las mezclas que tienen el mayor porcentaje de cemento, presentan la mayor retracción.
- Las deflexiones diferidas producidas por fluencia, muestran un patrón de comportamiento en los primeros días de puesta en carga, en donde para ambientes de secado con un diferencial del 50% con respecto al ambiente de curado, se presentan tasas aceleradas de deflexión, hasta llegar a un punto que se interpreta como de equilibrio con el ambiente de secado, punto, a partir del cual, dependerá de la edad del espécimen la tasa incremental de las deflexiones.
- El comportamiento de los especímenes fundidos con concreto de ultra alto desempeño frente a las deflexiones diferidas producidas por fluencia, nos permiten concluir que su comportamiento está fuertemente influenciado por la edad del espécimen en el momento de la puesta en carga, en donde dicha variable no solo afecta la magnitud de la deflexión por fluencia, que es mayor en las probetas más jóvenes, sino que conduce a modificar las velocidades en las que se dan las deflexiones, permitiendo mostrar tasas prácticamente constantes de ganancia de deflexión por fluencia en elementos cuya puesta en carga se da después de los 28 días de edad y después de encontrar el equilibrio de humedad con el ambiente de secado, a diferencia de las tasas aceleradas de ganancia de deflexión por fluencia percibidas en los primeros 28 días de carga en las plaquetas que se cargaron con 7 días de edad.
- De acuerdo a la comparación realizada frente al cálculo simplificado de flecha, propuesto por el euro código – 2, se concluye que las condiciones que se estiman para predecir las deflexiones como la edad del espécimen, la resistencia del concreto y la humedad relativa, son significativas en el comportamiento frente a este tipo de esfuerzos, más no necesariamente involucran todas las variables que los pueden afectar, en consecuencia, es importante tener en cuenta elementos constituyentes en la mezcla que pueden afectar de manera importante el comportamiento de las plaquetas, como es el caso de las fibras de acero y la cantidad de cemento, que directamente aportan mejoras en la resistencia a la flexión y por tanto se plantea que su interacción con la matriz del elemento disminuye las deflexiones por fluencia.

5.2 Aporte original del trabajo de grado

Revisando el estado del arte, donde se han estudiado temas similares a los abordados en el presente trabajo de investigación, es de resaltar los siguientes aportes de la investigación.

- El ensayo de retracción, se evalúa en condiciones controladas de temperatura y humedad, así como en condiciones sin control alguno. Esto genera un amplio espectro de información que permite el análisis detallado del comportamiento del material.
- Se realizó la comparación de las retracciones obtenidas en la presente investigación con las propuestas en normas y otras investigaciones, argumentando los resultados y hallazgos en el análisis de datos de las mezclas respecto a lo establecido en las normas actuales.
- Se elaboró un montaje para la toma de deflexiones producidas por cargas constantes a lo largo de 62 días. Para esto se constituyeron apoyos y la aplicación de cargas puntuales en el centro de la luz, las cuales producen deflexiones que son tomadas mediante instrumentación en tiempo real mediante software y lvdtd.

5.3 Recomendaciones para futuras investigaciones

A continuación se presentan varios temas que pueden ser desarrollados en futuras líneas de investigación, los cuales son producto de hallazgos evidenciados en el trabajo de grado.

- Se debe revisar las dosificaciones de las mezclas de concreto, con el objeto de reemplazar material cementante por material de llenado, lo cual reduce el costo de producción y no incide en las propiedades mecánicas de las mezclas. Lo anterior, teniendo en cuenta que en el ensayo de tracción indirecta se evidencia la alta cantidad de cemento que no reaccionó.
- Se recomienda realizar el análisis de la utilización de diferentes tamaños y formas de fibras metálicas en las mezclas, lo cual permite mejorar las características a flexión de las muestras, así como la manejabilidad de las mezclas ante la utilización de diferentes tipos de fibras.
- Emplear tratamientos térmicos a las muestras en condición de no curado, lo cual permite analizar el incremento o disminución de resistencia, dado que la baja permeabilidad impide un aumento considerable de resistencias en el proceso de curado con humedad relativa al 100%.
- Teniendo en cuenta que el ensayo de permeabilidad no permitió la toma de lecturas por la baja penetración, se recomienda realizar un secado previo en horno a los cilindros, lo cual permitirá establecer el ingreso de agua a la muestra mediante la toma de pesos antes y después del ensayo, toda vez que este procedimiento se ejecutó sin

secar los cilindros previamente y al final, donde el peso final de los cilindros fue menor al inicial, evidenciando pérdida de humedad durante el ensayo.

- Se recomienda realizar el ensayo de penetración al agua bajo presión con variación de la presión en el tiempo de ensayo, lo cual puede generar lecturas interesantes en el análisis de permeabilidad de las muestras.
- En los ensayos de retracción, se sugiere estudiar el comportamiento de los prismas desde el día 1 de fundida, basado que la retracción autógena de las muestras ocurre en las primeras 22 horas de edad, presentando lecturas cercanas al 50% de la retracción final de los elementos.

REFERENCIAS

- Abbas, Safeer, Ahmed M. Soliman, y Moncef L. Nehdi. 2015. «Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages». *Construction and Building Materials* 75 (enero): 429-441. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.11.017.
- Acker, Paul. 2004. «Why Does Ultrahigh-Performance Concrete (UHPC) Exhibit Such Low Shrinkage and Such Low Creep?». *ACI Special Publication* 220. <http://www.concrete.org/Publications/InternationalConcreteAbstractsPortal.aspx?m=details&i=13155>.
- Aldea, C.-M., S. P. Shah, y A. Karr. 1999. «Permeability of Cracked Concrete». *Materials and Structures* 32 (5): 370-76. doi:10.1007/BF02479629.
- ARANGO CAMPO, SAMUEL EDUARDO. 2010. «FLUENCIA A FLEXIÓN DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO (SFRC) EN ESTADO FISURADO». <http://riunet.upv.es/handle/10251/8508>.
- Barrera, Martha Luz Salcedo. 2006. *Concreto de alto desempeño en Colombia*. Univ. Nacional de Colombia. <http://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=NXgivJMCzIMC&oi=fnd&pg=PT6&dq=Concreto+De+Alto+Desempe%C3%B1o+En+Colombia&ots=EYqzIUSwKy&sig=HOSjFhsrimICc6OAKBEGma2YUso>.
- Benjamin Graybeal. 2015. «Ultra-High Performance Concrete-- | Federal Highway Administration». Accedido marzo 23. <http://www.fhwa.dot.gov/research/resources/uahpc/publications.cfm>.
- Brooks, Jeffrey. 2014. *Concrete and Masonry Movements*. Butterworth-Heinemann.
- Bui, Le Anh-tuan, Chao-lung Hwang, Chun-tsun Chen, Kae-long Lin, y Meng-ying Hsieh. 2012. «Manufacture and performance of cold bonded lightweight aggregate using alkaline activators for high performance concrete». *Construction and Building Materials* 35: 1056-62.
- CRUZ, Civil RICARDO, y Civil FABIAN BLANCO. 2015. «MEDICION DE LA RETRACCIÓN Y EL FLUJO PLASTICO DEL CONCRETO EN LA UIS». Accedido abril 20. <http://www.planospara.com/planos4/creep-de-concreto-8500.doc>.
- De Guzmán, Diego Sánchez, y Asociación Colombiana de Productores de Concreto. 2002. *Durabilidad y patología del concreto*. ASOCRETO.
- Duarte Gómez, Noemí. 2010. «Cálculo simplificado de flechas instantáneas y diferidas en elementos a flexión de hormigón armado», mayo. <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/12326>.
- El-Dieb, Amr S. 2009. «Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers». *Materials & Design* 30 (10): 4286-92.
- El-Dieb, A. S., y R. D. Hooton. 1995. «Water-permeability measurement of high performance concrete using a high-pressure triaxial cell». *Cement and Concrete Research* 25 (6): 1199-1208. doi:10.1016/0008-8846(95)00112-P.

- González, Nicolás, Jesús Castaño, Yezid Alvarado, y Isabel Gasch. 2014. «Influencia Del Volumen de Fibras Y Curado Posterior Sobre El Comportamiento Post - Fisura de Un Concreto de Ultra Alto Desempeño». *Revista Ingeniería de Construcción* 29 (3): 220-33. doi:10.4067/S0718-50732014000300001.
- Graybeal, Benjamin A. 2006. «Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete», agosto. <http://trid.trb.org/view.aspx?id=798080>.
- Graybeal, Benjamin A., y Joseph L. Hartmann. 2003. «Strength and durability of ultra-high performance concrete». En *Concrete Bridge Conference, Portland Cement Association*. http://www.ductal.com/20-FHWA._Strength_and_Durability._UHPC.pdf.
- Güneyisi, Erhan, Mehmet Gesoğlu, Seda Karaoğlu, y Kasım Mermerdaş. 2012. «Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes». *Construction and Building Materials* 34 (septiembre): 120-30. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.02.017.
- Habel, Katrin, Marco Viviani, Emmanuel Denarié, y Eugen Brühwiler. 2006. «Development of the mechanical properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC)». *Cement and Concrete Research* 36 (7): 1362-70. doi:10.1016/j.cemconres.2006.03.009.
- Kameche, Z.A., F. Ghomari, M. Choinska, y A. Khelidj. 2014. «Assessment of liquid water and gas permeabilities of partially saturated ordinary concrete». *Construction and Building Materials* 65: 551-65. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.137.
- Lura, P., K. Van Breugel, TU Delft: Civil Engineering and Geosciences, y TU Delft, Delft University of Technology. 2003. «Autogenous Deformation and Internal Curing of Concrete». Delft University Press. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:1a1efc2d-a638-4787-b543-5bd643a39a4b>.
- Máca, Petr, Radoslav Sovják, y Tomáš Vavřiník. 2013. «Experimental Investigation of Mechanical Properties of UHPFRC». *Procedia Engineering, CONCRETE AND CONCRETE STRUCTURES 2013 - 6th International Conference, Slovakia*, 65: 14-19. doi:10.1016/j.proeng.2013.09.004.
- Magureanu, Cornelia, Ioan Sosa, Camelia Negrutiu, y Bogdan Heghes. 2012. «Mechanical properties and durability of ultra-high-performance concrete». *ACI Materials Journal* 109 (2). <http://www.concrete.org/Publications/InternationalConcreteAbstractsPortal.aspx?m=details&i=51683704>.
- Marí, Antonio R., Jesús M. Bairán, y Noemi Duarte. 2010. «Long-term deflections in cracked reinforced concrete flexural members». *Engineering Structures* 32 (3): 829-42. doi:10.1016/j.engstruct.2009.12.009.
- «Mechanical Properties and Durability of Ultra-High-Performance Concrete». 2012. *ACI Materials Journal* 109 (2). doi:10.14359/51683704.
- Müller, Harald S., Michael Haist, y Michael Vogel. 2014. «Assessment of the sustainability potential of concrete and concrete structures considering their environmental impact, performance and lifetime». *Construction and Building Materials* 67: 321-37.
- Park, Sang-Soon, Seung-Jun Kwon, Sang Hwa Jung, y Sang-Woong Lee. 2012. «Modeling of water permeability in early aged concrete with cracks based on micro pore

- structure». *Construction and Building Materials* 27 (1): 597-604. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.002.
- Ranaivomanana, Narintsoa, Stéphane Multon, y Anaclet Turatsinze. 2013. «Tensile, compressive and flexural basic creep of concrete at different stress levels». *Cement and Concrete Research* 52 (octubre): 1-10. doi:10.1016/j.cemconres.2013.05.001.
- Rapoport, Julie, Corina-Maria Aldea, Surendra P. Shah, Bruce Ankenman, y Alan Karr. 2002. «Permeability of cracked steel fiber-reinforced concrete». *Journal of materials in civil engineering* 14 (4): 355-58.
- Richard, Pierre, y Marcel Cheyrezy. 1995. «Composition of reactive powder concretes». *Cement and concrete research* 25 (7): 1501-11.
- Rossi, Pierre, Antonio Arca, Edouard Parant, y Patricia Fakhri. 2005. «Bending and compressive behaviours of a new cement composite». *Cement and Concrete Research* 35 (1): 27-33. doi:10.1016/j.cemconres.2004.05.043.
- Sabet, Fereshteh Alsadat, Nicolas Ali Libre, y Mohammad Shekarchi. 2013. «Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash». *Construction and Building Materials* 44: 175-84.
- Serna Ros, Pedro, López Martínez Juan Ángel, y Esteban Camacho Torregrosa. 2015. «UHPRFC: De los componentes a la estructura». Accedido abril 18. <http://www.evento.ufal.br/silamcaa/site-silamcaa/wp-content/uploads/2013/01/Serna-I-SILAMCAA-final.pdf>.
- Singh, A. P., y Dharendra Singhal. 2011. «Permeability of Steel Fibre Reinforced Concrete Influence of Fibre Parameters». *Procedia Engineering*, The Proceedings of the Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction EASEC12, 14: 2823-29. doi:10.1016/j.proeng.2011.07.355.
- Tam, C.M., Vivian W.Y. Tam, y K.M. Ng. 2012. «Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong». *Construction and Building Materials* 26 (1): 79-89. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.05.006.
- Tayeh, Bassam A., BH Abu Bakar, MA Megat Johari, y Yen Lei Voo. 2012. «Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete overlay». *Construction and Building Materials* 36: 538-48.
- Tazawa, Ei-ichi. 1999. *Autogenous Shrinkage of Concrete*. CRC Press.
- Teng, Susanto, Tze Yang Darren Lim, y Bahador Sabet Divsholi. 2013. «Durability and mechanical properties of high strength concrete incorporating ultra fine Ground Granulated Blast-furnace Slag». *Construction and Building Materials*, Special Section on Recycling Wastes for Use as Construction Materials, 40 (marzo): 875-81. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.052.
- Wang, Chong, Changhui Yang, Fang Liu, Chaojun Wan, y Xincheng Pu. 2012. «Preparation of ultra-high performance concrete with common technology and materials». *Cement and Concrete Composites* 34 (4): 538-44.
- Wang, Wei, Jian Liu, Franck Agostini, Catherine A. Davy, Frédéric Skoczylas, y Dominique Corvez. 2014. «Durability of an ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPRFC) under progressive aging». *Cement and Concrete Research* 55: 1-13.

- Yoo, Doo-Yeol, Jung-Jun Park, Sung-Wook Kim, y Young-Soo Yoon. 2013. «Early age setting, shrinkage and tensile characteristics of ultra high performance fiber reinforced concrete». *Construction and Building Materials* 41 (abril): 427-38. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.12.015.
- Yu, R., P. Spiesz, y H. J. H. Brouwers. 2015. «Development of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC): Towards an efficient utilization of binders and fibres». *Construction and Building Materials* 79 (marzo): 273-82. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.01.050.
- Yu, R., Przemek Spiesz, y H. J. H. Brouwers. 2014. «Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC)». *Cement and Concrete Research* 56: 29-39.