



FACULTAD DE INGENIERÍA
Maestría en Ingeniería Civil

Trabajo de Grado

INFLUENCIA DEL PROCESO DE FABRICACIÓN SOBRE LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS CONCRETOS DE
ULTRA ALTO DESEMPEÑO (UHPC)

Presentado por:

Meylin Astrid López Villamarín
Diego Osorio Gamboa

Director:

Yezid Alexander Alvarado Vargas

Asesor:

Andrés Mauricio Núñez López

Bogotá D.C.
Junio de 2015

Aprobación

El Trabajo de grado con título “Influencia del proceso de fabricación sobre las propiedades mecánicas de los concretos de ultra alto desempeño (UHPC).”, desarrollado por los estudiantes Meylin Astrid López Villamarín y Diego Osorio Gamboa, en cumplimiento de uno de los requisitos dispuestos por la Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería civil, para optar el Título de Magister en ingeniería Civil, fue aprobado por:

Director

Yezid Alexander Alvarado Vargas

Jurado 1

Pedro Serna Ros

Jurado 2

José Gabriel Gómez Cortés

Influencia del proceso de fabricación sobre las propiedades mecánicas de los
concretos de ultra alto desempeño (UHPC)

Meylin Astrid López Villamarín

Diego Osorio Gamboa

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

Dedico a Dios este trabajo por la fortaleza, a mis padres y Miller quienes me apoyaron en todo momento. - Astrid

A Dios por la fortaleza y a mi madre por incondicional apoyo - Diego

Agradecimientos

Los autores agradecen a Yezid Alexander Alvarado por su acompañamiento incondicional, a Cementos Argos y Colciencias por el acompañamiento técnico y financiamiento, y a la Pontificia Universidad Javeriana por el apoyo técnico por la disponibilidad de sus servicios e instalaciones.

A Pedro Serna Ros y José Gabriel Gómez Cortés por su tiempo y dedicación a la evaluación del presente trabajo de grado.

Resumen

En el presente trabajo se determina la influencia de algunos tipos de curado y fabricación, sobre el desarrollo de la resistencia a la compresión, flexión, y módulo elástico de dos mezclas de concretos de ultra alto desempeño (UHPC), elaborado con materiales de fácil consecución en Colombia. La primera es una mezcla que necesita la aplicación de técnicas de acomodamiento como el vibrado para su disposición en los moldes, y la segunda es una mezcla con capacidad de autocompactabilidad. Se analizaron cuatro regímenes de curado, normal en el laboratorio, ambiente bajo cubierta, y cada una de estas con incorporación de un tratamiento de calor a 90 °C y 100% de humedad relativa. Para determinar la evolución de las propiedades mencionadas, se fallaron especímenes a 1 o 2, 7, 28 y 90 días. Los modos de fabricación fueron sin vibrar y vibrado. Se obtuvo que los curados que incluyen tratamiento de calor contribuyen a las reacciones exotérmicas de hidratación del cemento, generando una ganancia de resistencias acelerada. Por otra parte, el modo de fabricación influye en mayor medida a la mezcla no autocompactable, pues al vibrarla se obtiene una mejor acomodación en los moldes y se eliminan vacíos que permite el desarrollo de una matriz cementicia más densa.

Abstract

This study presents the influence of some types of cured and manufacturing on the development of compressive and flexural strength, and elastic modulus of two mixtures of Ultra High Performance Concrete (UHPC), made with materials easily obtained in Colombia. The first is a mixture requires the application of techniques of accommodation such as vibration, and the second is a mixture capable of self-compactability. Four regimes of curing were analyzed, under laboratory conditions, ambient under cover, and with each of these incorporating a heat treatment at 90 ° C and 100% relative humidity. To determine the evolution of the properties mentioned, specimens were tested at 1 or 2, 7, 28 and 90 days. The modes of manufacturing were without vibrating and vibrating. Was obtained that including heat treating contributes to the exothermic reactions cement hydration, generating a gain accelerated strength. Moreover, the manufacturing process further affects the mixture is not self-compacting, because the vibration eliminates gaps that allow the development of a dense matrix. .

Palabras clave

- Concreto de Ultra alto desempeño; Ultra High Performance Concrete UHPC
- Resistencia a compresión; Compressive strength
- Resistencia a flexión; Flexural strength
- Módulo de elasticidad; Modulus of elasticity
- Regímenes de Curado; Curing regimes
- Modos de fabricación; Modes of manufacturing

Síntesis

El capítulo primero incluye la introducción, donde describe la importancia del estudio de los concretos y el porqué es importante realizar un estudio de UHPC con materiales accesibles en Colombia.

El segundo capítulo relaciona el objetivo general y los objetivos específicos de esta investigación.

El capítulo tercero hace referencia al marco conceptual de los concretos de ultra alto desempeño, regímenes de curados, modos de fabricación y de las propiedades mecánicas como: resistencia a compresión, módulo elástico y resistencia a flexión. De la misma forma relaciona los estudios previos de otros autores con relación a tipos de curado y propiedades mecánicas.

El cuarto capítulo describe los materiales y métodos usados en esta investigación. Relaciona una caracterización física de los materiales componentes de la mezcla, equipos usados, definición de mezclas, y describe la metodología implementada. Describe cómo se preparó la mezcla, el tipo y cantidad de probetas usadas, modos de fabricación, curados y ensayos realizados en estado fresco y estado endurecido.

EL quinto capítulo muestra los resultados obtenidos, para la resistencia a compresión, modulo elástico y resistencia a flexión y analiza como influyó el régimen de curado y el modo de fabricación en cada una de ellas. También presenta una discusión con otros autores que analizaron estas mismas variables.

El sexto capítulo, presenta las conclusiones de esta investigación y propone algunos temas para futuras investigaciones.

El séptimo y último capítulo relaciona la bibliografía usada como referencia en esta investigación. Relaciona los diferentes autores y sus trabajos de investigación en las propiedades mecánicas de concretos de Ultra alto desempeño.

Tabla de contenido

1	INTRODUCCIÓN.....	16
2	Objetivos.....	17
2.1	Objetivo general.....	17
2.2	Objetivos específicos	17
3	ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES	18
3.1	Marco conceptual.....	18
3.1.1	UHPC	18
3.1.2	Curado	19
3.1.3	Modos de fabricación	20
3.1.4	Propiedades mecánicas.....	21
3.2	Estudios previos.....	22
3.2.1	Curado	22
3.2.2	Propiedades mecánicas de UHPC	23
4	MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
4.1	Caracterización física de materiales.....	27
4.1.1	Cemento	27
4.1.2	Arena silíceo.....	29
4.1.3	Humo de sílice.....	30
4.1.4	Reductor de agua de alto rango	31
4.1.5	Fibras metálicas.....	31
4.2	Equipos	31
4.2.1	Equipos de fabricación	32
4.2.2	Equipos para ensayos en fresco.....	33

4.2.3	Equipos para curado	34
4.2.4	Equipos para ensayos en estado endurecido	35
4.3	Definición de mezclas.....	36
4.3.1	Mezcla 1 (M1) - No autocompactable.....	36
4.3.2	Mezcla 2 (M2) - Autocompactable	37
4.4	Metodología	38
4.4.1	Preparación de la mezcla.....	38
4.4.2	Probetas	40
4.4.3	Modos de fabricación	40
4.4.4	Curados.....	41
4.4.5	Ensayos en estado fresco.....	42
4.4.6	Ensayos en estado endurecido.....	43
5	RESULTADOS Y ANÁLISIS	47
5.1	Resistencia a compresión.....	47
5.1.1	Análisis de la resistencia a compresión en edad temprana.....	48
5.1.2	Análisis de la resistencia a compresión a 28 días.....	52
5.1.3	Análisis de la resistencia a compresión a largo plazo	55
5.1.4	Relación de la resistencia a compresión entre cilindros y cubos	60
5.2	Módulo elástico.....	62
5.2.1	Análisis del módulo elástico a 7 días	63
5.2.2	Análisis del módulo elástico a 28 días	65
5.3	Resistencia a la flexión	71
5.3.1	Análisis de la resistencia a flexión a 7 días.....	72
5.3.2	Análisis de la resistencia a flexión a 28 días.....	76

5.3.3	Ductilidad	79
5.4	Comparación de propiedades mecánicas	82
6	CONCLUSIONES Y NUEVAS PROPUESTAS DE INVESTIGACIÓN	85
6.1	Conclusiones	85
6.2	Nuevas propuestas de investigación	86
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

Tabla de figuras

Figura 1. Gel cementicio.	19
Figura 2. Granulometría del cemento	28
Figura 3. Granulometría de la arena silícea	29
Figura 4. Granulometría del humo de sílice	31
Figura 5. Mezcladora planetaria	32
Figura 6. Mesa vibratoria.....	33
Figura 7. Mesa de flujo.....	33
Figura 8. Medidor para determinar el contenido de aire del concreto fresco	34
Figura 9. Cámara de laboratorio y controladores de temperatura y humedad.....	34
Figura 10. Cámara de vapor	35
Figura 11. Maquina universal.....	35
Figura 12. Instron 5900	36
Figura 13. Variables tenidas en cuenta en la metodología	38
Figura 14. Punto de reacción.	39
Figura 15. Punto de fluidez 1	39
Figura 16. Disposición de la mezcla en moldes	39
Figura 17. Resistencias a compresión en edad temprana de cilindros – M1– SV	49
Figura 18. Resistencias a compresión en edad temprana de cilindros – M1– V	49
Figura 19. Resistencias a compresión en edad temprana de cilindros – M2– SV	50
Figura 20. Resistencias a compresión en edad temprana de cilindros – M2– V	50
Figura 21. Resistencias a compresión a 28 días de cilindros – M1– SV	52
Figura 22. Resistencias a compresión a 28 días de cilindros – M1– V	53
Figura 23. Resistencias a compresión a 28 días de cilindros – M2– SV	53

Figura 24. Resistencias a compresión a 28 días de cilindros – M2– V	54
Figura 25. Resistencias a compresión a largo plazo de cilindros – M1– SV	55
Figura 26. Resistencias a compresión a largo plazo de cilindros – M1– V.....	55
Figura 27. Resistencias a compresión a largo plazo de cilindros – M2– SV	56
Figura 28. Resistencias a compresión a largo plazo de cilindros – M2– V.....	57
Figura 29. Resistencias a compresión – M1 y M2 - vibradas.....	58
Figura 30. Comportamiento de muestras vibradas y sin vibrar – M1 - Curado A y A+C .	59
Figura 31. Comportamiento de muestras vibradas y sin vibrar – M2 - Curado A y A+C .	59
Figura 32. Comportamiento de muestras vibradas y sin vibrar – M1 - Curado N y N+C .	60
Figura 33. Comportamiento de muestras vibradas y sin vibrar – M2 - Curado N y N+C .	60
Figura 34. Comparación cilindros vs Cubos – M1	61
Figura 35. Comparación cilindros vs Cubos – M2.....	62
Figura 36. Módulo elástico de especímenes no vibrados de M1 a 7 días.....	63
Figura 37. Módulo elástico de especímenes vibrados de M1 a 7 días.	64
Figura 38. Módulo elástico de especímenes no vibrados de M2 a 7 días.....	64
Figura 39. Módulo elástico de especímenes vibrados de M2 a 7 días.	65
Figura 40. Módulo elástico de especímenes no vibrados de M1 a 28 días.....	66
Figura 41. Módulo elástico de especímenes vibrados de M1 a 28 días.	67
Figura 42. Módulo elástico de especímenes no vibrados de M2 a 28 días.....	68
Figura 43. Módulo elástico de especímenes vibrados de M2 a 28 días.	68
Figura 44. Módulo elástico M1	70
Figura 45. Módulo elástico M2	70
Figura 46. Resistencia a flexión de especímenes no vibrados de M1 a 7 días.....	73
Figura 47. Resistencia a flexión de especímenes vibrados de M1 a 7 días.	73

Figura 48. Resistencia a flexión de especímenes no vibrados de M2 a 7 días.	74
Figura 49. Resistencia a flexión de especímenes vibrados de M2 a 7 días.	75
Figura 50. Resistencia a flexión de especímenes no vibrados de M1 a 28 días.	76
Figura 51. Resistencia a flexión de especímenes vibrados de M1 a 28 días.	77
Figura 52. Resistencia a flexión de especímenes no vibrados de M2 a 28 días.	78
Figura 53. Resistencia a flexión de especímenes vibrados de M2 a 28 días.	78
Figura 54. Decrecimiento de la resistencia a flexión de curados con tratamiento de calor en M1 y M2	79
Figura 55. Esfuerzo máximo de M1	80
Figura 56. Esfuerzo máximo de M2	80
Figura 57. Carga vs Desplazamiento. Especímenes de M1 curados ambiente con tratamiento térmico, 7 días	82
Figura 58. Evolución de las propiedades mecánicas de M1-SV	83
Figura 59. Evolución de las propiedades mecánicas de M1-V	83
Figura 60. Evolución de las propiedades mecánicas de M2-SV	84
Figura 61. Evolución de las propiedades mecánicas de M2-V	84

Índice de tablas

Tabla 1. Dosificaciones de UHPC propuestas por algunos autores	18
Tabla 2. Composición química del cemento	27
Tabla 3. Densidad, finura y relación agua cemento para la consistencia normal del cemento	28
Tabla 4. Tiempos de fraguado del cemento.....	29
Tabla 5. Caracterización de arena silícea	30
Tabla 6. Caracterización del humo de sílice.....	30
Tabla 7. Dosificación de la mezcla 1.....	37
Tabla 8. Dosificación de la mezcla 2.....	37
Tabla 9. Cantidad de probetas por edad, por un tipo de curado y una mezcla	40
Tabla 10. Curados por tipos de mezcla.....	40
Tabla 11. Nomenclatura probetas compresión y módulo - Mezcla 1	44
Tabla 12. Nomenclatura probetas compresión y módulo elástico - Mezcla 2.....	45
Tabla 13. Nomenclatura probetas flexión - Mezcla 1	46
Tabla 14. Nomenclatura probetas flexión - Mezcla 2	46
Tabla 15. Resistencia a compresión para cilindros, mezclas M1 y M2, SV y V.....	47
Tabla 16. Resistencia a compresión para cubos, mezclas M1 y M2, Vibrados.....	48
Tabla 17. Módulo elástico de M1	62
Tabla 18. Módulo elástico de M2.....	63
Tabla 19. Cálculo de la constante K.....	71
Tabla 20. Esfuerzo máximo a flexión de M1	71
Tabla 21. Esfuerzo máximo a flexión de M2	72
Tabla 22. Cálculo de la constante K.	81

Tabla 23. Relación de propiedades mecánicas Mezcla 1- Sin Vibrar y vibradas según tipo de curado.....	83
Tabla 24. Relación de propiedades mecánicas Mezcla 2- Sin Vibrar y vibradas según tipo de curado.....	84

1 INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción es un sector importante del desarrollo y la economía de un país, siendo el responsable de la infraestructura que satisface gran parte de las necesidades de una comunidad. El concreto es un material fundamental en dicha industria, del que ha existido una investigación continúa para el mejoramiento de sus propiedades. Como fruto de estas investigaciones se ha desarrollado el concreto del ultra alto desempeño, UHPC (por sus siglas en inglés), que con aspectos como dosificación y tratamientos de curado se genera una matriz densa y compacta con una estructura de poros discontinua que incrementan las prestaciones de las propiedades mecánicas y de durabilidad.

Colombia es considerado como un país en vía de desarrollo, que desde el año 2000 al 2013 ha presentado un incremento promedio del 7.4% en la inversión del sector de la construcción, representando un incremento del 4.4% del PIB. Por lo anterior se espera que en los próximos años esta actividad continúe con un dinamismo similar (ANDI 2013). Para responder al dinamismo de la construcción, en Colombia se producen cerca de 9 millones de toneladas de cemento anualmente (Sectorial 2013), lo que hace necesario una búsqueda e investigación de materiales más competentes que brinden soluciones a las obras a desarrollar en el país. Caso particular es el UHPC, que puede ser utilizado en infraestructura vertical como rascacielos, tableros y vigas de puentes, losas para vías e incluso con fines arquitectónicos como en fachadas (Concretarq 2014). Pero para que éste llegue a hacer parte de la cotidianidad de la construcción colombiana, es necesario realizar una investigación que permita ver la influencia de variables como la dosificación de sus componentes, el proceso de fabricación y el curado al que se someta, en el desarrollo de sus propiedades mecánicas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Determinar la influencia del régimen de curado y el proceso de fabricación en el desarrollo de la resistencia a compresión, flexión y el módulo elástico para concretos de ultra alto desempeño (UHPC) fabricados con materiales accesibles en Colombia.

2.2 Objetivos específicos

- Evaluar la influencia de la variación de los procesos de fabricación sobre la resistencia a compresión, flexión y módulo elástico del UHPC.
- Evaluar la influencia de las condiciones de curado sobre la resistencia a compresión, flexión y módulo elástico del UHPC.

3 ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES

3.1 Marco conceptual

3.1.1 UHPC

El desarrollo de la tecnología del concreto y la demanda de materiales de construcción de alta resistencia, dan impulso al desarrollo del concreto de ultra alto desempeño, UHPC por sus siglas en inglés. Éste material se define como un compuesto cementicio con una gradación optimizada de materiales granulares finos (menores a 1 mm de diámetro), relación agua-cemento menor de 0.28, aditivo súper plastificante reductor de agua (HRWRA) y un porcentaje de fibras discontinuas. En la Tabla 1 se muestran algunas dosificaciones propuestas por diferentes autores: (Ranade, Li, Stults, Heard, & Rushing, 2013), (Habel, Viviani, Denarié, & Brühwiler, 2006), (Wang, Yang, Liu, Wan, & Pu, 2012)

Tabla 1. Dosificaciones de UHPC propuestas por algunos autores

Material	(Ranade, Li, Stults, Heard, & Rushing) kg/m ³	(Habel, Viviani, Denarié, & Brühwiler) kg/m ³	(Wang, Yang, Liu, Wan, & Pu) kg/m ³
Cemento	907	1050	810
Humo de sílice	353	275	90
Arena silícea	635	730	616
Agua	189	190	162
HRWRA	16	35	18
Fibras	190	470	200

El UHPC tiene una estructura de poros discontinua que reduce la entrada de líquidos, mejorando significativamente las propiedades mecánicas y de durabilidad, comparado con concretos convencionales y de alto desempeño (FHWA, 2013). Adicionalmente para la fabricación de UHPC Wang, Yang, Liu, Wan, & Pu (2012), proponen las siguientes premisas:

1. El agregado grueso debe ser eliminado para mejorar la homogeneidad del concreto.
2. Inclusión de fibras de acero para mejorar la ductilidad de los concretos.

3. Uso de súper plastificantes y grandes cantidades de agregado superfino añadidos con humo de sílice y cuarzo, para lograr una baja relación agua-cemento lo cual reduce la porosidad y mejora la resistencia a la compresión.
4. Curado con vapor para obtener una mayor resistencia.

3.1.2 Curado

El curado del concreto hidráulico es el proceso en el que el cemento se hidrata, haciendo que el concreto madure y desarrolle propiedades de endurecimiento en presencia de agua y calor suficiente. Curar el concreto también hace referencia a diferentes tipos de técnicas y métodos que permiten garantizar condiciones de temperatura y humedad para la hidratación adecuada del cemento. La hidratación se refiere a la reacción del cemento con agua o cuando participa en otra reacción puzolánica. El curado tiene una influencia directa en las propiedades del concreto endurecido como la del desarrollo de sus propiedades mecánicas, permeabilidad, entre otras (ACI Committee 308, 1994).

En el proceso de hidratación del cemento se presentan reacciones químicas y físicas. Producto de estas reacciones es la formación del gel cementicio que se ubica aleatoriamente en la parte exterior de las partículas de cemento parcialmente hidratadas, como se observa en la Figura 1. Dicho gel aumenta la fuerza de unión entre las partículas y hace que la porosidad disminuya. El agua necesaria para producir el gel cementicio y llenar los microporos generados por éste, es decir para llevar a cabo estrictamente la hidratación del cemento, es alrededor de entre 0.21 y 0.28 en proporción al peso del cemento (Kosmatka S, 1988).

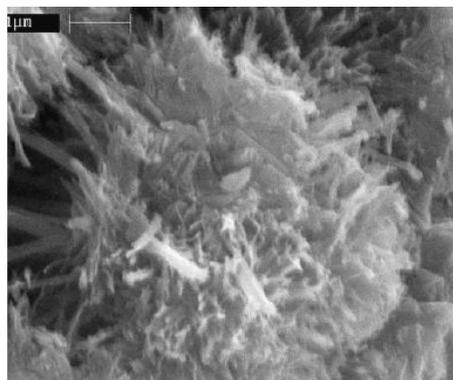


Figura 1. Gel cementicio.
Fuente: (ACI Committee 308, 1994)

Para UHPC, como los que se trabajan en esta investigación, se utiliza el agua necesaria para producir las reacciones de hidratación en el cemento, es decir relaciones agua cemento son considerablemente bajas. El UHPPC es un concreto especial, desde el punto de vista de sus componentes, modo de fabricación, que requiere técnicas de curado que garanticen la máxima hidratación de sus materiales aglomerantes, para desarrollar sus propiedades mecánicas de la mejor manera posible. Autores como Graybeal & Baby (2013), Garas, Kurtis, & Kahn (2012), Magureanu, Sosa, Negrutiu, & Heghes (2012), en sus investigaciones distinguen tres tipos de curado que se muestran en los siguientes apartados:

3.1.2.1 Curado normal:

Consiste en la disposición de las probetas en condiciones de laboratorio, es decir 23 °C y 95±5% de HR, como punto de comparación con resultados de laboratorio donde convencionalmente se usa este tipo de curado.

3.1.2.2 Curado ambiente:

Este tipo de curado consiste en la exposición al ambiente de las probetas. Lo anterior con el fin de simular que el concreto es vertido in situ en una obra común.

3.1.2.3 Curado con tratamiento de calor:

Este curado consiste en disponer el espécimen después de 24 horas de fabricado a temperatura de hasta 90 °C y humedad relativa (HR) de 95±5%, durante un tiempo mínimo de 24 horas. Este curado también es considerado como acelerado, ya que el incremento de temperatura ayuda al calor de hidratación natural generado por las reacciones de hidratación del cemento, permitiendo un estado de endurecimiento rápido.

3.1.3 Modos de fabricación

El proceso consiste en someter el concreto fresco, inmediatamente después de ser vertido en los moldes, a vibraciones que permiten un acomodamiento y movilización de las partículas. Con este procedimiento la mezcla adquiere una consistencia más fluida que permite ocupar los espacios de manera uniforme y llenar los lugares pequeños de la matriz. Estos modos están pensados fundamentalmente para conocer la influencia de la disposición

de la mezcla autocompactante y la no autocompactante, ya que las plantas de prefabricados cuentan con los equipos necesarios para garantizar un buen acomodamiento de la mezcla en los diferentes moldes, a diferencia del vertimiento in situ que se haría en una obra convencional, con restricciones para garantizar un buen vibrado

3.1.4 Propiedades mecánicas

3.1.4.1 Resistencia a compresión

La resistencia a la compresión es una de las principales propiedades mecánicas del concreto y se define como el esfuerzo máximo que puede soportar el concreto bajo una carga de aplastamiento. Diferentes factores pueden afectar la resistencia a compresión, tales como: contenido de cementantes, relación agua cemento, adherencia pasta-agregado, contenido de aire y tamaño de los agregados. La resistencia se calcula dividiendo la máxima carga soportada por la probeta para producir una fractura, entre el área promedio de la sección.

El proceso de adquisición de resistencia, inicia con el fraguado final del concreto y va aumentando con el tiempo. Comúnmente y según normativas a nivel mundial, es reconocido medir la resistencia a compresión a los 28 días, sin embargo para conocer su evolución a lo largo del tiempo en investigación, es común hacer medición a los 1-7-28-90 y hasta 360 días.

3.1.4.2 Módulo elástico

El módulo elástico del concreto es una propiedad mecánica que indica su capacidad de deformación dentro del rango elástico. Según la NTC 4025 es la pendiente calculada hasta el 0.45 de la máxima resistencia a compresión del concreto (f'_c), del diagrama Esfuerzo vs Deformación unitaria. En normativas como la NSR-10, ACI y el CEB para el cálculo estructural se proponen ecuaciones en función de f'_c , que varían de acuerdo al origen de los agregados y el peso unitario del concreto.

Los materiales y su dosificación afectan el módulo elástico obtenido, porque de ellos depende la estructura de la matriz cementicia – agregados. Para el caso particular del UHPC, la microestructura y específicamente la interfaz fibra-matriz es la principal responsable del módulo elástico. Lo anterior porque es en ésta, donde se transmiten los

esfuerzos traccionales que permiten una mayor deformación del material gracias a la adherencia fibra-matriz.

3.1.4.3 Resistencia a flexión

La resistencia a flexión del concreto es una medida de su resistencia a esfuerzos de tracción producidos por un momento flector. En concretos convencionales generalmente está entre el 10% y el 20% de la resistencia a la compresión (NRMCA). Al ser una propiedad mecánica del concreto que presenta resultados bajos respecto a las solicitaciones estructurales, en el diseño no es considerada como un aporte para tomar esfuerzos de tracción. Por tal motivo en las estructuras de concreto el material que asume éstos esfuerzos es el acero. Sin embargo, el desarrollo tecnológico del concreto y la implementación de nuevos materiales, ha permitido obtener resistencias a la flexión considerables. Fibras de acero, fibra de vidrio, polímeros de diferentes longitudes y formas son usadas para mejorar la resistencia a flexión del concreto, en este caso del UHPC. La incorporación de fibras al concreto, aumenta la ductilidad del UHPC, debido a que los esfuerzos de tracción son transmitidos de una parte de la matriz cementicia a otra por la adherencia de la fibra con ésta, permitiendo una mayor deformación evitando una falla frágil del elemento.

3.2 Estudios previos

3.2.1 Curado

En investigaciones realizadas en diferentes lugares del mundo, se ha analizado la influencia del curado sobre las propiedades mecánicas del UHPC. En (2005) Benjamín Graybeal en su tesis doctoral, realizó una amplia campaña experimental donde propuso cuatro tipos de curado. El primero fue un curado con vapor, el cual consistió en someter los especímenes a 90 °C y HR 95% a las 24 horas de fabricados y durante 48 horas. El segundo consistió en disponer los especímenes a 23°C y 95%HR. El tercero fue un curado similar al primero, con la diferencia que la temperatura del tratamiento de vapor fue a 60 °C. Finalmente un cuarto curado con vapor retrasado, el cual consistió en someter a las mismas condiciones de temperatura y humedad relativa del primer curado con vapor, pero iniciando el día 15 después de la fabricación de los especímenes. Graybeal (2005) obtuvo resistencias a

compresión a los 28 días de 193, 126.17, 171, 171 MPa para cada uno de los curados respectivamente y un módulo elástico de 52.4, 42.7, 51.0, 50.3 GPa, para los mismos curados.

Jianzhong & Wei en (2008) realizaron un estudio donde sometieron varios tipos de dosificaciones de UHPC unicamente a curado normal. Teniendo resultados de resistencia a la compresión entre 143 y 211 MPa, y módulos elásticos entre 54.7 y 58.4 GPa dependiendo de la dosificación empleada.

En (2012) Garas, Kurtis, & Kahn, para una sola dosificación de UHPC trabajaron tres tipos de curados. El primero consistió en que después de 48 horas de fabricados los especímenes se sometieron a 90 °C y HR 100% durante 48 horas. En el segundo curado los especímenes se sometían a 60 °C y HR 100% durante 72 horas, después de 48 horas de fabricados. Y un tercer curado, normal con temperatura de 23 °C y HR 100%. En esta investigación la edad de falla fue 7 días, alcanzando resistencias a compresión de 169, 148, 116 MPa y módulos elásticos 47.9, 50.9, 44.9 GPa para cada uno de los curados respectivamente.

Magureanu, Sosa, Negrutiu, & Heghes en el (2012), estudiaron las diferentes propiedades mecánicas y de durabilidad de una mezcla de UHPC, proponen dos curados hasta los primeros 6 días, uno a 90 °C de temperatura y 80% de HR, y otro con 20 °C de temperatura y 68% de HR. Pasados estos 6 días las probetas fueron expuestas a un curado en piscina de 20°C a ciclos de congelamiento y descongelamiento hasta el día 371 después de haberse fabricado los especímenes. Los mejores valores de resistencia a la compresión, se obtuvieron con el curado con calor, 90°C, llegando a 179 MPa.

Otros autores como (Graybeal & Baby, 2013) trabajaron en diferentes investigaciones con curados con vapor, con el objetivo de analizar su influencia en propiedades mecánicas, como la tracción directa, durabilidad, permeabilidad.

3.2.2 Propiedades mecánicas de UHPC

3.2.2.1 Resistencia a compresión

(Bingöl & Tohumcu, 2013) expusieron muestras de concreto a diferentes tipos de curado: aire, aire + tratamiento de calor 20 ± 2 °C y 55% HR, curado en agua con tres duraciones 3,

7 y 28 días y curado con vapor a tres temperaturas 60°C, 70°C, 80°C en cuatro tipos de periodos, 4h,8h,12h y 16h. También modificaron las proporciones de las mezclas de ceniza volante, Humo de sílice y superplastificante. Obtuvieron que para curado con vapor el mejor desempeño lo tuvo el 55% de ceniza volante sometido a 70°C por 16 horas.

Benammar, Mezghiche, & Guettala (2013), indican que una mayor temperatura, aumenta el desarrollo de la resistencia en edad temprana, pero que también puede aparecer un impacto negativo en la resistencia después de los 7 días. Relacionan su hipótesis con una rápida hidratación inicial que puede conducir a la formación de partículas hidratadas, pero tener una estructura física menos compacta, acarreado una menor resistencia en comparación con un tratamiento hidratado lentamente

En (2008) Graybeal & Davis, estudiaron seis tipos de probetas de cubos y cilindros e investigaron la influencia del tipo de molde en la resistencia a compresión. Así mismo usaron tres tipos de diseños de mezcla modificando las proporciones de los componentes y siete regímenes de curado. Obtuvieron resistencias a compresión a 28 días, superiores a 200 MPa para moldes cubos y tratamiento de calor. También encontraron mayores resistencias para cubos en comparación con los cilindros.

3.2.2.2 Módulo elástico

Ahlborn, Harris, Misson, & Peuse (2011) realizaron ensayos de módulo elástico a cilindros de 3 pulgadas de alto y 6 pulgadas de diámetro, siguiendo la ASTM C469 a 3, 7, 14 y 28 días para especímenes que estuvieron en dos tipos de curado. El primero en condiciones ambientales, el segundo con vapor 100% HR y 90 °C, iniciando a las 48 horas de haber fabricado los especímenes y durante 48 horas. Para el curado ambiente obtuvieron que el módulo elástico se estabilizó a partir de los 14 días con una media de 54.000 MPa. Para los tratamientos con vapor el resultado se incrementó un 3.8% respecto al curado ambiente, y fue el mismo desde los 3 hasta los 28 días.

Garas, Kurtis, & Kahn (2012) presentaron en su estudio los resultados de módulo elástico para cilindros sometidos a tres curados. El primero a condiciones estándar de laboratorio, 23°C y 100% HR, el segundo a 60°C y 100% HR desde las 48 horas durante 126 horas, y el último a 90 °C y 100% HR desde las 48 horas de fabricados los especímenes durante 48

horas. Encontraron que el tratamiento térmico aumenta el módulo elástico, pero una temperatura más elevada no quiere mayores resultados. Los resultados fueron 44.900, 50.870 y 47.950 MPa respectivamente para los curados anteriormente mencionados.

En el estudio presentado por Zhang, Liu, Yuan, & Mang (2015) se describe un modelo matemático de elementos finitos, utilizado para predecir el módulo elástico con énfasis en la zona interfaz matriz fibra. Dicho modelo fue validado con resultados experimentales que no difirieron más del 3.7%.

3.2.2.3 Resistencia a la flexión

Magureanu, Sosa, Negrutiu, & Heghes en el (2012) realizaron una caracterización mecánica del UHPC para determinar la resistencia a la flexión y la influencia de la inclusión de fibras metálicas, con longitudes de 25, y 6 mm, y diámetro 0.4, 0.175 mm . Fabricaron dos tipos de prismas, el primero con medidas 40 x 40 x 160 mm y el segundo de 100 x 100 x 300 mm. Encontraron que con una adición de 2.55% de fibra del volumen del concreto, se logra aumentar poco más del 140% en resistencia a flexión con respecto a los especímenes que no contienen fibras, llegando a 34 MPa. Adicionalmente la resistencia a la flexión de los elementos con menores dimensiones fueron aproximadamente 1.47 veces mas altas que los prismas con mayores dimensiones.

En (2013), Kamal, Safan, Etman, & Salama, investigaron la influencia de las fibras sobre la resistencia a la flexión en vigas de 150 x 100 x 1000 mm reforzadas con acero longitudinal y transversal. Estudiaron dos tipos de fibras, metálicas y poliméricas, encontrando que las fibras metálicas fueron mas eficientes. Lo anterior representado en un 13% superior de la carga última soportada por las fibras poliméricas.

Ghafari, Costa, & Júlio en (2014) trabajaron con fibras metálicas de dos tamaños. Unas fibras pequeñas de 0.15 mm de diámetro y 10 mm de longitud, y unas fibras de mayor tamaño con 0.2mm de diámetro y 13 mm de longitud. Los resultados obtenidos en resistencia a flexión permitieron sugerir el uso de fibras híbridas, pequeñas y grandes, en porcentajes de 2.5% y 1% con relación al volumen del concreto para cada tipo de fibra. Esto permitió obtener resistencias a flexión de hasta 42 MPa. En este mismo año (Banthia, Majdzadeh, Wua, & Bindiganavile (2014) trabajaron con tres tipos de fibras, dos de ellas

metálicas y una de celulosa, donde la diferencia es la resistencia a la tracción directa. Realizaron varias combinaciones con estas fibras, encontrando que el mejor desempeño para la resistencia a la flexión, se obtiene trabajando con fibras metálicas de mayor resistencia a la tracción (1.200 MPa) y fibras de celulosa. Ambos tipos de fibras en una dosificación del 0.5% del volumen del concreto.

4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Caracterización física de materiales

Los materiales que se utilizaron para fabricar UHPC en esta investigación fueron cemento, arena silícea, humo de sílice, reductor de agua de alto rango y fibras metálicas, todos estos de fácil consecución en la sabana de Bogotá- Colombia.

El cemento fue fabricado en una planta en Sogamoso, Boyacá de tipo concretero, con un promedio de diámetro de sus partículas de 8 μm . Con el fin de obtener un concreto de alta compacidad y homogeneidad se optó trabajar con arena de origen silíceo de gradación entre 100 y 600 μm . Así mismo con el fin de ofrecer una mejor compacidad y obtener reacciones puzolánicas que aumentan la resistencia a compresión a largo plazo, se trabajó con humo de sílice densificado. El UHPC tuvo una relación agua/cemento inferior a 0.28 según recomendaciones de FHWA (2013). Así mismo para obtener una buena manejabilidad se trabajó con un hiperplastificante, reductor de agua de alto rango de última tecnología y se añadieron fibras metálicas cortas, de diámetro 0.2 mm y una longitud de 13 mm, con las cuales se buscó un comportamiento dúctil.

4.1.1 Cemento

El cemento con el que se trabajó fue tipo concretero de la planta Sogamoso Boyacá. A este se le realizaron ensayos químicos y físicos descritos a continuación. En la Tabla 2 se observa la composición química del cemento.

Tabla 2. Composición química del cemento

Componente químico	Nombre del componente	% en el cemento
LOI	Perdida por calcinación	3,53
SiO ₂	Oxido de silicio	20,90
Al ₂ O ₃	Alúmina	4,78
Fe ₂ O ₃	Óxido de hierro	3,31
CaO	Óxido de calcio	63,63
MgO	Óxido de magnesio	0,87

Componente químico	Nombre del componente	% en el cemento
SO ₃	Óxido de azufre	2,34
NaO ₂	Óxido de sodio	0,13
K ₂ O	Óxido de potasio	0,76
Cr ₂ O ₃	Óxido de cromo	0,02
MnO	Óxido de manganeso	0,04
P ₂ O ₅	Óxido de fosforo	0,27
TiO ₂	Óxido de titanio	0,30

Según la NTC 121, este cemento cumple con los estándares exigidos para estar en el mercado colombiano.

En la Figura 2, se muestra la granulometría del cemento, la cual está dentro de los límites de un cemento común de uso concretero, con partículas entre 5 y 30 μm .

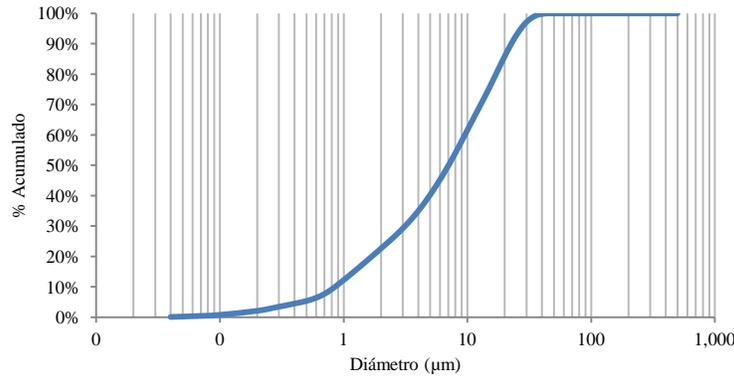


Figura 2. Granulometría del cemento

Tomando como base la norma NTC 221 para la determinación de la densidad, NTC 597 para la finura, NTC 112 para la relación agua cemento para una consistencia normal del cemento y la INV-E 323 para obtener la resistencia del cemento hidráulico, en la Tabla 3 Se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3. Densidad, finura y relación agua cemento para la consistencia normal del cemento

Ensayo	Resultado
Densidad	3.08 g/cm ³
Finura	4808 cm ² /g
Relación agua/cemento para una consistencia normal	0.282
Resistencia del cemento	45 MPa

El último ensayo de caracterización del cemento fue la determinación de los tiempos de fraguado, los cuales se determinan mediante la medición de las penetraciones del aparato de Vicat en el tiempo, como lo muestra la Tabla 4. El tiempo de fraguado inicial es de 136 min y el final es de 195 min.

Tabla 4. Tiempos de fraguado del cemento

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

4.1.2 Arena silícea

Para esta investigación se trabajó con una arena silícea proveniente de la sabana de Bogotá, con una granulometría entre 100 y 400 μm como se observa en la Figura 3, similar a la encontrada en bibliografía (FHWA, 2013), (Graybeal & Baby, 2013), (Magureanu, Sosa, Negrutiu, & Heghes, 2012), entre otros.

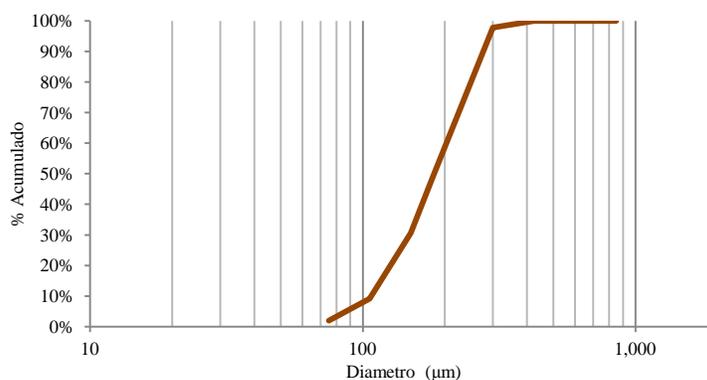


Figura 3. Granulometría de la arena silícea

Adicional a la caracterización granulométrica, se realizaron los ensayos que se encuentran relacionados en la Tabla 5.

Tabla 5. Caracterización de arena sílicea

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

4.1.3 Humo de sílice

El humo de sílice es un aditivo en polvo, color gris que adicionado al concreto hace un aporte a las propiedades mecánicas y de durabilidad. El humo de sílice es un reactivo puzolánico, es decir, reacciona con el hidróxido de calcio (portlandita) produciendo silicatos de calcio, incrementando la resistencia y durabilidad. Adicionalmente las partículas más finas del humo de sílice se ubican en los espacios de las partículas de cemento, lo que genera un concreto más denso y menos permeable. En la Tabla 6 se muestra la caracterización del humo de sílice realizada por los fabricantes, la cual cumple con los requerimientos de la ASTM C-1240.

Tabla 6. Caracterización del humo de sílice
 Nota: Tomado de la ficha técnica del producto EUCON MSA

Ensayo	Resultado
Peso específico	2.25 g/cm ³
Tamaño promedio de partícula	0.2-0.5 μm
Color	Gris claro
Superficie específica	15-30 cm ² /g
Contenido de SiO ₂	1.50 g/cm ³

El humo de sílice tiene una baja densidad, lo que hace que al empacarlo requiera mayor volumen, haciendo su transporte inviable. Por esta razón los fabricantes de este material tienen dos formas de comercialización. La primera es suspendido en agua, conocido como “Slurry”, y la segunda es de forma densificada, con aire a presión o comprimido mecánicamente. En la Figura 4 se muestra la granulometría del humo de sílice densificado con el que se trabajó en esta investigación.

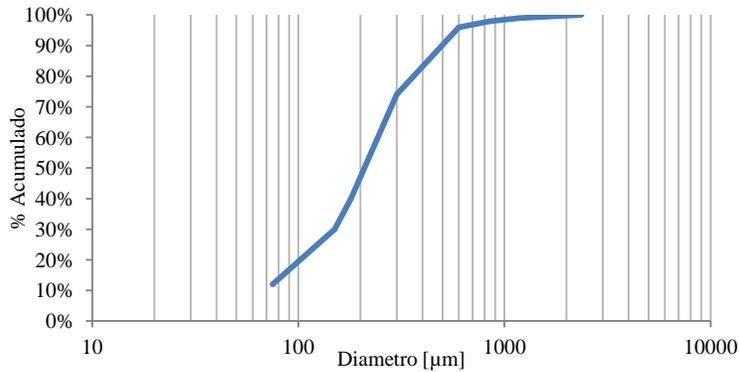


Figura 4. Granulometría del humo de sílice

4.1.4 Reductor de agua de alto rango

Se trabajó con un aditivo reductor de agua de alto rango, denominado HRWR (por sus siglas en inglés), High Range Water Reductor. Dicho aditivo está compuesto por éteres policarboxílicos modificados, los cuales son adsorbidos en la superficie de las moléculas de cemento hidratadas. Esta adsorción de partículas genera una interacción electrostática temporal que hace resbalar las partículas de cemento entre sí (Puertas & Vázquez, 2001).

4.1.5 Fibras metálicas

Para garantizar una transferencia de esfuerzos en la matriz que permitiera un comportamiento dúctil, a las dosificaciones de UHPC trabajadas en esta investigación se les incorporó fibras metálicas con un recubrimiento en cobre, para prevenir la oxidación. Dichas fibras tienen un diámetro de 0.2 mm, una longitud de 13 mm, y una densidad es de 7650 kg/m^3 .

4.2 Equipos

Para la realización de este proyecto se utilizaron cuatro tipos de equipos. El primero corresponde a los elementos para la fabricación de las mezclas y las diferentes muestras. El segundo tipo de equipos son para realizar ensayos en estado fresco. El tercero son los equipos utilizados para realizar los curados. Finalmente el cuarto tipo son los equipos para la evaluación del concreto en estado endurecido.

4.2.1 Equipos de fabricación

4.2.1.1 Balanza

Equipo marca Chyo modelo MU-30K, usado para la dosificación de los materiales según la mezcla a fabricar. Su unidad de medida es el gramo (g).

4.2.1.2 Mezcladora planetaria

Para mezclar el UHPC se utilizó una mezcladora Domat MP-0100 planetaria con un motor de 5.5 Hp y capacidad de mezclado de 0.10 m³. Ésta consta de tres brazos de mezcla y uno periférico, fabricados con una aleación entre acero, hierro y grafito. El brazo periférico es su eje principal y gira a 25 revoluciones por minuto. En la Figura 5 se muestra una fotografía del equipo usado



Figura 5. Mezcladora planetaria

4.2.1.3 Mesa vibratoria

En la Figura 6 se muestra la mesa vibratoria usada para la fabricación de especímenes vibrados. La vibración se hizo con una frecuencia de 1 Hz.



Figura 6. Mesa vibratoria

4.2.2 Equipos para ensayos en fresco

4.2.2.1 Mesa de flujo, Mini Slump

La mesa de flujo de la Figura 7, fue utilizada para realizar los ensayos de manejabilidad de las mezclas. Consta de un soporte, una plataforma circular de 255 ± 2.5 mm de diámetro y 7.63 mm de espesor, un árbol que le permite realizar 25 caídas en 15 segundos y un recipiente cónico con diámetro superior de 70 ± 0.5 mm y diámetro inferior de 100 ± 0.5 mm. Lo anterior especificado en la norma I.N.V. E – 325 – 07.



Figura 7. Mesa de flujo

4.2.2.2 Medidor de contenido de aire

En la Figura 8, se muestra el medidor utilizado para la medición del contenido de aire del concreto en estado fresco. Esto consiste en determinar el cambio de volumen del concreto sometido a un cambio de presión. Este método se hace siguiendo la NTC 1032.



Figura 8. Medidor para determinar el contenido de aire del concreto fresco

4.2.3 Equipos para curado

4.2.3.1 *Cámara de laboratorio*

Este equipo es un cuarto cerrado herméticamente, donde se garantiza una temperatura de 23°C y una humedad relativa de 95±5% mediante aspersores de agua. En la Figura 9 se muestra la cámara y su sistema de control de temperatura y humedad usada en el laboratorio.



Figura 9. Cámara de laboratorio y controladores de temperatura y humedad

4.2.3.2 *Cámara de vapor*

Cámara usada para llevar a cabo el tratamiento de calor. Sus dimensiones son 1.8m de largo, 0.8m de ancho y 0.6m de profundo. Posee una resistencia inmersa en agua que puede alcanzar hasta 110 °C, lo que genera un vapor de curado dentro de la cámara, que garantiza las condiciones de temperatura y humedad relativa propuestas. En la Figura 10 se muestran algunos especímenes dentro de la cámara mencionada.



Figura 10. Cámara de vapor

4.2.4 Equipos para ensayos en estado endurecido

4.2.4.1 *Maquina universal*

Este equipo cuenta con una prensa accionada por un sistema hidráulico que aplica cargas controladas a determinadas velocidades. En la máquina de la Figura 11 se realizaron los ensayos de resistencia a compresión en cubos, resistencia a compresión en cilindros y determinación de modulo elástico, según las normas NTC 220, NTC 673 y NTC 4025 respectivamente.



Figura 11. Maquina universal

4.2.4.2 *Instron 5900*

Este equipo cuenta con un bastidor (ver Figura 12) que es el encargado de aplicar la fuerza dependiendo del ensayo realizado. Adicionalmente para los ensayos que se realizaron en este equipo se usaron dos extensómetros *instron* de alta precisión.



Figura 12. Instron 5900

4.3 Dosificación de mezclas

En la presente investigación se definieron dos mezclas a trabajar basadas en las posibles aplicaciones que puedan tener. El parámetro de diferenciación de dichas mezclas es la manejabilidad. En primera medida se estableció la “Mezcla 1”, o una mezcla no autocompactable, es decir que requiere técnicas de colocación como el vibrado. Dicha mezcla está pensada fundamentalmente para la fabricación de elementos prefabricados, ya que en las plantas de prefabricación cuentan con los equipos necesarios para garantizar un buen acomodamiento de la mezcla en los diferentes moldes. Por otra parte, la “Mezcla 2” es considerada como una mezcla autocompactable, lo que quiere decir que tiene la capacidad de fluir libremente en el molde, acomodándose de la mejor manera. Para esta mezcla se piensan aplicaciones de vertimiento in situ, pues gracias a su capacidad de autocompactabilidad facilitaría los procesos constructivos.

4.3.1 Mezcla 1 (M1) - No autocompactable

Esta es una mezcla que requiere la aplicación de técnicas de acomodación como el vibrado. Para establecer el carácter no autocompactable de la mezcla se midió el flujo estático y dinámico (ensayos explicados en metodología), donde se obtuvo un diámetro de 124 mm y de 198 mm respectivamente. Para la fabricación de esta mezcla se utilizaron 900 kg por m³. En la Tabla 7 se muestran los volúmenes de cada material dentro de la mezcla.

Tabla 7. Dosificación de la mezcla 1

Material	Volumen dentro de la mezcla
Cemento	0,29
Humo de sílice	0,09
Arena	0,34
Agua	0,23
Aditivo	0,03
Fibra	0,02

4.3.2 Mezcla 2 (M2) - Autocompactable

La mezcla 2 (M2) es una mezcla autocompactable, lo que quiere decir que tiene la propiedad de consolidarse por su propio peso y sin generar segregación, asegurando la homogeneidad del concreto endurecido (Rodríguez, 2006).

Para esta mezcla los valores de manejabilidad obtenidos en el mini slump son: diámetro inicial 214 mm y diámetro final 240 mm, el cual es igual al diámetro total de la mesa de flujo. Estos valores coinciden con los propuestos por autores como (Dils, Boel, & De Schutter, 2013) y (Yu, Spiesz, & Brouwers, 2015), quienes proponen mezclas autocompactables a partir de 200 mm de diámetro inicial.

Para la fabricación de M2 se utilizaron 1000 kg de cemento por m³. En la Tabla 8 se muestran los volúmenes de cada material dentro de la mezcla.

Tabla 8. Dosificación de la mezcla 2

Material	Volumen dentro de la mezcla
Cemento	0,32
Humo de sílice	0,05
Arena	0,32
Agua	0,26
Aditivo	0,03
Fibra	0,02

4.4 Metodología

Definidas las proporciones de los componentes de cada una de las mezclas descritas anteriormente, se realizó la preparación de la mezcla teniendo en cuenta el número de probetas a ensayar de acuerdo al tipo de moldes, modo de fabricación y tipo de curado. Seguido a esto se realizaron los ensayos en estado fresco, y después de fundidas las muestras se sometieron a cada uno de los regímenes de curado establecidos. Finalmente se realizaron los ensayos en estado endurecido de acuerdo con la edad programada. Las variables tenidas en cuenta en esta metodología, se encuentran relacionadas en la Figura 13 y descritas a continuación:

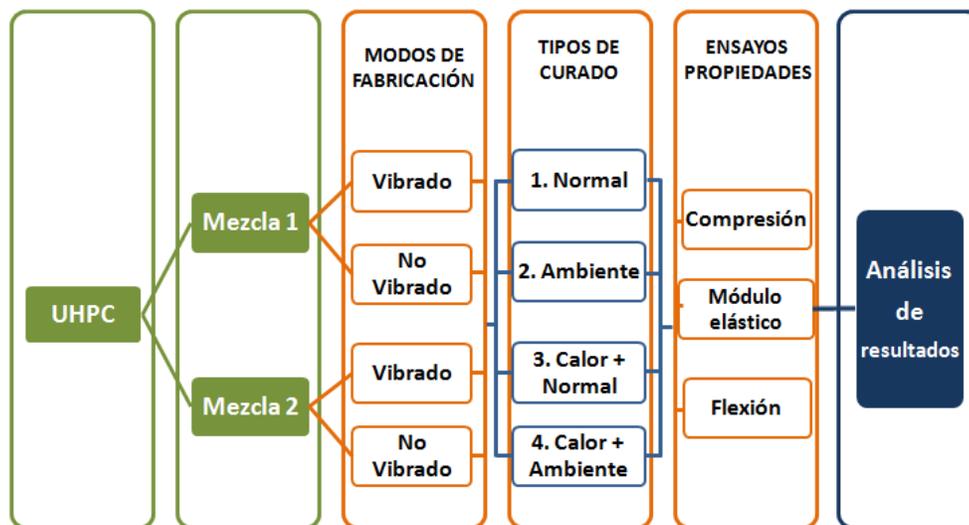


Figura 13. Variables tenidas en cuenta en la metodología

4.4.1 Preparación de la mezcla

Se pesaron en la balanza las cantidades necesarias de cada material. Luego haciendo uso de la mezcladora planetaria previamente humedecida, y teniendo como referente a Dils, Boel, & De Schutter (2013) que recomienda primero mezclar únicamente los materiales secos, se incorporaron los materiales cementantes (cemento y humo de sílice). Éste mezclado se realizó durante 1 minuto. A continuación se incorporó el agua y el aditivo, que fueron previamente mezclados en un recipiente. Esta mezcla se realizó hasta observar un primer punto de reacción, donde se forman unas pequeñas esferas brillantes tal como se observa en la Figura 14. El tiempo promedio del primer punto de reacción para M1 fue 6 minutos y

para M2 fue 2:30 minutos. Posteriormente se tomó el tiempo donde la mezcla empezó a presentar un punto de fluidez 1, que se caracteriza por que la muestra se ve completamente homogénea y húmeda, este punto se observó cuando al pasar las aspas de la mezcladora, la mezcla tenía la capacidad de auto llenarse nuevamente tal como se observa en la Figura 15.



Figura 14. Punto de reacción.



Figura 15. Punto de fluidez 1

El punto de fluidez 1 para M1 fue en promedio a los 11:40 min y para M2 a los 5:10 minutos. Luego se agregó la arena y se determinó el tiempo de fluidez 2 que tiene las mismas características de tiempo de fluidez 1 pero con la arena incluida, para M1 fue en promedio a los 21:30 minutos y para M2 a los 13:30 minutos. Finalmente se incorporaron las fibras y se determinó un punto de tiempo final, donde la mezcla presentó suficiente fluidez y manejabilidad. El tiempo final de mezcla para un volumen de 70 litros fue de 32 minutos para M1 y 22 minutos para M2. Terminada la mezcla, se dispuso en los diferentes moldes como se observa en la Figura 16.



Figura 16. Disposición de la mezcla en moldes

4.4.2 Probetas

La elaboración de probetas se realizó con tres tipos de moldes:

- Cilindros: Diámetro 7.62 cm (3”) y altura 15.24 cm (6”), usados para ensayos de resistencia a compresión a 1 o 2, 7, 28 y 90 días y módulo de elasticidad 7 y 28 días.
- Cubos: 5 cm x 5 cm x 5 cm, para ensayos de resistencia a compresión a 1 ó 2, 7, 28.
- Vigas: 5 cm x 5 cm x 30 cm, usados para ensayos de flexión a 7 y 28 días

Por cada ensayo a las diferentes edades, se tienen 3 muestras, de las cuales se saca un promedio y desviación estándar. En total se realizaron ensayos a 468 muestras. En la Tabla 9 se relacionan la cantidad de probetas por edad, por tipo de curado y por mezcla. En la Tabla 17 se relacionan los tipos de curado para cada mezcla.

Tabla 9. Cantidad de probetas por edad, por un tipo de curado y una mezcla

Edad - Días	Tipo de ensayo	# Probetas a ensayar	Molde
1 ó 2	Compresión	6	Cilindros
		3	Cubos
7	Compresión	6	Cilindros
		3	Cubos
	Módulo Elástico	6	Cilindros
		6	Vigas
28	Compresión	6	Cilindros
		3	Cubos
	Módulo Elástico	6	Cilindros
90	Flexión	6	Vigas
		6	Cilindros
	Compresión	3	Cubos

Tabla 10. Curados por tipos de mezcla

Mezcla	Curado			
	Ambiente	Normal	Ambiente + Calor	Normal + Calor
M1	Ambiente	Normal	Ambiente + Calor	Normal + Calor
M2	Ambiente	Normal	Ambiente + Calor	Normal + Calor

4.4.3 Modos de fabricación

Una vez fabricadas cada una de las mezclas y realizados los ensayos en estado fresco, (descritos en los siguientes apartados), se vertió la mezcla en moldes cilíndricos, cúbicos y en vigas, identificando cuáles serían sometidos a cada modo de fabricación: vibrado y sin vibrar.

4.4.3.1 Vibrado

Para las probetas cilíndricas que se serían vibradas se vertió la mezcla en dos capas iguales, que fueron vibradas durante 15 segundos a una frecuencia de 1 Hz cada una. Después de vibrada la última capa, se enrasaron los moldes y se sometieron a cada uno de los tipos de curado. Cuando las muestras requerían ser vibradas, pero estas debían fundirse en moldes cúbicos o vigas, se hizo el vertimiento de la mezcla en una sola capa y se colocaron sobre la mesa vibratoria durante 30 segundos, donde finalmente se enrasaron y se sometieron a cada uno de los tipos de curado.

4.4.3.2 No vibrado

Se fabricaron probetas cilíndricas y vigas, vertiendo el concreto en los moldes y dejando que este se acomodara libremente, enrasándolos al final para lograr una superficie adecuada. Posteriormente se sometieron a los diferentes regímenes de curado.

4.4.4 Curados

Una vez fundidas las probetas y aplicado el correspondiente modo de fabricación (vibrado y sin vibrar), se dispusieron en los diferentes tipos de curados. Éstos fueron determinados después de una revisión de literatura de autores como Magureanu, Sosa, Negrutiu, & Heghes (2012), Graybeal B. A., (2005), Garas, Kurtis, & Kahn, (2012). Finalmente se definen los siguientes tipos de curado: Normal, Temperatura Ambiente, Normal + Calor y Ambiente + Calor.

4.4.4.1 Normal (N):

Las probetas fundidas se dispusieron en la cámara de curado hasta el desmolde, que se produjo aproximadamente 24 horas después de fabricados. Inmediatamente retirado el molde, las probetas se ingresaron nuevamente a la cámara de curado hasta la edad de falla. El curado normal hace referencia al sometimiento de las probetas a una temperatura de 23°C y una humedad cercana al 95%±5%, garantizado por la cámara de curado del laboratorio de estructuras.

4.4.4.2 Ambiente (A):

Las probetas fabricadas fueron ubicadas en el patio de mezclas, bajo cubierta. Las condiciones ambientales fueron en promedio 14.20 ° C y 70.6 % de HR teniendo una temperatura máxima de 23.7 °C y mínima 7.28 °C, según datos suministrados por la estación meteorológica de la Universidad Javeriana ubicada en la ciudad de Bogotá. En este espacio permanecieron las probetas desde que los moldes son enrasados hasta la edad de falla de cada probeta, realizando el desmolde a las 24 horas de fundidas.

4.4.4.3 Normal + Calor (N+C):

Una vez enrasadas las probetas, se ubicaron en la cámara de curado durante 24 horas, luego se desmoldaron y se sometieron al tratamiento con calor en la cámara climática durante 24 horas con temperatura máxima de 90 °C y 100% de HR. Este tratamiento incluye 2 horas de aumento de temperatura, de 23 °C a 90 °C, luego 20 horas totales de temperatura constante a 90 ° C y 100% humedad relativa, y después 2 horas de la disminución de temperatura de 90 °C hasta 23 °C. Finalizado el tratamiento con calor, las probetas se trasladaron nuevamente a la cámara de curado Normal hasta la edad de falla.

4.4.4.4 Ambiente + Calor (A+C):

Este tipo de curado es similar al Normal+ calor. Después que las probetas fueron enrasadas se expusieron a condiciones ambiente bajo cubierta durante 24 horas, luego se desmoldaron y se dispusieron durante otras 24 horas al tratamiento con calor en la cámara climática con temperatura máxima de 90 °C y 100% HR. Las 2 primeras horas se aumentó la temperatura de 23 °C a 90 °C, luego las probetas estuvieron durante 20 horas con temperatura constante a 90 °C y 100% humedad relativa y después a 2 horas de disminución de temperatura de 90 °C hasta 23 °C. Finalmente los especímenes fueron expuestos a condiciones ambientales hasta la edad de falla de las probetas.

4.4.5 Ensayos en estado fresco

Para estudiar el comportamiento en estado fresco de la mezcla, se realizaron ensayos de contenido de aire, flujo libre o mini slump estático y flujo dinámico o mini slump dinámico. El primero consiste en la medición del cambio de volumen del concreto sometido

a un cambio de presión, y se realiza según la NTC 224. El aparato utilizado tiene un recipiente, donde se vierte el concreto y se tapa de manera hermética, además consta de un tubo graduado y un manómetro que permite medir el cambio volumétrico donde el aire es reemplazado por agua.

El segundo ensayo en estado fresco es el mini slump estático, usado para medir la manejabilidad autónoma de cada mezcla. Este ensayo se realiza en la mesa de flujo descrita en el apartado de equipos para estado fresco, y consiste en llenar el cono con concreto, enrasar y levantar el cono para que el concreto fluya libremente sobre la mesa. Luego se mide la extensión final del diámetro, que será el flujo inicial de la mezcla. El ensayo tercero es el mini slump dinámico, que consiste en aplicar 25 caídas a la mesa de flujo durante 15 segundos, recién se ha medido el flujo estático. Esto proporciona un nuevo diámetro, que será la medida de flujo dinámico de la mezcla.

4.4.6 Ensayos en estado endurecido

Para evidenciar la influencia que tiene la composición, la forma de fabricación y el curado en las propiedades mecánicas del UHPC, se plantean tres tipos de ensayos: Resistencia a compresión, Módulo elástico y Resistencia a flexión.

4.4.6.1 Resistencia a compresión:

Se realizaron ensayos de resistencia a compresión de probetas cilíndricas con diámetro de 7.62 cm (3") y altura 15.24 cm (6") según la ASTM C39. Para realizar los ensayos de resistencia a compresión fue necesario revisar la superficie de los moldes a ser ensayados, tal como lo dice Graybeal (2006), ya que se requiere de una superficie lisa pues debido al uso de las fibras estas pueden quedar parte expuestas y generar superficies irregulares que no permitan que la carga sea distribuida uniformemente. Por esta razón a los cilindros a ensayar se les realizó un corte con disco diamantado, intentado que la superficie quedara de forma regular. Este corte generó que se realizara un ajuste a los valores de resistencia por la variación de la altura. Teniendo en cuenta su modo de fabricación y el tipo de curado, se realizaron ensayos a 1 día para los curados Normal y Ambiente, a 2 días para los curados N+C y A+C, a 7, 28 y 90 días después de haber fabricado las probetas para los cuatro tipos

de curado. En cada edad se ensayan tres muestras en la máquina Universal de ensayos, los cuales fueron promediados para obtener el resultado que se muestra en la Tabla 15.

En el caso de probetas cúbicas las dimensiones en todos sus lados fueron de 5 cm. Para el ensayo se disponían los cubos de manera que las caras más regulares quedaran en contacto con la mesa y el bastidor. Cada una de sus caras fue medida 3 veces y el promedio fue el usado para determinar su resistencia a compresión. Teniendo en cuenta su modo de fabricación y el tipo de curado, se realizaron ensayos a 1 día para los curados Normal y Ambiente, a 2 días para los curados N+C y A+C, y a 7, 28 y 90 días después de haber fabricado las probetas para los cuatro tipos de curado. En cada edad se ensayan tres muestras en la máquina Universal de ensayos, los resultados se promediaron para obtener el resultado que se muestra en la Tabla 16. La configuración de carga y configuración básica de prueba, se mantuvieron constantes para los dos tipos de probetas cilíndricas y cúbicas.

En la Tabla 11 y 12 se relaciona la nomenclatura adoptada para identificar cada una de las probetas usadas de M1 y en M2, según el tipo de fabricación, curado y espécimen.

Tabla 11. Nomenclatura probetas compresión y módulo - Mezcla 1

Nomenclatura	Mezcla	Curado	Molde de la probeta	Modo de fabricación
M1-N-CL-SV	M1	Normal	Cilindro	Sin vibrado
M1-A-CL-SV	M1	Ambiente	Cilindro	Sin vibrado
M1-N+C-CL-SV	M1	Normal + calor	Cilindro	Sin vibrado
M1-A+C-CL-SV	M1	Ambiente + calor	Cilindro	Sin vibrado
M1-N-CL-V	M1	Normal	Cilindro	Vibrado
M1-N-CB-V	M1	Normal	Cubo	Vibrado
M1-A-CL-V	M1	Ambiente	Cilindro	Vibrado
M1-A-CB-V	M1	Ambiente	Cubo	Vibrado
M1-N+C-CL-V	M1	Normal + calor	Cilindro	Vibrado
M1-N+C-CB-V	M1	Normal + calor	Cubo	Vibrado
M1-A+C-CL-V	M1	Ambiente + calor	Cilindro	Vibrado
M1-A+C-CB-V	M1	Ambiente + calor	Cubo	Vibrado

Tabla 12. Nomenclatura probetas compresión y módulo elástico - Mezcla 2

Nomenclatura	Mezcla	Curado	Molde de la probeta	Modo de fabricación
M2-N-CL-SV	M2	Normal	Cilindro	Sin vibrado
M2-A-CL-SV	M2	Ambiente	Cilindro	Sin vibrado
M2-N+C-CL-SV	M2	Normal + calor	Cilindro	Sin vibrado
M2-A+C-CL-SV	M2	Ambiente + calor	Cilindro	Sin vibrado
M2-N-CL-V	M2	Normal	Cilindro	Vibrado
M2-N-CB-V	M2	Normal	Cubo	Vibrado
M2-A-CL-V	M2	Ambiente	Cilindro	Vibrado
M2-A-CB-V	M2	Ambiente	Cubo	Vibrado
M2-N+C-CL-V	M2	Normal + calor	Cilindro	Vibrado
M2-N+C-CB-V	M2	Normal + calor	Cubo	Vibrado
M2-A+C-CL-V	M2	Ambiente + calor	Cilindro	Vibrado
M2-A+C-CB-V	M2	Ambiente + calor	Cubo	Vibrado

4.4.6.2 Módulo elástico:

Norma ASTM C369. Las probetas de este ensayo son cilindros de diámetro 3” y altura 6”. En este ensayo se tuvo en cuenta la recomendación de Graybeal (2006) y se realizó el mismo procedimiento que para el ensayo de resistencia a compresión, realizando un ajuste a la resistencia del 2%, debido a la variación de altura por el corte con disco diamantado y así ofrecer una superficie regular que no alterara la distribución de las cargas. Teniendo en cuenta su modo de fabricación y tipo de curado, los ensayos se realizaron a 7 y 28 días de edad de la mezcla. Por cada variable se ensayaron tres muestras en la máquina Universal, los resultados que fueron promediados. La nomenclatura usada se relaciona en la Tabla 11 para M1 y en la Tabla 12 para M2.

4.4.6.3 Resistencia a flexión:

Norma ASTM C78-10. Las probetas son vigas de 5 cm x 5 cm x 30 cm que se ensayaron en la máquina Instron. Los ensayos de resistencia a flexión se realizaron a 7 y 28 días después de fabricada la mezcla, teniendo en cuenta su modo de fabricación y tipo de curado. En cada edad se ensayan 3 vigas y se promedian sus resultados. En la Tabla 13 se relaciona la nomenclatura usada para M1 y en la Tabla 14 para M2.

Tabla 13. Nomenclatura probetas flexión - Mezcla 1

Nomenclatura	Mezcla	Curado	Molde de la probeta	Modo de fabricación
M1-N-VG-SV	M1	Normal	Viga	Sin vibrado
M1-A-VG-SV	M1	Ambiente	Viga	Sin vibrado
M1-N+C-VG-SV	M1	Normal + calor	Viga	Sin vibrado
M1-A+C-VG-SV	M1	Ambiente + calor	Viga	Sin vibrado
M1-N-VG-V	M1	Normal	Viga	Vibrado
M1-A-VG-V	M1	Ambiente	Viga	Vibrado
M1-N+C-VG-V	M1	Normal + calor	Viga	Vibrado
M1-A+C-VG-V	M1	Ambiente + calor	Viga	Vibrado

Tabla 14. Nomenclatura probetas flexión - Mezcla 2

Nomenclatura	Mezcla	Curado	Molde de la probeta	Modo de fabricación
M2-N-VG-SV	M2	Normal	Viga	Sin vibrado
M2-A-VG-SV	M2	Ambiente	Viga	Sin vibrado
M2-N+C-VG-SV	M2	Normal + calor	Viga	Sin vibrado
M2-A+C-VG-SV	M2	Ambiente + calor	Viga	Sin vibrado
M2-N-VG-V	M2	Normal	Viga	Vibrado
M2-A-VG-V	M2	Ambiente	Viga	Vibrado
M2-N+C-VG-V	M2	Normal + calor	Viga	Vibrado
M2-A+C-VG-V	M2	Ambiente + calor	Viga	Vibrado

5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Resistencia a compresión

Los resultados de los ensayos realizados a las probetas cilíndricas se muestran en la Tabla 15, se determinan los promedios de tres muestras por cada ensayo realizado a 1 o 2,7, 28 y 90 días, para cuatro tipos de curado normal, ambiente, normal + calor y ambiente + calor para mezclas no autocompactable M1 y autocompactable M2 y dos modos de fabricación vibrados V y sin vibrar SV.

Tabla 15. Resistencia a compresión para cilindros, mezclas M1 y M2, SV y V

Curado	Edad (Días)	M1				M2			
		Sin vibrar Resist. compresión Promedio (Mpa)	Sin vibrar Coef. Variación (%)	Vibrados Resist. compresión Promedio (Mpa)	Vibrados Coef. Variación (%)	Sin vibrar Resist. compresión Promedio (Mpa)	Sin vibrar Coef. Variación (%)	Vibrados Resist. compresión Promedio (Mpa)	Vibrados Coef. Variación (%)
Normal	1	60.35	3%	64.06	4%	48.58	5%	57.96	1%
	7	73.91	2%	91.84	4%	83.50	0%	85.20	6%
	28	93.13	4%	108.42	4%	87.68	4%	109.07	2%
	90	111.82	7%	116.68	6%	95.22	8%	109.01	4%
Ambiente	1	42.35	7%	53.00	2%	39.68	2%	42.54	4%
	7	69.50	6%	87.50	4%	84.53	3%	81.34	6%
	28	88.83	3%	95.21	5%	87.55	2%	93.33	2%
	90	95.51	5%	104.24	6%	91.29	8%	111.97	3%
Normal + Calor	2	90.64	2%	122.79	3%	107.84	1%	95.65	6%
	7	86.34	2%	114.44	1%	92.45	3%	100.71	4%
	28	96.39	2%	113.78	0%	105.35	3%	112.32	7%
	90	94.07	2%	120.70	2%	99.96	9.7%	118.08	6%
Ambiente + Calor	2	113.72	1%	111.60	2%	98.06	4%	90.50	0%
	7	107.10	3%	134.82	4%	100.66	7%	104.52	1%
	28	103.54	3%	124.68	4%	111.93	6%	112.83	1%
	90	115.40	1%	123.52	4%	99.68	3%	104.56	2%

Paralelamente en la Tabla 16, se representan las resistencias a compresión a 1 o 2,7, 28 y 90 días, para probetas en molde cúbico con dosificación de la mezcla no autocompactable M1 y autocompactable M2, teniendo en cuenta el modo de fabricación vibrado V.

Tabla 16. Resistencia a compresión para cubos, mezclas M1 y M2, Vibrados

Curado	Edad (Días)	M1 Vibrados			M2 Vibrados		
		Resist. compresión Promedio (Mpa)	Desv. Estándar (Mpa)	Coef. Variación (%)	Resist. compresión Promedio (Mpa)	Desv. Estándar (Mpa)	Coef. Variación (%)
Normal	1	69.17	2.06	3%	51.99	1.79	3%
	7	102.64	1.52	1%	105.66	3.00	3%
	28	133.48	3.30	2%	141.39	5.53	4%
Ambiente	1	40.62	2.01	5%	40.37	0.80	2%
	7	99.36	0.76	1%	96.08	1.74	2%
	28	105.31	1.67	2%	98.80	4.13	4%
Normal + Calor	2	134.61	2.21	2%	125.75	1.84	1%
	7	129.42	5.42	4%	122.69	6.19	5%
	28	139.00	3.87	3%	116.56	4.44	4%
	90	125.82	4.90	4%	120.34	4.24	4%
Ambiente + Calor	2	134.33	7.37	5%	121.30	3.87	3%
	7	144.29	7.19	5%	128.35	2.11	2%
	28	145.63	4.85	3%	132.40	0.72	1%
	90	126.00	2.75	2%	130.23	4.54	3%

El análisis de la influencia de cada una de estas variables en la resistencia a compresión de los UHPC con materiales accesibles en Colombia se desarrollará en los siguientes apartados.

5.1.1 Análisis de la resistencia a compresión en edad temprana

El análisis de resistencia a compresión en edad temprana se realiza sobre los valores presentados para mezclas M1 y M2, modos de fabricación sin vibrar y vibrados y cuatro regímenes de curado. La edad temprana hace referencia a la resistencia a compresión en las primeras 48 horas después de haber fabricado las probetas.

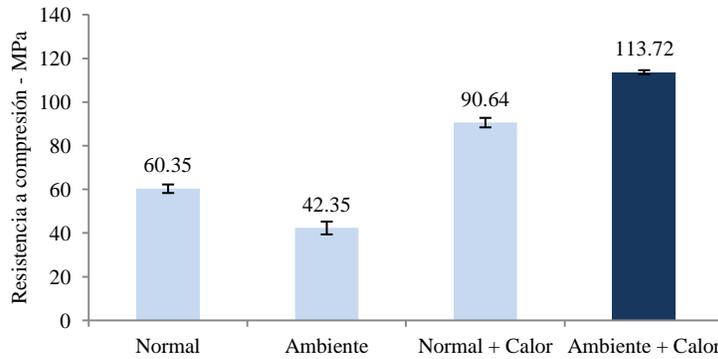


Figura 17. Resistencias a compresión en edad temprana de cilindros – M1– SV

La Figura 17 representa las resistencias a compresión en edad temprana, para las muestras sometidas a modo de fabricación sin vibrar de la mezcla M1 y la influencia de los 4 regímenes de curado. Las muestras sometidas a curado ambiente con tratamiento de calor, obtuvieron los valores más altos de resistencia a compresión, llegando hasta 113.72 Mpa. Estos valores sobrepasan un 88% a las resistencias obtenidas con un curado normal, un 168% al curado ambiente y un 25% al curado normal + calor. Lo anterior evidencia que las muestras sometidas a un tratamiento con calor adquieren una alta resistencia en las primeras 48 horas.

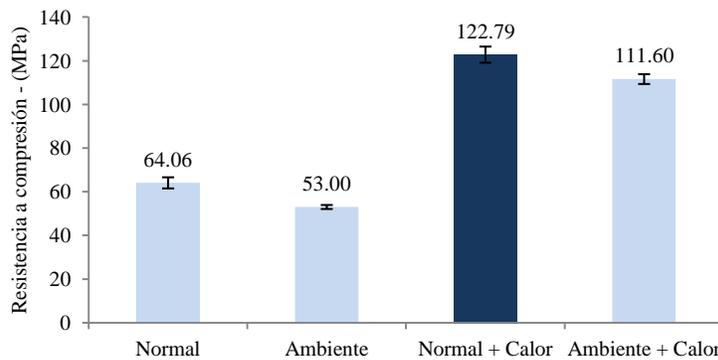


Figura 18. Resistencias a compresión en edad temprana de cilindros – M1– V

En la Figura 18 se observa un mayor valor de resistencia a compresión para las muestras que fueron sometidas a curado normal + calor, sobrepasando un 10% a las muestras de curado ambiente + calor. Además presenta una diferencia muy marcada sobre la resistencia a compresión para los curados normal y ambiente ya que los sobrepasa en un 91% y un 131% respectivamente.

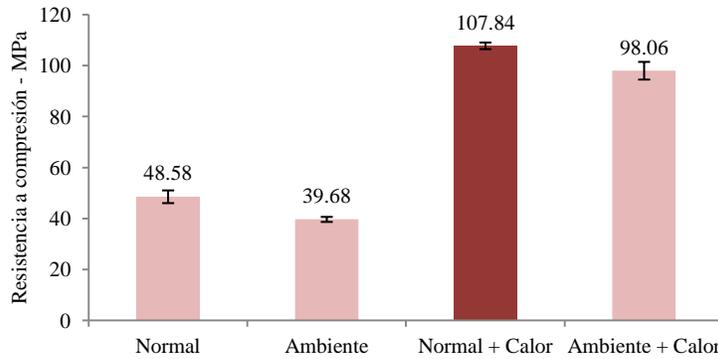


Figura 19. Resistencias a compresión en edad temprana de cilindros – M2– SV

En la Figura 19 el mayor valor de resistencia a compresión, es para el curado normal + calor, alcanzando una resistencia de 107.84 Mpa. Este valor es superior un 122% a las resistencias de curado normal, un 171% a las resistencias de curado ambiente y un 9% superior sobre el curado ambiente + calor.

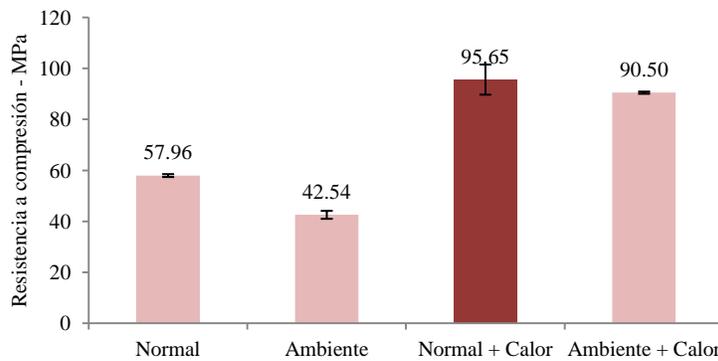


Figura 20. Resistencias a compresión en edad temprana de cilindros – M2– V

La Figura 20 representa las resistencias a compresión de muestras con mezcla M2 y con modo de fabricación vibradas. El régimen de curado normal + tratamiento de calor, presenta un valor en edad temprana de 95.65 MPa, siendo un 65% superior que un tratamiento normal, un 125% superior que un tratamiento ambiente y un 5% superior a un curado ambiente + calor. La desviación de los valores de resistencia para curado normal + calor es cercana al 6%, lo que hace pensar que los resultados obtenidos para muestras ambiente + calor y normal + calor son casi iguales, ya que su diferencia podría encontrarse dentro del rango de dispersión de los datos.

Autores como Cwirzen (2007), han señalado que un curado con tratamiento térmico puede afectar la microestructura y las propiedades mecánicas del concreto con baja relación

agua/cemento (A/C). Así también Prem, Bharatkumar, & Iyer, (2013), afirman que la tasa de hidratación y aumento de la resistencia para UHPC con curados de tratamiento con calor, son altas hasta la edad de 14 días, obteniendo casi el 85% de la resistencia a la compresión a esa edad. Para esta investigación, las resistencias a compresión de mezclas M1 y M2 y los dos modos de fabricación, indican un comportamiento similar, con un rápido crecimiento en las primeras 48 horas, alcanzando casi el 100% de su resistencia y sosteniendo estos valores con algunas variaciones hasta los 90 días.

Sin importar el tipo de mezcla y su modo de fabricación, el curado ambiente siempre presenta los valores más bajos de resistencia a edad temprana. Según Benammar, Mezghiche, & Guettala (2013), el curado al ambiente tiene potencialmente un efecto negativo sobre las propiedades mecánicas, debido a la falta de la disponibilidad de humedad para hidratación. Del mismo modo Ay en el (2004) indica que los curados al ambiente, podrían dañar el equilibrio entre la parte interior y la parte exterior del concreto, influyendo en la resistencia a compresión. Una posible respuesta a este comportamiento, puede ser la rápida evaporación del agua que impide un proceso de hidratación adecuado.

Graybeal en el (2006), plantea dos factores que pueden influir en la resistencia a compresión para un curado ambiente. El primero lo relaciona con el tiempo para desmoldar las muestras, y recomienda que sea a las 48 horas después de fabricadas las probetas. El segundo lo relaciona con la duración en el tratamiento de calor. En esta investigación el desmolde de las muestras se realizó a las 24 horas después de haber sido fabricadas, y el tratamiento de calor se inició una vez fueron desmoldadas las muestras y se realizó durante 24 horas. Estos posibles factores, pudieron afectar la resistencia a compresión. Estas hipótesis pueden ser afines al comportamiento que reflejan los dos tipos de mezclas y los dos modos de fabricación, dado que el curado ambiente siempre presenta una menor resistencia a compresión.

Para muestras sometidas a régimen de curado normal, Graybeal (2006), afirma que las probetas con tratamiento con calor tuvieron resultados superiores al 53%, en comparación con aquellas que no lo tuvieron. En nuestra investigación al hacer la comparación de las resistencias en edad temprana, para un curado normal se obtuvieron resultados de 60.35 MPa, a diferencia de las muestras sometidas a un curado normal + calor que tuvieron

resultados de 90.64 MPa, siendo un 50% superior y presentando un comportamiento similar al descrito por Graybeal.

Los valores de resistencia a compresión en edad temprana para mezclas M2 sin vibrar, son cerca de un 13% inferior, a los valores de resistencia a compresión de mezclas M1 sin vibrar, con excepción del curado normal + calor que presenta un 19% de mayor resistencia para M2 sobre M1. Para los valores de resistencia a compresión en edad temprana, las muestras vibradas M2 son en promedio un 18% menor que M1, para los cuatro regímenes de curado.

5.1.2 Análisis de la resistencia a compresión a 28 días

El análisis de resistencia a compresión a 28 días se realiza para muestras vibradas y sin vibrar de la mezcla M1 y M2, sometidas a regímenes de curado normal, ambiente, normal + calor y ambiente + calor.

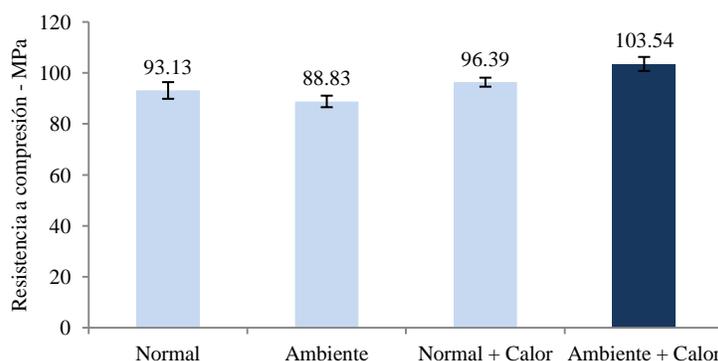


Figura 21. Resistencias a compresión a 28 días de cilindros – M1– SV

En la Figura 21 se observa los resultados de las resistencias a compresión de los cilindros a 28 días para M1 sin vibrar y para los cuatro regímenes de curado. La mayor resistencia a compresión la presenta el curado ambiente + calor con un valor de 103.54 MPa. Esta resistencia es el 11% mayor que la resistencia desarrollada con un curado normal, 17% mayor que la resistencia del curado ambiente y 7% mayor al del curado normal + calor; lo que indica que los tratamientos que incluyen calor presentan una mayor resistencia a los 28 días, en comparación a un curado que no lo incluya, esto para mezclas M1 y SV. Debido a los valores de desviación que no superan el 3.5%, puede indicarse que si hay una influencia del tipo de curado sobre la resistencia a compresión a 28 días.

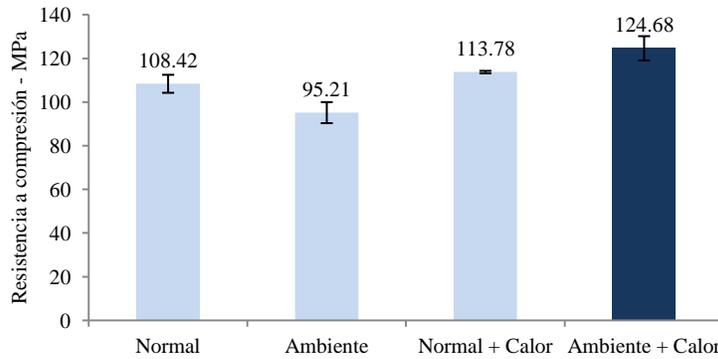


Figura 22. Resistencias a compresión a 28 días de cilindros – M1– V

En la Figura 22, se representan las resistencias a compresión a 28 días de la mezcla M1 vibradas. La resistencia más alta, se logra con un curado ambiente con tratamiento de calor, 124.68 MPa, siendo un 15% superior a un curado normal, 31% superior a un curado ambiente y un 9% superior para el curado normal + calor. Confirmando la hipótesis vista anteriormente en la Figura 21, que las muestras sometidas a un curado con tratamiento de calor, presentan valores superiores en la resistencia a compresión a los 28 días sobre aquellas que no lo incluyen.

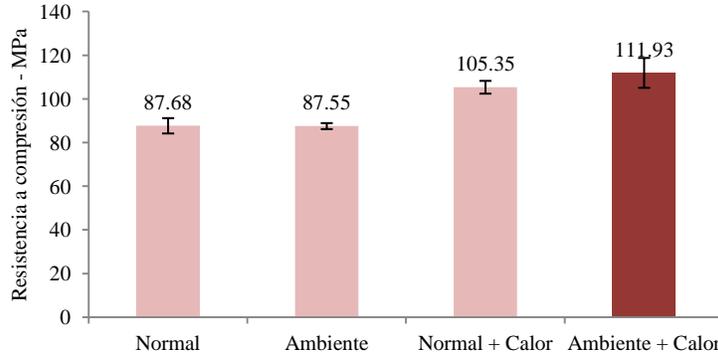


Figura 23. Resistencias a compresión a 28 días de cilindros – M2– SV

La mayor resistencia de muestras sin vibrar de la mezcla M2, es para el curado ambiente + calor con un valor de 111.93 MPa, tal como se representa en la Figura 23. Este valor de resistencia a compresión es superior un 28% para curados normal y ambiente y un 6% superior para un curado normal + calor. Para este tipo de mezcla y modo de fabricación no hay una diferencia considerable en el tipo de curado normal y ambiente, los valores son muy similares y presentan una desviación en sus valores, menor al 4%.

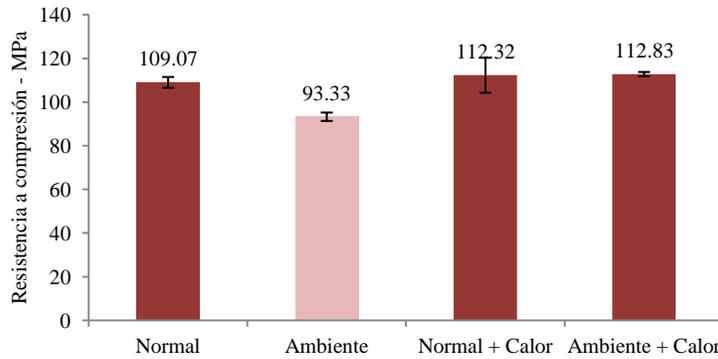


Figura 24. Resistencias a compresión a 28 días de cilindros – M2– V

En la Figura 24, se representan las resistencias a compresión de la mezcla M2, con modo de fabricación vibrado. Nuevamente los curados con tratamiento de calor, presentan la resistencia a compresión más alta, 112.83 Mpa para curado normal + calor y 112.32 MPa para curado ambiente + calor. Estos valores sobrepasan un 3% al curado normal y un 20% al curado ambiente. Esto permite deducir que la resistencia a compresión a 28 días, con diferentes modos de fabricación y tipos de mezclas, un tratamiento con calor puede aumentar la resistencia cerca de un 30% sobre muestras con tratamiento ambiente y un 15% sobre un curado normal. Prem, Bhartkumar, & Iyer, (2013) describen que el no tener un curado con tratamiento de calor, puede reducir hasta en un 65% la resistencia a muestras que si lo tengan.

Arafa, Shihada, & Karmout (2010), describen un incremento gradual de la resistencia a compresión hasta los 28 días, para el curado normal. Esta hipótesis fue comprobada al analizar las resistencias a compresión de mezclas M1 y M2 y los dos tipos de fabricación, y se evidenció una tendencia continua al alza de la resistencia a lo largo del tiempo, mostrando un crecimiento gradual. Este mismo resultado lo obtuvo (Sajedi & Razak, 2011) cuando las muestras que se encontraban con curado en el agua no mostraron ninguna pérdida de resistencia, y por el contrario el crecimiento fue continuo con la edad de las muestras. Por otra parte el curado ambiente igual que en edad temprana, siempre presentó el valor más bajo de resistencia a los 28 días, sin que influyera el tipo de mezcla o su modo de fabricación. Esto probablemente debido a una rápida evaporación de agua que impidió una adecuada hidratación de las partículas.

5.1.3 Análisis de la resistencia a compresión a largo plazo

El análisis de resistencia a compresión a largo plazo se realiza sobre los valores presentados por las mezclas M1 y M2, modos de fabricación, sin vibrar y vibrados, y cuatro regímenes de curado. El largo plazo hace referencia a la resistencia a compresión adquirida a los 90 días de edad.

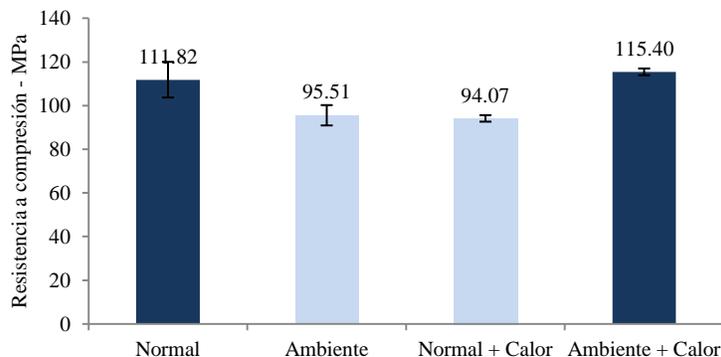


Figura 25. Resistencias a compresión a largo plazo de cilindros – M1–SV

La Figura 25 representa las resistencias a compresión a largo plazo para mezcla M1 y modo de fabricación sin vibrar. El mayor valor adquirido es para el régimen de curado ambiente + calor con 115.40 MPa, siendo un 3% superior a la resistencia adquirida para un curado normal, 21% por encima del curado ambiente y un 22% superior al normal + calor. No obstante una desviación en los valores del 8% hace pensar que un curado normal a 90 días, puede ser igual a la resistencia de ambiente + calor, ya que la diferencia podría estar dentro de la dispersión de los datos.

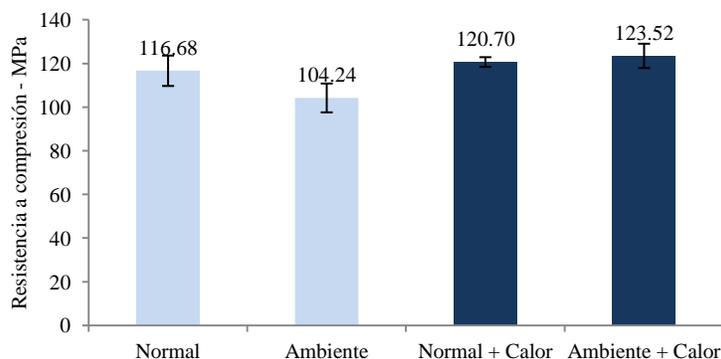


Figura 26. Resistencias a compresión a largo plazo de cilindros – M1–V

La Figura 26 permite observar que las mayores resistencias a compresión a largo plazo de la mezcla M1 con modo de fabricación vibrado, la presentan los regímenes de curado

normal, normal + calor y ambiente + calor con valores de 116.68 MPa, 120.70 MPa y 123.52 MPa respectivamente. Estos valores no superan un 6% de diferencia entre sí, y pueden entrar en la diferencia en la dispersión de los datos que tampoco supera el 6%. Estos resultados permiten concluir que un curado normal puede alcanzar a largo plazo, los valores de resistencia a compresión de curados con tratamiento de calor. No obstante el curado ambiente se encuentra un 18% por debajo de las resistencias a compresión de un curado ambiente + calor.

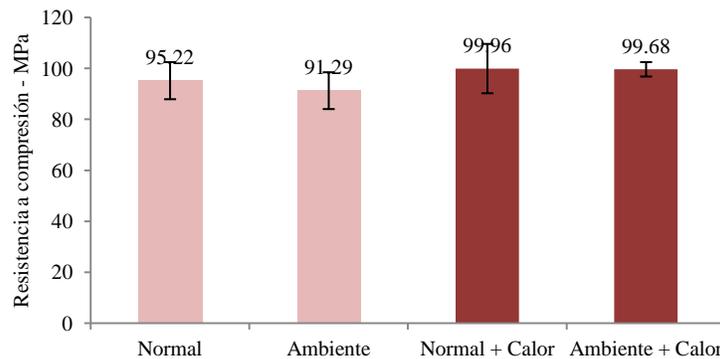


Figura 27. Resistencias a compresión a largo plazo de cilindros – M2–SV

Para las probetas de M2 y modo de fabricación sin vibrar, la Figura 27 representa las resistencias a compresión a largo plazo, permitiendo ver que los curados con tratamiento de calor presentan una resistencia similar de 99.96 MPa para curado normal + calor y 99.68 MPa ambiente + calor. Estos valores presentan un 5% de resistencia superior con respecto a un curado normal y un 10% con respecto a un curado ambiente. La diferencia entre las resistencias a compresión a largo plazo para M2 - SV no es tan marcada, siendo muy similar para los cuatro regímenes de curado, ya que las diferencias podrían entrar en la dispersión de los datos que se encuentra en promedio en un 7%.

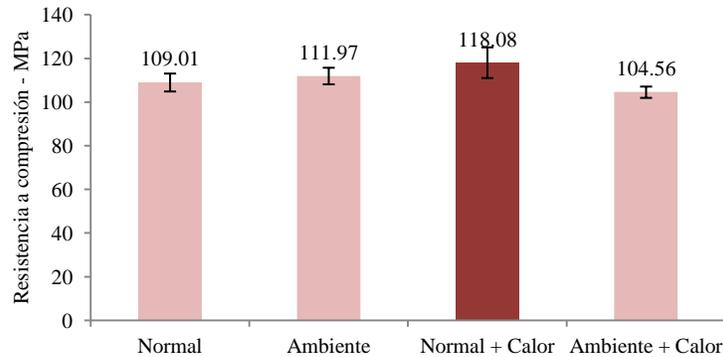


Figura 28. Resistencias a compresión a largo plazo de cilindros – M2– V

En la Figura 28, se muestran las resistencias a compresión a largo plazo para mezcla M2 y modo de fabricación vibrado. La mayor resistencia la obtiene las muestras sometidas a régimen de curado normal + calor con un valor de 118.08 MPa, siendo un 8% superior al curado normal, un 5% superior al curado ambiente y un 13% al curado ambiente + calor.

Sajedi & Razak en el (2011), indican que algunas muestras que tuvieron tratamiento de calor, presentaron una pérdida de resistencia de aproximadamente de un 8.7% a los 56 o 90 días. Bingöl & Tohumcu en el (2013), señalan que la posible pérdida de resistencia a compresión a las muestras sometidas a los curados con tratamiento de calor, puede ser debido a las altas temperaturas del curado que no permiten una hidratación uniforme de las partículas. Para esta investigación las resistencias a compresión de los curados con tratamientos de calor desarrollan su resistencia a los 2 días, con una tendencia a mantener la resistencia a lo largo del tiempo. Sin embargo presenta algunas variaciones en el orden del 10%, para mezclas M1 y M2 y los dos modos de fabricación. Estas variaciones no pueden ser atribuidas a una razón específica, ya que podrían entrar en la desviación de los datos o también podría atribuirse a una hidratación no homogénea de las partículas.

Las probetas que tuvieron un régimen de curado normal presentan un crecimiento gradual a lo largo del tiempo de su resistencia a compresión. Según el análisis de resistencias a largo tiempo, estas pueden presentar resistencias a compresión similares a las de los regímenes de curado con tratamiento de calor. Esta hipótesis difiere de lo propuesto por Magureanu, Sosa, Negrutiu, & Heghes, (2012) donde señalan que la resistencia a compresión a largo tiempo es 1.34 veces mayor para muestras tratadas con calor, en comparación con un curado normal.

Sajedi & Razak (2011), indican que obtuvieron mejores resultados para resistencias a compresión con curados al ambiente que con curados ambiente + calor. Esto puede ocurrir por la ubicación geográfica (Arabia Saudita) donde se realizaron los ensayos, probablemente la temperatura ambiente haya sido alta y ayudó a mejorar los resultados de las resistencias. Sin embargo en las condiciones de esta investigación, no es posible tener mejores resultados para el curado ambiente, debido a la temperatura promedio que presenta la ciudad de Bogotá, 14,20 °C según la estación meteorológica de la PUJ. Aunque los valores de resistencia a compresión para un curado ambiente generalmente son inferiores con respecto a los demás regímenes, sin importar el tipo de mezcla o modo de fabricación, a largo plazo hay una reducción de esta brecha. En edades tempranas las resistencias de curados con tratamientos de calor podían superar el 100% de las resistencias de muestras sometidas a curado ambiente, pero a 90 días la diferencia se reduce hasta llegar a un 15%. Lo anterior porque el desarrollo de la resistencia a compresión en probetas sometidas al curado ambiente siempre presenta un crecimiento gradual a lo largo del tiempo y nunca muestra una tendencia a la baja. La Figura 29 representa las resistencias a compresión de mezclas M1 y M2 Vibradas con los cuatro tipos de curado.

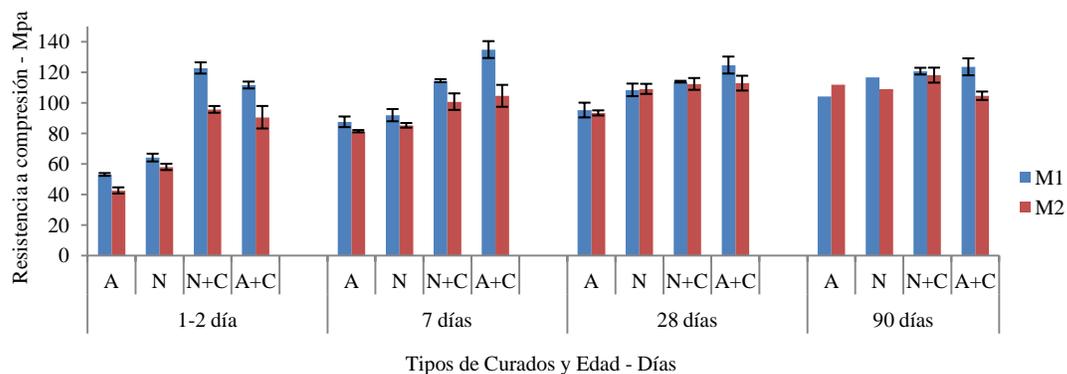


Figura 29. Resistencias a compresión – M1 y M2 - vibradas

El modo de fabricación de las probetas, afectó la resistencia a compresión en una proporción del 14% de mayor resistencia, para las muestras vibradas sobre las muestras sin vibrar de la mezcla M1. Esta tendencia es similar para los cuatro tipos de curado a lo largo del tiempo. En la Figura 30, se representan los curados ambiente y ambiente + calor para representar las resistencias a compresión de la mezcla M1 de muestras vibradas y sin vibrar. Esto permite observar que al vibrar las probetas, hay un mejor acomodamiento de

partículas, disminuyendo el espacio entre ellas, lo que se traduce en una mayor resistencia a compresión.

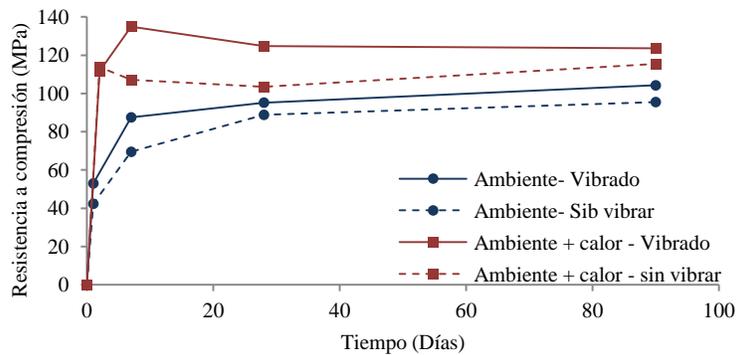


Figura 30. Comportamiento de muestras vibradas y sin vibrar – M1 - Curado A y A+C

Por otra parte, la mezcla M2 presenta en promedio un 8% más de resistencia las muestras vibradas en comparación a las sin vibrar. Es de anotar que, si bien no se esperaba mayor influencia en este tipo de mezclas por su alta fluidez, aún así se perciben los beneficios del vibrado al aumentar su resistencia debido a que M2, es una mezcla autocompactable y es más fluida en comparación que M1, presentando un acomodamiento mejor de la partículas, lo que hace que el modo de fabricación no fuera tan influyente. En la Figura 31, se observa como ejemplo el comportamiento del modo de fabricación para M2 en curados ambiente y ambiente + calor.

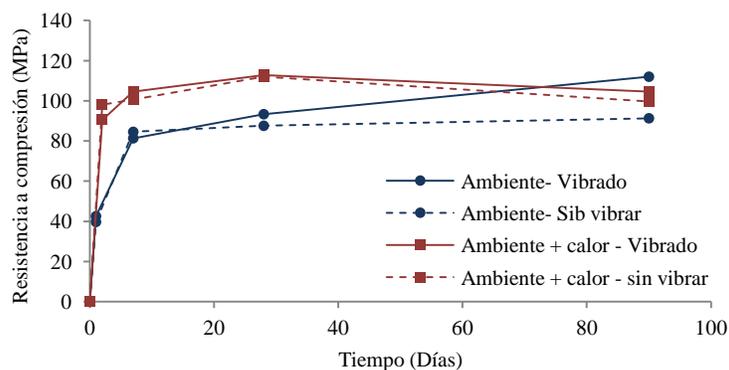


Figura 31. Comportamiento de muestras vibradas y sin vibrar – M2 - Curado A y A+C

La Figura 32 representa el comportamiento de muestras vibradas y sin vibrar para mezcla M1 Curado Normal y normal + calor. La Figura 33 representa el comportamiento de muestras vibradas y sin vibrar para mezcla M2 curado Normal y Normal + calor.

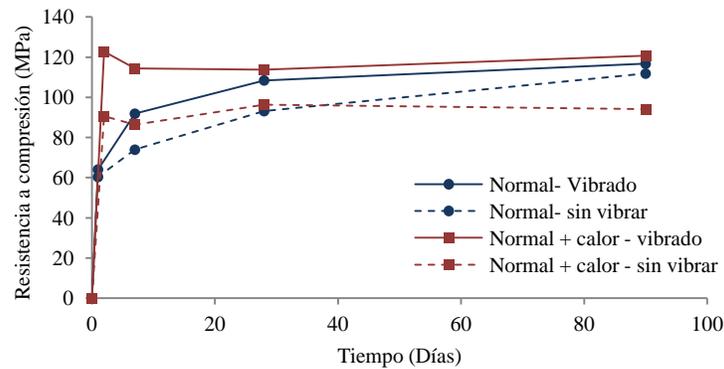


Figura 32. Comportamiento de muestras vibradas y sin vibrar – M1 - Curado N y N+C

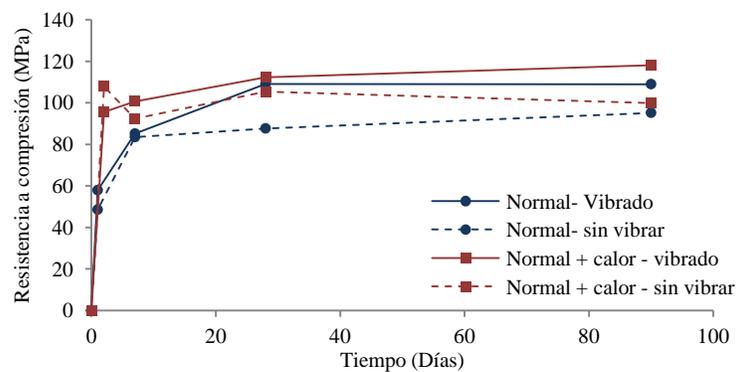


Figura 33. Comportamiento de muestras vibradas y sin vibrar – M2 - Curado N y N+C

5.1.4 Relación de la resistencia a compresión entre cilindros y cubos

En estados Unidos la probeta estándar es el cilindro y en Europa es el cubo. Pero Yi, Yang, & Choi (2006) demostraron que la forma de los especímenes, puede afectar la resistencia a compresión, concluyendo que los prismas y cubos pueden presentar una mayor resistencia en comparación con los cilindros, así mismo concluyeron que la resistencia a compresión puede disminuir a medida que el tamaño aumenta.

En la presente investigación se analizaron los resultados de resistencia a compresión a 1 ó 2,7, 28 y 90 días, teniendo en cuenta los diferentes regímenes de curado a muestras vibradas y se pudo evidenciar que existe una diferencia en resistencia a compresión en las

muestras debido a la forma del espécimen. El análisis de resultados indica que cilindros de diámetro 7.62 cm (3”) y altura 15.24 cm (6”) con una relación altura/diámetro igual a dos usados en esta investigación, presentan una menor resistencia en comparación con los especímenes fabricados en moldes cúbicos que tienen una relación altura/ancho igual a 1.

En la Figura 34 se consideran muestras vibradas para la mezcla 1 y se observa que la resistencia de los cubos es casi siempre superior a la de los cilindros, con excepción de la resistencia obtenida en el primer día para el curado ambiente. El incremento de la resistencia de los cubos es en promedio un 10% superior a la resistencia de los cilindros con una desviación del 11%. Este resultado difiere un poco de lo planteado por Graybeal y Davis (2008) que estudiaron la relación entre los dos tipos de moldes y encontraron que el factor de conversión para moldes cúbicos de 51 mm a cilíndricos 76 mm de diámetro, similares a los usados en esta investigación, corresponde a multiplicar la resistencia a compresión de los cubos por 0,96.

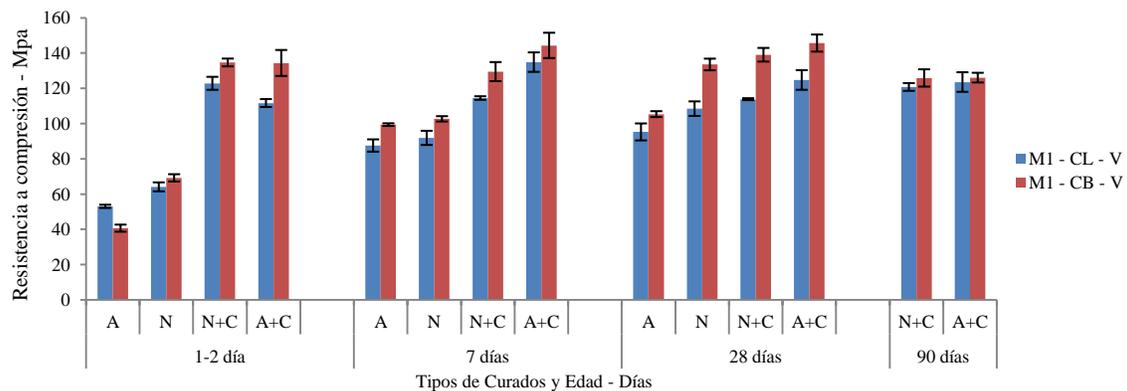


Figura 34. Comparación cilindros vs Cubos – M1

La Figura 35, considera resistencias a compresión de muestras vibradas de M2 para cubos y cilindros, donde los cubos muestran una resistencia mayor en un 13% sobre los cilindros, con una desviación del 11%, tan solo para curado ambiente y normal al primer día hay una resistencia mayor para los cilindros. Según Graybeal (2006), afirma que los resultados obtenidos de las resistencias de los cubos fueron del 5% sobre las resistencias de los cilindros.

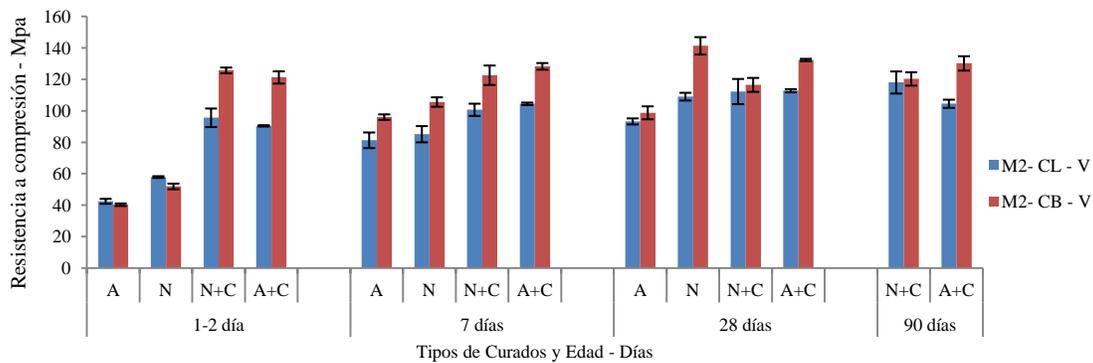


Figura 35. Comparación cilindros vs Cubos – M2

La razón que puede justificar una mayor resistencia para los cubos, es que sin cambiar el tamaño de partículas, un menor tamaño de la probeta puede causar mayor confinamiento, generando una mayor fricción entre las partículas y representando una mayor resistencia.

5.2 Módulo elástico

El módulo de elasticidad depende fundamentalmente de la capacidad de adherencia en la interfaz fibra-cemento, (Zhang, Liu, Yuan, & Mang, 2015) (Garas, Kurtis, & Kahn, 2012). En ésta zona se pueden presentar variaciones debido al curado y tipo de fabricación al que se sometan los especímenes.

En la Tabla 17 y Tabla 18 se muestran los resultados de módulo de elasticidad para M1 y M2 respectivamente.

Tabla 17. Módulo elástico de M1

Curado	Edad (Días)	Sin Vibrar	Desviación estándar (MPa)	CV %	Vibrados	Desviación estándar (MPa)	CV %
		Mód. Elástico (MPa)			Mód. Elástico (MPa)		
Normal	7	35.635	1.422	4%	36.474	2.235	6%
	28	46.427	2.890	6%	48.046	2.245	5%
Ambiente	7	34.932	1.766	5%	34.151	995	3%
	28	38.713	1.759	5%	35.473	1.122	3%
Normal + Calor	7	39.777	1.430	4%	37.020	927	3%
	28	42.957	1.652	4%	37.914	1.804	5%
Ambiente + Calor	7	43.276	689	2%	38.619	2.703	7%
	28	44.581	362	1%	44.852	1.818	4%

Tabla 18. Módulo elástico de M2

Curado	Edad (Días)	Sin Vibrar Mód. Elástico (MPa)	Desviación estándar (MPa)	CV %	Vibrados Mód. Elástico (MPa)	Desviación estándar (MPa)	CV %
Normal	7	31.771	580	2%	35.147	2.048	6%
	28	42.762	2.396	6%	41.945	2.593	6%
Ambiente	7	31.847	816	3%	37.125	1.696	5%
	28	39.978	1.536	4%	37.237	966	3%
Normal + Calor	7	44.956	142	0%	42.143	57	0%
	28	32.252	1.920	6%	42.622	206	0%
Ambiente + Calor	7	37.646	408	1%	36.806	1.224	3%
	28	39.104	1.266	3%	39.255	735	2%

5.2.1 Análisis del módulo elástico a 7 días

En la Figura 36 se presentan los resultados de módulo elástico de los especímenes no vibrados de M1 sometidos a los cuatro regímenes de curado. El resultado más alto fue de 43.276 MPa y corresponde a los cilindros que fueron sometidos al curado ambiente con tratamiento térmico. Dicho resultado es superior un 18% al del curado normal, un 20% al del curado ambiente y un 8% al del curado normal con tratamiento con calor. La menor diferencia se tiene entre los curados que tienen inclusión de tratamiento con calor, lo que sugiere una mejora en la interfaz fibra-cemento a los 7 días.

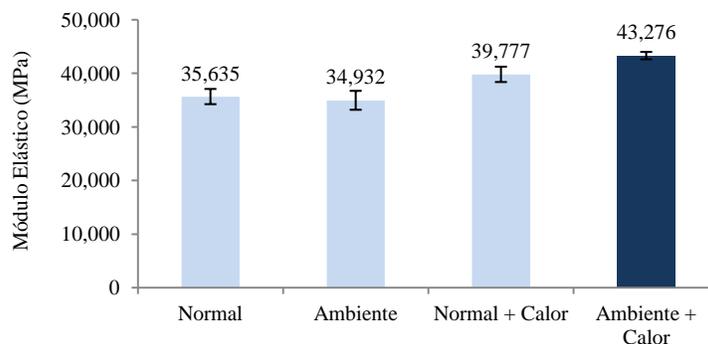


Figura 36. Módulo elástico de especímenes no vibrados de M1 a 7 días.

En la Figura 37 se presentan los resultados de módulo elástico de los especímenes vibrados de M1 sometidos a los cuatro regímenes de curado. El resultado más alto fue de 38.619 MPa y corresponde a los cilindros que fueron sometidos al curado ambiente con tratamiento de calor. Éste resultado es superior un 5% al del curado normal, un 11% al del curado ambiente y un 4% al del curado normal con tratamiento de calor. Estas diferencias

no son considerablemente altas, por tanto se puede asumir que a los 7 días los regímenes de curados no tienen una influencia considerable sobre el módulo elástico de los especímenes vibrados de M1.

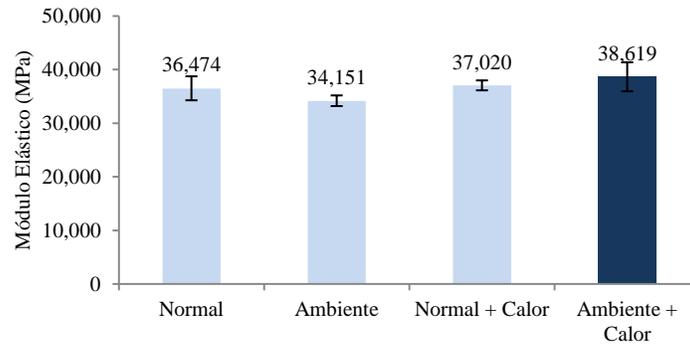


Figura 37. Módulo elástico de especímenes vibrados de M1 a 7 días.

Para los dos tipos de fabricación en M1, se tiene que los resultados más altos corresponden a los cilindros sometidos al curado ambiente con tratamiento térmico. Sin embargo, para los especímenes no vibrados se tienen diferencias más altas respecto a los demás curados, que en el caso de los vibrados. Esto posiblemente porque la vibración genera una matriz que no permite una influencia considerable por parte de los regímenes de curado.

En la Figura 38 se presentan los resultados de módulo elástico de los especímenes sin vibrar de M2 sometidos a los cuatro regímenes de curado. El resultado más alto fue de 44.955 MPa que corresponde a los cilindros que fueron sometidos al curado normal con tratamiento térmico. Dicho resultado es superior un 30% al del curado normal y al del curado ambiente y un 17%, por tanto es evidente la influencia de la inclusión del tratamiento térmico en los especímenes no vibrados ensayados a 7 días.

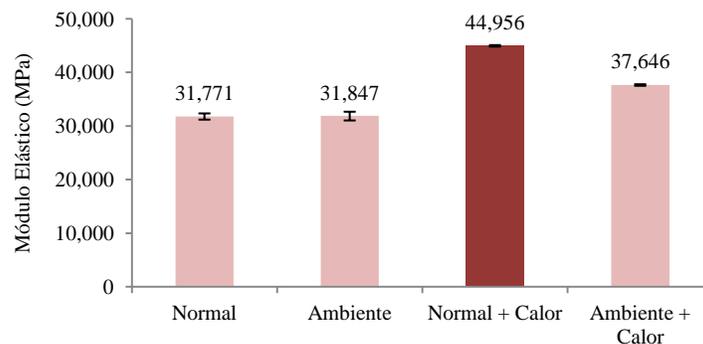


Figura 38. Módulo elástico de especímenes no vibrados de M2 a 7 días.

En la Figura 39 se presentan los resultados de módulo elástico de los especímenes vibrados de M2 sometidos a los cuatro regímenes de curado. El resultado más alto fue de 42.143 MPa y corresponde a los cilindros que fueron sometidos al curado normal con tratamiento térmico. Éste resultado es superior un 16% al del curado normal, un 12% al del curado ambiente y un 13% al del curado ambiente con tratamiento térmico, lo que hace pensar en una influencia considerablemente baja por parte de la inclusión de calor sobre el módulo elástico de especímenes vibrados de M2 a 7 días.

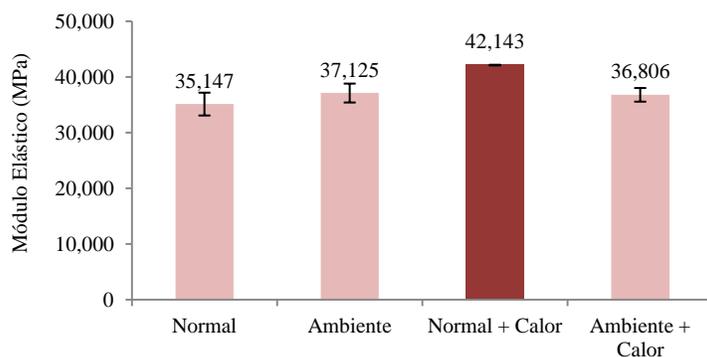


Figura 39. Módulo elástico de especímenes vibrados de M2 a 7 días.

Los resultados de módulo elástico más altos para los dos tipos de fabricación incluyen tratamiento con calor, y entre ellos difieren un 10%, siendo superiores los que fueron sometidos a vibración. Con esta diferencia se considera que el modo de fabricación en especímenes de M2 tiene una influencia considerablemente baja en los resultados de módulo elástico a 7 días.

Los resultados más altos en las dos mezclas estudiadas corresponden a los especímenes sometidos al curado ambiente con tratamiento térmico, variando un 3% entre ellos, lo que quiere decir que a los 7 días existe una influencia generada por la mejora en la interfaz fibra matriz posiblemente causada por la producción acelerada de productos hidratados.

5.2.2 Análisis del módulo elástico a 28 días

El resultado más alto de módulo elástico en los especímenes de M1 para los dos tipos de fabricación y los cuatro regímenes de curado fue 48.045 MPa, que corresponde a los cilindros vibrados sometidos al curado normal.

En la Figura 40 se presentan los resultados de módulo elástico de los especímenes no vibrados de M1 sometidos a los cuatro regímenes de curado. El resultado más alto fue de 46.426 MPa y corresponde a los cilindros que fueron sometidos al curado normal. Dicho resultado es superior un 17% al del curado ambiente, un 7% al del curado normal con tratamiento térmico y un 4% al del curado ambiente con tratamiento térmico. Que el módulo elástico de los especímenes sometidos a curado normal sea incluso mayor que los de los especímenes sometidos a curados con tratamiento con calor, posiblemente sea por la generación de productos hidratados causados por las reacciones de hidratación continuas a lo largo del tiempo. Estas probablemente estructuran una mejor interfaz fibra-matriz con el transcurrir del tiempo, a diferencia de las reacciones aceleradas generadas por el tratamiento térmico.

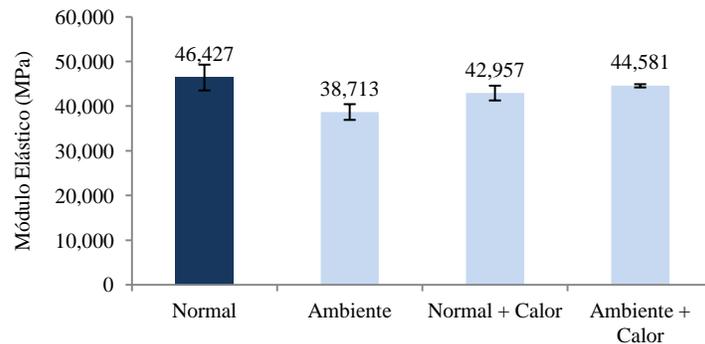


Figura 40. Módulo elástico de especímenes no vibrados de M1 a 28 días.

En la Figura 41 se presentan los resultados de módulo elástico de los especímenes vibrados de M1 sometidos a los cuatro regímenes de curado. El resultado más alto fue de 48.045 MPa y corresponde a los cilindros que fueron sometidos al curado normal. Éste resultado es superior un 26% al del curado ambiente, un 21% al del curado normal con tratamiento térmico y un 7% al del curado ambiente con tratamiento térmico. La superioridad del módulo elástico de los especímenes sometidos a curado normal, posiblemente esté relacionada con una mejora continua a lo largo del tiempo de la interfaz fibra-cemento. Esto sería causado por la temperatura y humedad relativa, contantes en el tiempo.

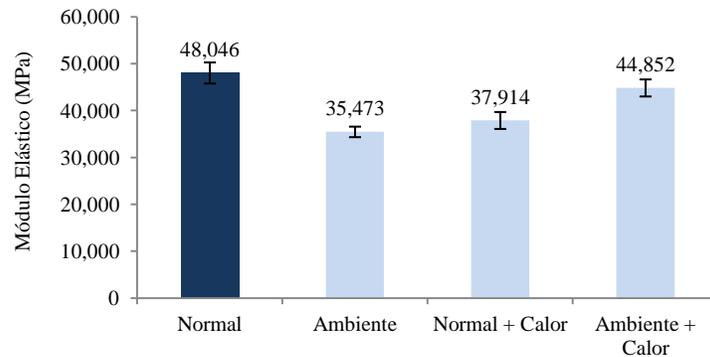


Figura 41. Módulo elástico de especímenes vibrados de M1 a 28 días.

Para los dos tipos de fabricación en M1, los resultados más altos corresponden a los cilindros sometidos al curado normal, siendo superior un 3% el de los especímenes vibrados. Dicha diferencia es considerablemente baja, por lo que se puede asumir que no hay una clara influencia del tipo de fabricación en los resultados obtenidos de módulo elástico en M1.

Es importante aclarar que a los 28 días no se tiene en cuenta el resultado de los cilindros sin vibrar sometidos a curado normal con tratamiento de calor. Lo anterior porque a 7 días se obtuvo un módulo elástico de 44.955 MPa y a 28 días de 32252 MPa, lo que representa un decrecimiento del 39%. Este comportamiento decreciente se presenta únicamente en este caso, por tal razón se considera que no muestra veracidad alguna y se decide omitir el análisis de este dato.

En la Figura 42 se presentan los resultados de módulo elástico de los especímenes no vibrados de M2 sometidos a los cuatro regímenes de curado. El resultado más alto fue de 42.762 MPa que corresponde a los cilindros que fueron sometidos al curado normal. Dicho resultado es superior un 6% al del curado ambiente y un 8% al del curado ambiente con tratamiento térmico. Ésta estrecha diferencia significa que para los especímenes sin vibrar de M2 a 28 días han desarrollado una microestructura en la interfaz fibra cemento similar en todos los curados.

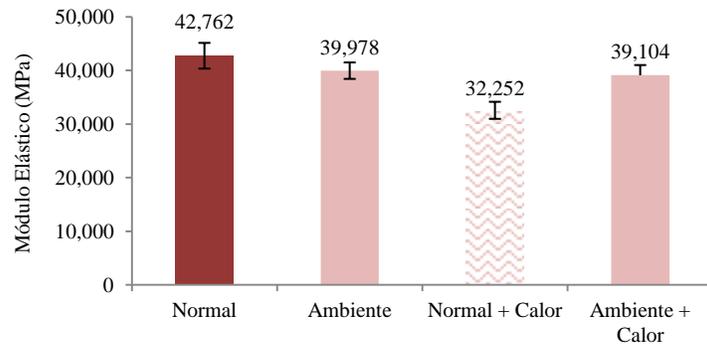


Figura 42. Módulo elástico de especímenes no vibrados de M2 a 28 días.

Nota: El dato del curado normal + calor no será tenido en cuenta en el análisis

En la Figura 43 se presentan los resultados de módulo elástico de los especímenes vibrados de M2 sometidos a los cuatro regímenes de curado. El resultado más alto fue de 42.621 MPa y corresponde a los cilindros que fueron sometidos al curado normal con tratamiento térmico. Éste resultado es superior un 2% al del curado normal, un 13% al del curado ambiente y un 9% al del curado ambiente con tratamiento con calor. La diferencia del 2% entre los dos curados normales, significa que en los especímenes sometidos a curado normal a los 28 días se han generado productos hidratados dentro de la matriz cementicia que permite alcanzar un módulo elástico similar al de los cilindros sometidos a este mismo curado con tratamiento térmico.

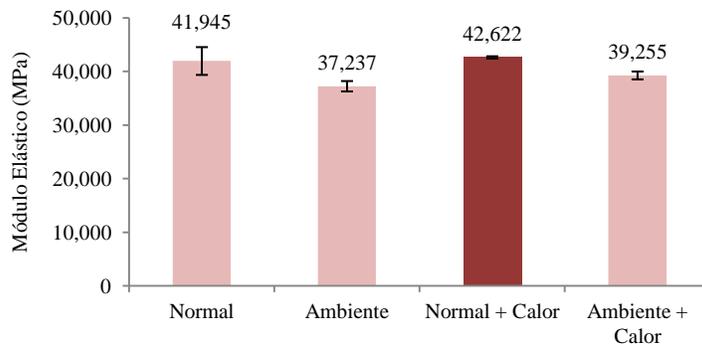


Figura 43. Módulo elástico de especímenes vibrados de M2 a 28 días.

Debido a que la diferencia del módulo elástico entre los cilindros vibrados sometidos a curado normal y los sometidos a curado normal con tratamiento térmico, es del 2%, se puede considerar que para los dos tipos de fabricación el resultado más alto corresponde a los especímenes del curado normal. La diferencia entre los resultados por tipo de

fabricación es del 2%, lo que es considerablemente bajo. Esto debido a que M2 se considerada como una mezcla autocompactable capaz de auto llenar adecuadamente los moldes, sin necesidad de vibrado.

El mayor módulo elástico de M1 a 28 días, 48.045 MPa, corresponde a los cilindros vibrados sometidos a curado normal, mientras que para M2 corresponde a los especímenes sin vibrar sometidos al mismo curado, donde se obtuvo 42.762 MPa. La razón por la que en M1 este resultado es de cilindros vibrados y en M2 de cilindros sin vibrar probablemente sea por la manejabilidad de las mezclas, siendo M1 una mezcla que necesite la ayuda de técnicas de acomodación como el vibrado, mientras que M2 es considerada autocompactable.

Comparando las dos edades de ensayo, 7 y 28 días, se tiene que para la primera los resultados más altos corresponden a los cilindros sometidos a curado ambiente con tratamiento térmico, mientras que para la segunda edad corresponde a los sometidos a curado normal. Esto significa que las condiciones de humedad y temperatura del curado normal permiten una generación continua de productos hidratados, lo que causa un mejoramiento progresivo de la matriz cementicia en el tiempo. Lo anterior trae como consecuencia que a 28 días alcance el mismo valor de módulo elástico de los especímenes que incluyeron tratamiento térmico e incluso los supere. Adicionalmente se tiene que los curados que tienen un menor incremento del módulo elástico entre los 7 y 28 días son los que incluyen tratamientos térmicos, y por otro lado los que presentan un mayor aumento son los del curado normal. Estos comportamientos son similares a lo obtenido por Ahlborn, Harris, Misson, & Peuse (2011), donde además concluye que para especímenes sometidos a tratamientos térmicos el módulo elástico es el mismo desde los 3 días.

(Garas, Kurtis, & Kahn, 2012) Encontraron que los tratamientos térmicos influyen en el módulo elástico, pues mejoran la interfaz de fibra-cemento. Sin embargo la temperatura del tratamiento no es proporcional al incremento que puedan tener el modulo elástico. En su trabajo para un tratamiento térmico de 20 y 90°C obtuvieron 44.000 y 47.000 MPa respectivamente a 28 días. En comparación con los resultados de este trabajo, donde los especímenes vibrados de M1 a 28 días tuvieron en promedio 48.045 y 37.913 MPa para los curados normal, y normal con tratamiento térmico respectivamente, se puede pensar que los

tratamientos térmicos utilizados no brindan una interfaz fibra-cemento lo suficientemente mejorada que permita sobrepasar los resultados obtenidos con el curado normal.

De forma general, a continuación se muestran todos los resultados de módulo elástico a 7 y 28 días para cada curado y tipo de fabricación, para M1 en la Figura 44 y para M2 en la Figura 45.

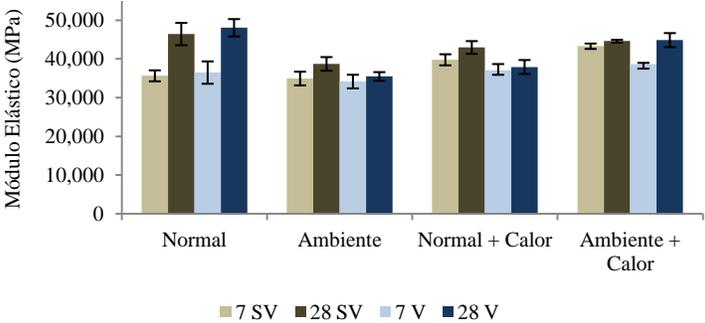


Figura 44. Módulo elástico M1

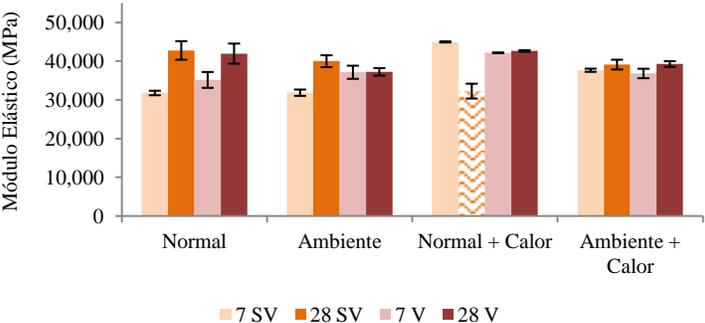


Figura 45. Módulo elástico M2

Constante K para el cálculo del módulo elástico:

Actualmente en la NSR-10, numeral C.8.5.1, se exige el cálculo del módulo elástico a partir de la resistencia a compresión de la siguiente manera: $E_c = K * \sqrt{f'_c}$, donde E_c es el módulo elástico, K una constante equivalente a 4700 para concretos convencionales, y f'_c es la resistencia a compresión del concreto. Con la finalidad de obtener un una formulación similar para el UHPC, se calcularon valores de K para cada tipo de curado como se observa en la Tabla 19. Se obtuvieron constantes inferiores en todos los casos, porque la resistencia a compresión aumenta considerablemente en este tipo de concretos.

Tabla 19. Cálculo de la constante K

	M1		M2		Promedio K	Desv. Est	C.V
	Sin vibrar	Vibrados	Sin vibrar	Vibrados			
Normal	4.810,7	4.614,1	4.566,7	4.016,3	4.502,0	294,9	7%
Ambiente	4.107,3	3.635,3	4.272,5	3.854,4	3.967,4	242,7	6%
Normal + Calor	4.375,3	3.554,3	0	4.021,5	3.983,7	336,2	8%
Ambiente + Calor	4.381,2	4.016,8	3.696,1	3.695,5	3.947,4	282,6	7%

5.3 Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión y la ductilidad en especímenes reforzados con fibras depende principalmente de dos características. En primera medida, la carga del momento de aparición de la primera fisura y el módulo de rotura dependen de la matriz cementicia del UHPC (ACHE, 2000), y lo segundo es el desarrollo de su resistencia residual, ductilidad, que depende de la adherencia que tenga la fibra con la matriz cementicia, particularmente con la zona de interacción interfacial “ITZ” (Cornejo, 2014).

En la Tabla 20 y Tabla 21 se muestran los resultados de resistencia a flexión a 7 y 28 días obtenidos para la M1 y M2 respectivamente.

Tabla 20. Esfuerzo máximo a flexión de M1

Curado	Edad (Días)	Sin Vibrar	Desviación estándar (MPa)	CV (%)	Vibrados	Desviación estándar (MPa)	CV (%)
		Res. Flexión (MPa)			Res. Flexión (MPa)		
Normal	7	16,70	0,72	4,31%	17,85	2,53	14,18%
	28	17,50	0,39	2,21%	20,55	0,78	3,78%
Ambiente	7	10,00	0,99	9,90%	17,30	0,95	5,48%
	28	14,04	0,63	4,48%	20,65	2,05	9,93%
Normal + Calor	7	23,13	2,64	11,43%	21,27	1,20	5,65%
	28	20,95	0,76	3,65%	20,04	0,69	3,46%
Ambiente + Calor	7	13,48	1,01	7,50%	23,26	1,07	4,62%
	28	14,92	0,84	5,65%	18,50	0,22	1,19%

Tabla 21. Esfuerzo máximo a flexión de M2

Curado	Edad	Sin Vibrar Res. Flexión (MPa)	Desviación estándar (MPa)	CV %	Vibrados Res. Flexión (MPa)	Desviación estándar (MPa)	CV %
Normal	7	14,21	1,63	11,45	13,75	1,18	8,59
	28	14,48	0,91	6,30	15,07	1,48	9,81
Ambiente	7	9,13	0,57	6,20	15,52	0,90	5,79
	28	14,46	1,90	13,11	19,57	0,40	2,06
Normal + Calor	7	26,99	0,27	1,00	24,57	2,04	8,32
	28	22,93	0,52	2,25	21,89	0,17	0,78
Ambiente + Calor	7	19,91	2,10	10,55	15,61	0,15	0,95
	28	22,49	0,27	1,19	20,95	1,03	4,93
	28	39104	1266	11,45	39255	735	8,59

5.3.1 Análisis de la resistencia a flexión a 7 días

El resultado más alto de resistencia a flexión en los especímenes de M1 para los dos tipos de fabricación y los cuatro regímenes de curado fue 23.26 MPa, que corresponde a las vigas vibradas sometidas al curado ambiente con tratamiento de calor.

En la Figura 46 se presentan los resultados de resistencia a flexión de los especímenes no vibrados de M1 sometidos a los cuatro regímenes de curado. El resultado más alto fue de 23.13 MPa y corresponde a los cilindros que fueron sometidos al curado normal con tratamiento térmico. Dicho resultado es superior un 28% al del curado normal, un 57% al del curado ambiente y un 42% al del curado ambiente con tratamiento térmico. Las diferencias más altas se tienen con las vigas sometidas a curado ambiente y ambiente con tratamiento térmico. Esto puede deberse a que la exposición a temperatura y humedad relativa del ambiente son condiciones que no permiten el desarrollo de un nivel de adherencia fibra-matriz que si se logra en un curado normal gracias a la hidratación continua causada por el 100% de humedad relativa .

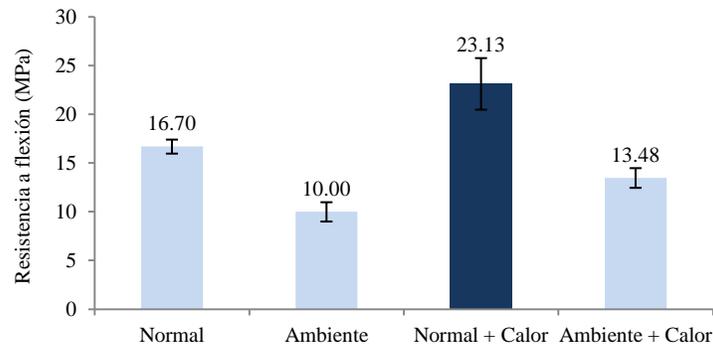


Figura 46. Resistencia a flexión de especímenes no vibrados de M1 a 7 días.

En la Figura 47 se presentan los resultados de resistencia a flexión de los especímenes vibrados de M1 sometidos a los cuatro regímenes de curado. El resultado más alto fue de 23.26 MPa y corresponde a las vigas que fueron sometidos al curado ambiente con tratamiento térmico. Éste resultado es superior un 23% al del curado normal, un 25% al del curado ambiente y un 9% al del curado normal con tratamiento térmico. Lo anterior sugiere pensar que el tratamiento térmico estimula la producción de productos hidratados que mejoran la matriz cementicia, lo que significa una influencia positiva en la resistencia a flexión a los 7 días.

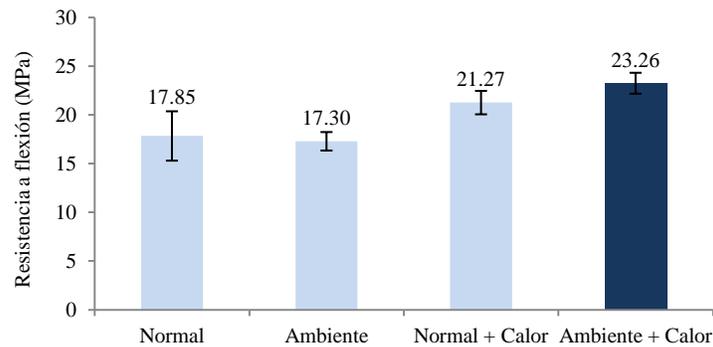


Figura 47. Resistencia a flexión de especímenes vibrados de M1 a 7 días.

A los 7 días la resistencia a flexión de las vigas vibradas de M1 es superior que las no vibradas un 6% para las sometidas a curado normal, un 42% a curado ambiente y un 42% a curado ambiente con tratamiento térmico. Por tanto para los curados sometidos a condiciones ambientales se observa una alta influencia del modo de fabricación.

Por otra parte, los especímenes de M2 que obtuvieron la mayor resistencia a flexión, 26.99 MPa, corresponden a los que no fueron sometidos a vibración y estuvieron en curado normal con tratamiento térmico.

En la Figura 48 se presentan los resultados de resistencia a flexión de los especímenes no vibrados de M2 sometidos a los cuatro regímenes de curado. El resultado más alto fue de 26.99 MPa que corresponde a las vigas que fueron sometidos al curado normal con tratamiento térmico. Dicho resultado es superior un 47% al del curado normal, un 66% al del curado ambiente y un 26% al del curado ambiente con tratamiento térmico, por tanto es evidente la influencia de la inclusión del tratamiento térmico a los 7 días, generada por los productos de las reacciones aceleradas de hidratación.

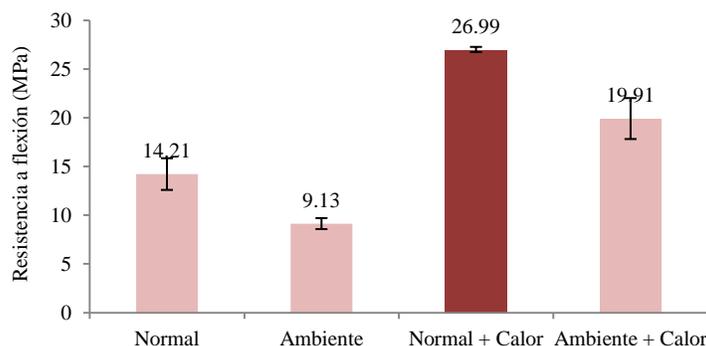


Figura 48. Resistencia a flexión de especímenes no vibrados de M2 a 7 días.

En la Figura 49 se presentan los resultados de resistencia a flexión de los especímenes vibrados de M2 sometidos a los cuatro regímenes de curado. El resultado más alto fue de 24.57 MPa y corresponde a las vigas que fueron sometidos al curado normal con tratamiento térmico. Éste resultado es superior un 44% al del curado normal, un 37% al del curado ambiente y un 36% al del curado ambiente con tratamiento térmico, lo que indica una mejora en la estructura de la matriz por parte de los productos generados por dicho tratamiento. Sin embargo, la inclusión del tratamiento térmico no tiene la misma afectación en los especímenes sometidos a curado ambiente con calor, probablemente porque las condiciones ambientales durante los siguientes días no generan un adecuado curado que permita la causación de reacciones hidráulicas favorables para la matriz cementicia.

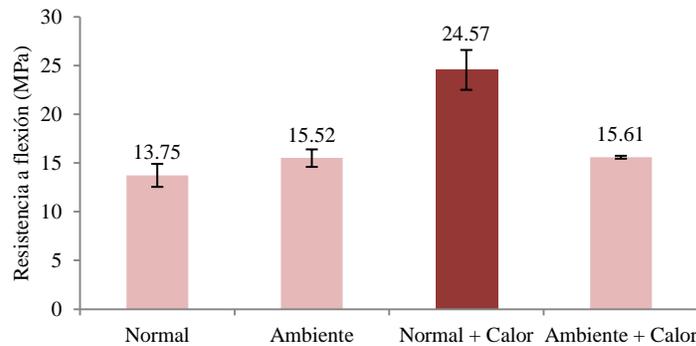


Figura 49. Resistencia a flexión de especímenes vibrados de M2 a 7 días.

Los resultados de resistencia a flexión más altos para los dos tipos de fabricación corresponden a las vigas sometidas a curado normal con tratamiento, siendo superior un 8% los que no fueron vibrados. Con esta diferencia se considera que el modo de fabricación en especímenes de M2 tiene una influencia considerablemente baja en la resistencia a flexión a 7 días, lo que posiblemente esté relacionado con la capacidad a autocompactabilidad de M2.

A continuación se hace una comparación de resultados del presente trabajo con los de (Magureanu, Sosa, Negrutiu, & Heghes, Mechanical Properties and Durability of Ultra-High-Performance Concrete, 2012). Para el curado ambiente con tratamiento de calor incluido a 7 días se obtiene una resistencia a flexión de 23 y 27 MPa para la mezcla 1 y 2 respectivamente. Por otro lado (Magureanu, Sosa, Negrutiu, & Heghes, Mechanical Properties and Durability of Ultra-High-Performance Concrete, 2012) obtuvieron 34 y 23 MPa a 7 días para especímenes de 40x40x160 mm y 100x100x300 mm respectivamente después de haberlos sometido a 5 días a 90°C y 95HR. La diferencia de los resultados radica principalmente en las dimensiones de los especímenes pues el momento flector generado es mayor en elementos más esbeltos, como los de este trabajo, comparados con los de los autores mencionados anteriormente. La otra posible causa que produce la diferencia de resultados es el contenido de fibras, pues los anteriores autores utilizan un 2.55% del volumen del concreto, aumentando su capacidad soportante a esfuerzos traccionales.

5.3.2 Análisis de la resistencia a flexión a 28 días

El resultado más alto de resistencia a flexión en los especímenes de M1 para los dos tipos de fabricación y los cuatro regímenes de curado fue 20.95 MPa, que corresponde a las vigas sin vibrar sometidas al curado normal con tratamiento de calor.

En la Figura 50 se presentan los resultados de resistencia a flexión de los especímenes no vibrados de M1 sometidos a los cuatro regímenes de curado. El resultado más alto fue de 20.95 MPa y corresponde a los cilindros que fueron sometidos al curado normal con tratamiento térmico. Dicho resultado es superior un 16% al del curado normal, un 33% al del curado ambiente y un 29% al del curado ambiente con tratamiento térmico. Las diferencias más altas se presentan con los especímenes sometidos a curado ambiente y ambiente con tratamiento térmico, posiblemente porque las condiciones de temperatura y humedad relativa ambientales no permiten el desarrollo de las reacciones hidráulicas de los materiales aglomerantes, lo que produce una matriz cementicia deficiente comparada con la producida en los curados normal y normal con tratamiento térmico.

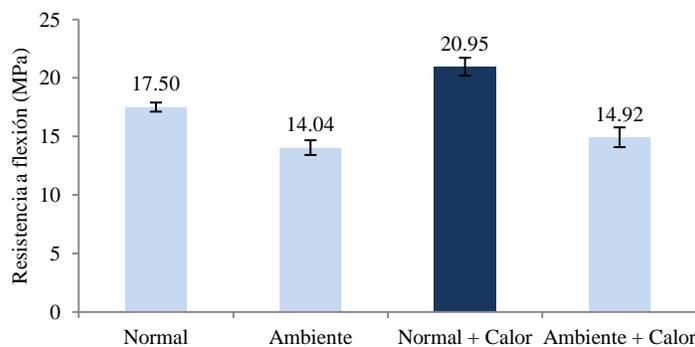


Figura 50. Resistencia a flexión de especímenes no vibrados de M1 a 28 días.

En la Figura 51 se presentan los resultados de resistencia a flexión de los especímenes vibrados de M1 sometidos a los cuatro regímenes de curado. El resultado más alto fue de 20.65 MPa y corresponde a las vigas que fueron sometidos al curado ambiente. Éste resultado es superior un 0.4% al del curado normal, un 3% al del curado normal con tratamiento térmico y un 10% al del curado ambiente con tratamiento térmico. Estas diferencias son considerablemente bajas, por tanto no existiría una influencia del tratamiento de calor sobre la resistencia a flexión a los 28 días. Posiblemente por la

continua producción de productos hidratados en el tiempo, en los especímenes que no fueron sometidos a dicho tratamiento de calor, lo que hace obtener resistencias similares a las de los especímenes que si contaron con este tratamiento.

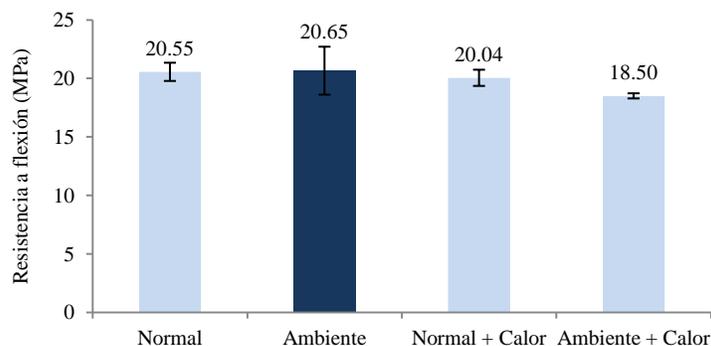


Figura 51. Resistencia a flexión de especímenes vibrados de M1 a 28 días.

Las vigas vibradas de M1 ensayadas a 28 días presentan una resistencia a flexión superior a las no vibradas del 15% en el curado normal, del 32% en el curado ambiente y del 19% en el curado ambiente con tratamiento con calor. Lo anterior posiblemente causado por la eliminación de vacíos y mejor acomodamiento de la mezcla en los moldes que proporciona la vibración, observándose una influencia positiva de esta técnica en M1.

Por otra parte, los especímenes de M2 que obtuvieron la mayor resistencia a flexión, 22.93 MPa, corresponden a los que no fueron sometidos a vibración y estuvieron en curado normal con tratamiento térmico.

En la Figura 52 se presentan los resultados de resistencia a flexión de los especímenes no vibrados de M2 sometidos a los cuatro regímenes de curado. El resultado más alto fue de 22.93 MPa que corresponde a las vigas que fueron sometidos al curado normal con tratamiento térmico. Dicho resultado es superior un 37% al del curado normal, un 37% al del curado ambiente y un 2% al del curado ambiente con tratamiento térmico. Los resultados de vigas sin vibrar de M2 sometidas a tratamiento térmico son en promedio un 37% superiores a los resultados de las vigas que estuvieron únicamente en curado normal y ambiente, por tanto es evidente la influencia de la inclusión del tratamiento térmico a los 28 días.

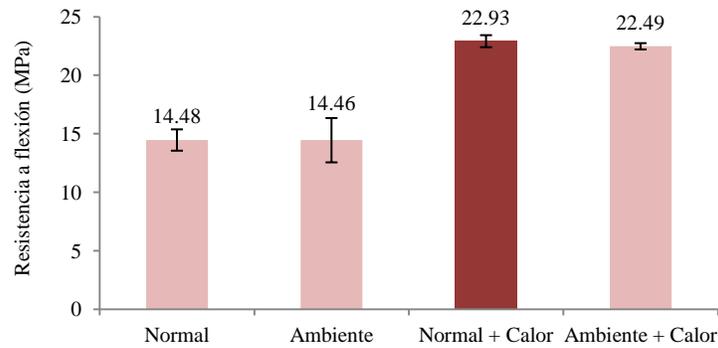


Figura 52. Resistencia a flexión de especímenes no vibrados de M2 a 28 días.

En la Figura 53 se presentan los resultados de resistencia a flexión de los especímenes vibrados de M2 sometidos a los cuatro regímenes de curado. El resultado más alto fue de 21.89 MPa y corresponde a las vigas que fueron sometidos al curado normal con tratamiento térmico. Éste resultado es superior un 31% al del curado normal, un 11% al del curado ambiente y un 4% al del curado ambiente con tratamiento térmico. Esto sugiere una influencia por parte de la inclusión del tratamiento de calor sobre la resistencia a flexión, siendo en el curado normal más notoria que en la del curado ambiente.

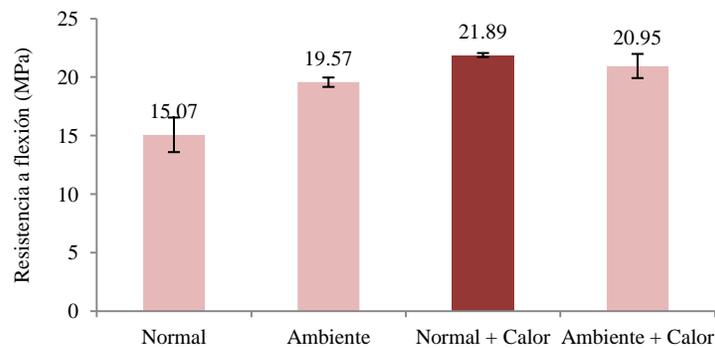


Figura 53. Resistencia a flexión de especímenes vibrados de M2 a 28 días.

Los resultados de resistencia a flexión más altos para los dos tipos de fabricación corresponden a las vigas sometidas a curado normal con tratamiento, siendo superior un 4% los que no fueron vibrados. Con esta diferencia se considera que el modo de fabricación en especímenes de M2 tiene una influencia considerablemente baja en la resistencia a flexión a 28 días, lo que posiblemente esté relacionado con la capacidad a autocompactabilidad de M2.

En las Figura 54 se observa un comportamiento atípico para los curados que incluyen tratamiento de calor. La resistencia a la flexión disminuye de los 7 a los 28 días. Este comportamiento en el curado normal con tratamiento térmico probablemente se deba a un tema de dispersión de datos de las muestras, que para este curado alcanza 2.1 MPa. Sin embargo este comportamiento también puede estar relacionado con el tratamiento térmico. Según Cwirzen (2007) con tratamientos iniciados muy temprano y de corta duración, como los del presente trabajo, se presenta una mayor porosidad respecto a un tratamiento iniciado a los dos días durante 48 horas. Dicho aumento de porosidad está relacionado con la capacidad adherente entre la matriz y la fibra. Adicionalmente, según Yazıcı (2007) para mezclas con proporciones de humo de sílice como las trabajadas, los tratamientos térmicos deben ser prolongados, hasta 12 días. Esto por la alta reactividad puzolanica del humo de sílice, ya que si el tratamiento térmico es demasiado corto, se van a producir silicatos de calcio hidratados en la parte exterior de las partículas de cemento, pero al suspender el tratamiento antes, quedarán silicatos dentro de esas partículas incapaces de difundir la hidratación. Lo anterior da como consecuencia una microestructura defectuosa que probablemente se fragilice con el tiempo afectando directamente la resistencia a flexión, como lo que le sucede al comportamiento de las vigas sometidas a curado normal con tratamiento térmico.

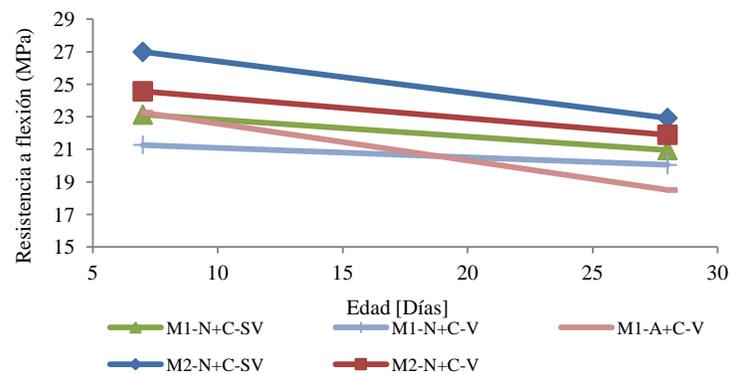


Figura 54. Decrecimiento de la resistencia a flexión de curados con tratamiento de calor en M1 y M2

De forma general, a continuación se muestran todos los resultados del esfuerzo máximo a flexión a 7 y 28 días para cada curado y tipo de fabricación, para M1 en la Figura 55 y para M2 en la Figura 56.

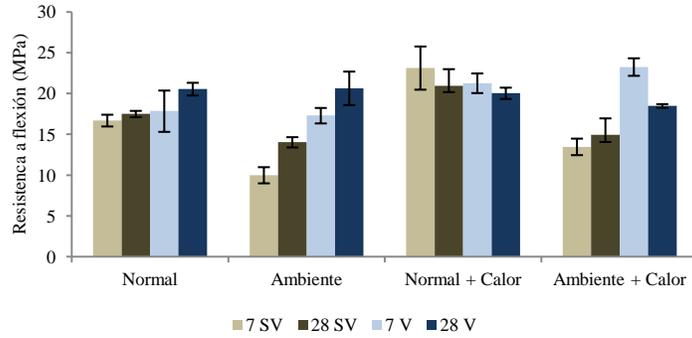


Figura 55. Esfuerzo máximo de M1

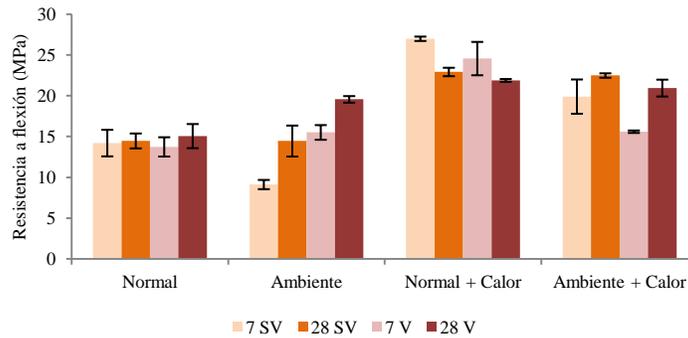


Figura 56. Esfuerzo máximo de M2

Constante K para el cálculo del módulo de rotura a flexión:

Actualmente en la NSR-10, numeral C.9.5.2.3, se exige el cálculo del módulo de rotura a flexión a partir de la resistencia a compresión de la siguiente manera: $f_r = K * \sqrt{f'_c}$, donde f_r es el módulo de rotura, K una constante equivalente a 0.62 para concretos de peso normal, y f'_c es la resistencia a compresión del concreto. Con la finalidad de obtener una formulación similar para el UHPC, se calcularon valores de K para cada tipo de curado como se observa en la Tabla 22. En todos los casos se obtuvieron constantes superiores a la propuesta en la NSR-10, porque el esfuerzo máximo a flexión del UHPC aumenta considerablemente, entre otras cosas por el uso de fibras, respecto a los concretos convencionales.

Tabla 22. Cálculo de la constante K.

	M1		M2		Promedio K	Desv. Estándar	C.V %
	Sin vibrar	Vibrados	Sin vibrar	Vibrados			
Normal	1,81	1,97	1,55	1,44	1,69	0,21	12%
Ambiente	1,49	2,12	1,55	2,03	1,79	0,28	16%
Normal + Calor	2,13	1,88	2,23	2,07	2,08	0,13	6%
Ambiente + Calor	1,47	1,66	2,13	1,97	1,81	0,26	14%

5.3.3 Ductilidad

La primera fisura que aparece en los especímenes a sometidos a flexo tracción depende básicamente de las propiedades de la matriz cementicia y la interfaz agregado-pasta, sin embargo ésta puede tener un incremento adicional gracias a la adición de fibras. El uso de fibras en el UHPC tiene su principal beneficio en el comportamiento post-fisura, las cuales actúan como puentes entre las fisuras, generando un mecanismo de transferencia de esfuerzos. Este mecanismo disminuye la propagación de fisuras, lo que contribuye a la ductilidad del material (Irías, 2013).

En las Figura 57 se observa el comportamiento a flexo-tracción que presentan los especímenes de la mezcla 1 que fueron sometidos a curado ambiente con tratamiento con calor. El vibrado genera una matriz más compacta, con menos vacíos, por tanto se observa un módulo de rotura más alto que el de los especímenes que no han sido vibrados. Adicionalmente se observa una mayor área bajo la curva para los especímenes vibrados, lo que se traduce en mayor ductilidad del material. Lo anterior posiblemente producto de una mejor adherencia entre las fibras y la matriz cementicia compacta, generada por el vibrado.

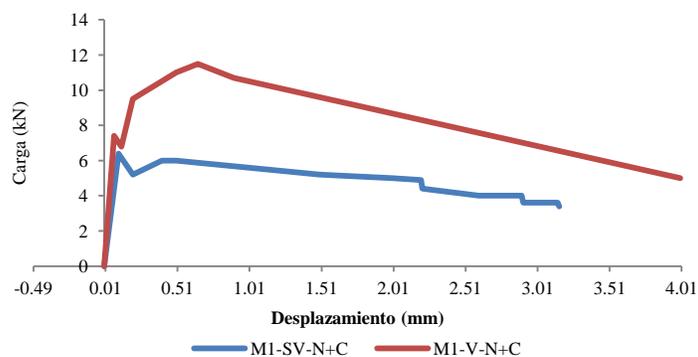


Figura 57. Carga vs Desplazamiento. Especímenes de M1 curados ambiente con tratamiento térmico, 7 días

El comportamiento post fisura en los especímenes vibrados de este trabajo son muy similares a los presentados por Magureanu, Sosa, Negrutiu, & Heghes (2012), a pesar que los valores sean diferentes debido a la diferencia en dimensiones de los especímenes y composición del UHPC. En la serie “M1-V-N+C” se observa un incremento lineal hasta 6.6 kN, cuando se produce la primera fisura. Inmediatamente se observa una caída de la resistencia y a su vez una recuperación de la misma, producto del mecanismo de transferencia entre fibras y matriz. Dicha recuperación, incluso puede superar la resistencia obtenida en la primera fisura, 10.6 kN. Seguido a esto se observa un comportamiento de caídas y recuperaciones de la resistencia, producto del mecanismo de transferencia, conocido como multifisuración. De igual manera que lo menciona (Yang, Joh, & Kim, 2011), cuando los esfuerzos a los que están sometidos superan la capacidad adherente del conjunto matriz y fibras, estas se empiezan a deslizar produciendo una caída de la resistencia de forma dúctil, llegando a 4.3 mm de desplazamiento.

5.4 Comparación de propiedades mecánicas

En este numeral se presenta la evolución de los resultados de 7 a 28 días para cada propiedad mecánica, considerando que a 28 días se obtiene el 100% de cada una. Adicionalmente se muestra la relación que tiene la resistencia a flexión y módulo elástico con la resistencia a compresión, para cada curado y tipo de fabricación en determinada edad. En la Tabla 23 se enseña lo descrito anteriormente para M1 y en la Tabla 24 para de M2. Adicionalmente se presenta dicha evolución de forma gráfica en las Figura 58, Figura 59, Figura 60 y Figura 61 .

Tabla 23. Relación de propiedades mecánicas Mezcla 1- Sin Vibrar y vibradas según tipo de curado

Tipo de curado	Edad	M1 - Sin vibrar					M1- Vibradas				
		Resist. A comp.	Res. Flexión	Relación Res flex/Res. Comp.	Mód. Elástico	Relación Mod. Elást./Res a compresión	Resist. A comp.	Res. Flexión	Relación Rest. flex/Rest. comp.	Mód. Elástico	Relación Mod. Elást./Res t Comp.
Normal	7	0.79	0.95	0.23	0.77	482	0.85	0.87	0.19	0.76	397
	28	1	1	0.19	1	499	1	1	0.19	1	443
Ambiente	7	0.78	0.71	0.14	0.90	503	0.92	0.84	0.20	0.96	390
	28	1	1	0.16	1	436	1	1	0.22	1	373
Normal + Calor	7	0.90	1.10	0.27	0.93	461	1.01	1.06	0.19	0.98	323
	28	1	1	0.22	1	446	1	1	0.18	1	333
Ambiente + Calor	7	1.03	0.90	0.13	0.97	404	1.08	1.26	0.17	0.86	286
	28	1	1	0.14	1	431	1	1	0.15	1	360

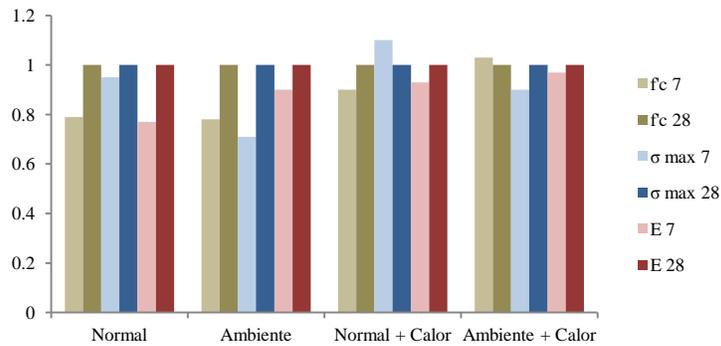


Figura 58. Evolución de las propiedades mecánicas de M1-SV

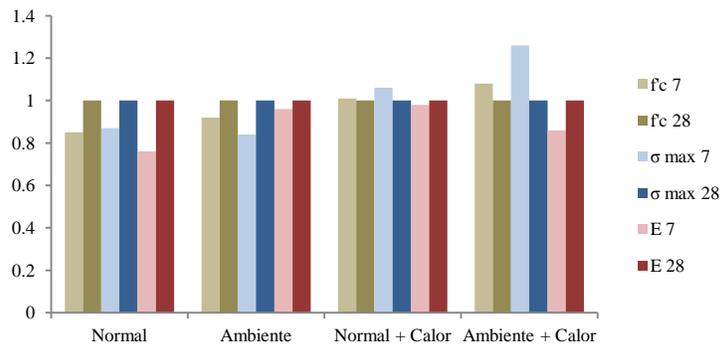


Figura 59. Evolución de las propiedades mecánicas de M1-V

Tabla 24. Relación de propiedades mecánicas Mezcla 2- Sin Vibrar y vibradas según tipo de curado

Tipo de curado	Edad	M2 - Sin vibrar					M2- Vibradas				
		Resist. A comp.	Res. Flexión	Relación Res flex/Res. Comp.	Mód. Elástico	Relación Mod. Elást./Res a compresión	Resist. A comp.	Res. Flexión	Relación Res. flex/Rest. comp.	Mód. Elástico	Relación Mod. Elást./Rest Comp.
Normal	7	0.95	0.98	0.17	0.74	380	0.78	0.91	0.16	0.84	413
	28	1	1	0.17	1	488	1	1	0.14	1	385
Ambiente	7	0.97	0.63	0.11	0.80	377	0.87	0.79	0.19	1.00	456
	28	1	1	0.17	1	457	1	1	0.21	1	399
Normal + Calor	7	0.88	1.18	0.29	1.39	486	0.90	1.12	0.24	0.99	418
	28	1	1	0.22	1	306	1	1	0.19	1	379
Ambiente + Calor	7	0.90	0.89	0.20	0.96	374	0.93	0.75	0.15	0.94	352
	28	1	1	0.20	1	349	1	1	0.19	1	348

Nota: el dato del módulo elástico de M2-Sin vibrar sometidas a curado Normal + Calor a 28 días presenta un decrecimiento atípico, por esta razón se presentan pero no se tienen en cuenta en el análisis.

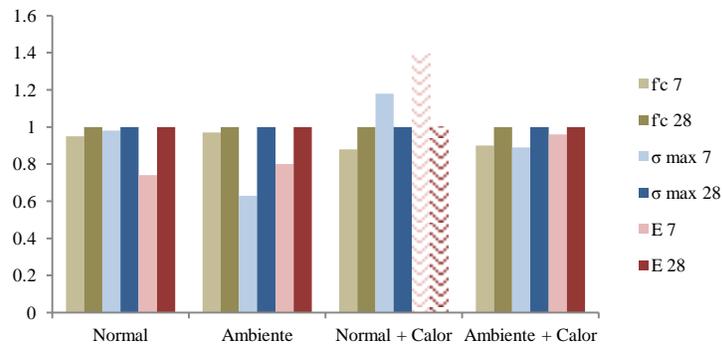


Figura 60. Evolución de las propiedades mecánicas de M2-SV

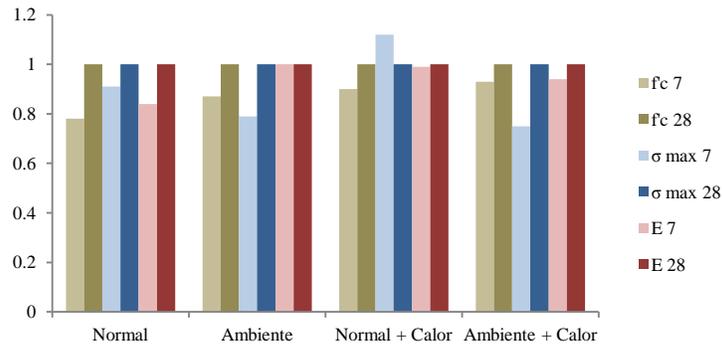


Figura 61. Evolución de las propiedades mecánicas de M2-V

6 CONCLUSIONES Y NUEVAS PROPUESTAS DE INVESTIGACIÓN

6.1 Conclusiones

La influencia del tipo de curado está relacionada con la mejora de la estructura de la matriz cementicia. Dicha mejora es consecuencia de las reacciones hidráulicas de los materiales aglomerantes generadas por las condiciones de humedad y temperatura a las que estén sometidos los especímenes. Además, la inclusión del tratamiento de calor utilizado produce una aceleración en las reacciones hidráulicas y puzolánicas del cemento y humo de sílice, lo cual permite observar su influencia principalmente a edades tempranas. A continuación se presentan las principales conclusiones de la influencia de los diferentes curados sobre cada propiedad mecánica evaluada.

- El tratamiento con calor para los UHPC con materiales colombianos, aporta una pronta resistencia a compresión en las primeras horas de edad del concreto y aunque un curado normal podría llegar a ofrecer el mismo resultado de resistencia a 90 días, el hecho de usar un tratamiento con calor, puede reducir el tiempo de desencofre o desmolde del concreto.
- Las condiciones de temperatura, 23°C, y humedad relativa, 100%, del curado normal generan una mejora continua de la interfaz matriz fibra de las dos mezclas, lo que hace que a 28 días los especímenes sometidos a este curado tengan un módulo elástico similar al de los curados que incluyen tratamiento de calor.
- La inclusión del tratamiento de calor a las vigas de M2 influye sobre la resistencia a flexión a 28 días. Pues las vigas sometidas a curado normal con tratamiento térmico tienen una resistencia a flexión superior a las del curado normal un 37% para el caso de las que no fueron vibradas y del 31% para las vibradas.

La influencia del modo de fabricación de los especímenes está relacionada con la contribución del vibrado a la eliminación de vacíos del concreto al momento de disponerse

en los moldes. Sin embargo, esta contribución afecta de forma diferente a cada tipo de mezcla, dependiendo de la manejabilidad de cada una, curado al que es sometida y propiedad mecánica evaluada. A continuación se presentan las principales conclusiones de la influencia del tipo de fabricación sobre las propiedades mecánicas evaluadas:

- El modo de fabricación presenta una mayor influencia en el UHPC No Autocompactante o M1, debido a que este tipo de mezcla requiere de un modo de acomodamiento para mostrar una mayor resistencia a compresión, diferente es el comportamiento de la mezcla 2 o autocompactante, ya que presenta un mejor acomodamiento de las partículas y el modo de fabricación no aporta de manera significativa.
- Los resultados más altos de módulo elástico de M1 y M2 a 28 días corresponden a los cilindros sometidos a curado normal. En ellos no existe una influencia por el tipo de fabricación, pues la diferencia entre el módulo elástico de cilindros vibrados y no vibrados es del 3% para M1 y del 2% para M2.
- La resistencia a flexión de M1 a 28 días está influenciada por la aplicación del vibrado en la fabricación de las vigas. Especímenes vibrados son mayores que los no vibrados un 15% cuando han sido sometidos a curado normal, un 32% a curado ambiente y un 19% a curado ambiente con tratamiento térmico.

6.2 Nuevas propuestas de investigación

1. Para obtener un mejor desempeño en ductilidad, se propone realizar un estudio de la influencia del material, longitud, y forma de las fibras.
2. Con el objetivo de hacer mezclas de UHPC medioambientalmente sostenibles, se propone investigar en la sustitución porcentual del cemento por materiales alternos como el carbonato de calcio y ceniza volante. En el artículo “The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures” de Halit Yazıcı disminuyen el contenido de cemento hasta 510 Kg/m³

3. Realizar tratamientos de curado iniciando a distintas edades y durante diferentes duraciones, para determinar el grado de hidratación y porosidad generado por cada curado.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHE. (2000). *Manual de Tecnología del Hormigón Reforzado con Fibras de Acero*.
- ACI Committee 308. (1994). Guide to Curing Concrete. *ACI 308R*.
- Ahlborn, M., Harris, D., Misson, L., & Peuse, E. (2011). Strength and Durability Characterization of Ultra-High Performance Concrete Under Variable Curing Conditions. *TRB*.
- Arafa, M., Shihada, S., & Karmout, M. (2010). Mechanical Properties of Ultra High Performance Concrete Produced in the Gaza Strip. *Asian Journal of Materials Science* 2, 1-12.
- Ay, L. (2004). Curing tests on ultra high strength plain and steel fibrous cement based composites in Ultra High Performance Concrete (UHPC). *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*.
- Banthia, N., Majdzadeh, F., Wua, J., & Bindiganavile, V. (2014). Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in flexure and direct shear. *Cement & Concrete Composites*, 91-97.
- Benammar, B., Mezghiche, B., & Guettala, S. (2013). Influence of atmospheric steam curing by solar energy on the compressive and flexural strength of concretes. *Construction and Building Materials*, 511-518.
- Bingöl, F., & Tohumcu, I. (2013). Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self compacting concrete incorporating fly ash and silica fume. *Materials and Design*, 12-18.
- Cornejo, L. (29 de 04 de 2014). *La mejora de las propiedades de los hormigones reforzados con fibras, así como su poder aglomerante y su adherencia*. Recuperado el 2015 de 03 de 23, de Ingeopres: <http://www.ingeopres.es/articulo/la-mejora-de>

las-propiedades-de-los-hormigones-reforzados-con-fibras-asi-como-su-poder-aglomerante-y-su-adherencia/

- Cwirzen, A. (2007). The effect of the heat-treatment regime on the properties of reactive powder concrete. *Advances in Cement Research*, 25-33.
- DH. (1978). *Fibre Cements and fibre Contents*. Chichester: John Willey and Sons, Ltda.
- Dils, J., Boel, V., & De Schutter, G. (2013). Influence of cement type and mixing pressure on air content, rheology and mechanical properties of UHPC. *Construction and Building Materials*, 455-463.
- Ehsan Ghafari, H. C. (2014). Statistical mixture design approach for eco-efficient UHPC. *Cement & Concrete Composites* 55, 17-25.
- FHWA. (2013). *Ultra-High Performance Concrete: A State of the Art Report for the Bridge Community*. McLean, VA.
- Garas, V., Kurtis, K., & Kahn, J. (2012). Creep of UHPC in tension and compression: Effect of thermal treatment. *Cement & Concrete Composites*, 493-502.
- Ghafari, E., Costa, H., & Júlio, E. (2014). RSM-based model to predict the performance of self-compacting UHPC reinforced with hybrid steel micro-fibers. *Construction and Building Materials*, 375-383.
- Graybeal, B. (2006). *Material Property Characterization of Ultra High performance Concrete*. Federal Highway Administration.
- Graybeal, B. A. (2005). *Characterization Of The Behavior Of Ultra-High Performance Concrete*. Maryland: Faculty of the Graduate School of the University of Maryland.
- Graybeal, B., & Baby, F. (2013). Development of Direct Tension Test Method for Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. *ACI MATERIALS JOURNAL*, 177-186.
- Graybeal, B., & Davis, M. (2008). Cylinder or cube: Strength testing of 80 to 200 MPa (11.6 to 29 ksi) Ultra-High-Performance fiber-reinforced Concrete. *ACI Material Journal*, 603-609.

- Habel, K., Viviani, M., Denarié, E., & Brühwiler, E. (2006). Development of the mechanical properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPRFC). *Cement and Concrete Research*, 1362–1370.
- Hop, J., & Tatnal, P. (2009). *Instituto mexicano del cemento y del concreto*. Recuperado el 2015 de 03 de 23, de imcyc: <http://www.imcyc.com/cyt/agosto03/metalicas.htm>
- ICONTEC. (18 de 06 de 2014). NTC 121. *ESPECIFICACIÓN DE DESEMPEÑO PARA CEMENTO HIDRÁULICO*. Bogotá.
- Irías, A. S. (06 de 2013). Refuerzo de elementos estructurales con hormigones con fibras o solo fibras. *Refuerzo de elementos estructurales con hormigones con fibras o solo fibras*. Madrid, España.
- Jianzhong, L., & Wei, S. (2008). Dynamic Mechanical Behavior of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concretes. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater.*, 938-945.
- Kamal, M., Safan, M., Etman, Z., & Salama, R. (2013). Behavior and strength of beams cast with ultra high strength concrete containing different types of fibers. *Housing and Building National Research Center*, 55-63.
- Kosmatka S, P. W. (1988). Design & Control of Concrete Mixtures. *Portland Cement Association*.
- Magureanu, C., Sosa, I., Negrutiu, C., & Heghes, B. (2012). Mechanical Properties and Durability of Ultra-High performance Concrete. *ACI MATERIALS JOURNAL*, 177-183.
- NRMCA. (s.f.). Resistencia a la Flexión del concreto. En *El concreto en la Práctica*.
- Prem, P. R., Bhartkumar, B. H., & Iyer, N. R. (2013). Influence of curing regimes on compressive strength of ultra high performance concrete. *Indian Academy of Sciences*, 1421–1431.

- Puertas, F., & Vázquez, T. (2001). Hidratación inicial del cemento. Efecto de aditivos superplastificantes. *Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC)*, 53-61.
- Ranade, R., Li, V., Stults, M., Heard, W., & Rushing, T. (2013). Composite Properties of High-Strength, High-Ductility Concrete. *ACI MATERIALS JOURNAL*, 413-422.
- Ranjan, P., Bharatkumar, F., & Riyer, N. (2013). Influence of curing regimes on compressive strength of ultra high performance concrete. *Indian Academy of Sciences*, 1421-1430.
- Rodríguez, J. (2006). *Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto*. Recuperado el 06 de 03 de 2015, de IMCYC: <http://www.imcyc.com/cyt/febrero03/autocompactable.htm>
- Sajedi, F., & Razak, H. A. (2011). Effects of curing regimes and cement fineness on the compressive strength of ordinary portland cement mortars. *Construction and Building Materials*, 2036-2045.
- Sukontasukkul, P., Pomchiengpin, W., & Songpiriyakij, S. (2010). Post-crack (or post-peak) flexural response and toughness of fiber reinforced concrete after exposure to high temperature. *Construction and Building Materials*, 1967-1976.
- Wang, C., Yang, C., Liu, F., Wan, C., & Pu, X. (2012). Preparation of Ultra-High Performance Concrete with common technology and materials. *Cement & Concrete Composites*, 538-544.
- Wang, C., Yang, C., Liu, F., Wan, C., & Pu, X. (2012). Preparation of Ultra-High Performance Concrete with common technology and materials. *Cement & Concrete Composites*, 538-544.
- Yang, I., Joh, C., & Kim, B. (2011). Flexural strength of ultra high strength concrete beams reinforced with steel fibers. *Procedia Engineering*, 793-796.
- Yazıcı, H. (2007). The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures. *Building and Environment*, 2083-2089.

- Yi, S.-T., Yang, E.-I., & Choi, J.-C. (2006). Effect of specimen sizes, specimen shapes, and placement directions on compressive strength of concrete. *Nuclear Engineering and Design*, 115-127.
- Yu, R., Spiesz, P., & Brouwers, H. (2015). Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. *Cement & Concrete Composites*, 383-394.
- Zhang, J., Liu, X., Yuan, Y., & Mang, H. (2015). Multiscale modeling of the effect of the interfacial transition zone on the modulus of elasticity of fiber-reinforced fine concrete. *Comput Mech*, 37-55.