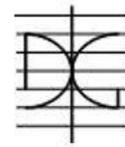




UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



DEPARTAMENTO
DE INGENIERÍA DE
LA CONSTRUCCIÓN
Y DE PROYECTOS DE
INGENIERÍA CIVIL

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DEL HORMIGÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER
CURSO ACADÉMICO 2023/2024

Evaluación del tiempo de trabajabilidad y control del tiempo de fraguado en hormigones de ultra altas prestaciones (UHPC). Análisis de la influencia de los componentes, su dosificación y criterios de fabricación

Autor: Carlos Augusto Aldana Arboleda

Tutor: Pedro Serna Ros

Valencia, marzo de 2024

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA
CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



MUIH

Dedicatoria

PARA TI, MAMÁ

Agradecimientos

Doy gracias a mi madre que siempre me acompaña desde la distancia. Así mismo, agradezco a aquella persona que, desde el inicio, me animó a inscribirme en este máster y nunca dejó de brindarme apoyo y motivación.

Quiero reconocer la valiosa orientación y paciencia del Dr. Pedro Serna Ros, así como la guía y apoyo incondicional de la Dra. María Carmen Castro Bugallo a lo largo de este estudio.

Mis agradecimientos se extienden a todos aquellos que, de una forma u otra, contribuyeron al éxito de este proyecto.

Contenido

Resumen.....	5
Introducción	8
1. Objetivos	10
1.1 Objetivo general.....	10
1.2 Objetivos específicos.....	10
2. Estado del arte	11
2.1 Historia	11
2.2 Tipos de hormigones	12
2.3 Componentes del UHPC	13
2.4 Dosificación de hormigón.....	20
2.5 Propiedades características	23
2.6 Mecanismo de hidratación y trabajabilidad.....	25
2.7 Normatividad.....	30
3. Programa experimental.....	31
3.1 Metodología	34
3.1.1 Evolución de trabajabilidad	35
3.1.2 Tiempos de fraguado	39
3.1.3 Evolución de propiedades mecánicas	46
3.2 Moldes y equipos	48
3.3 Materiales	51
4. Resultados y discusión	55
4.1 Evolución de trabajabilidad.....	55
4.1.1 Ensayos con amasado continuo y prueba de Mini Slump:.....	55
4.1.2 Ensayos con amasado continuo y mesa de sacudidas	58
4.1.3 Ensayos con amasado único y prueba de Mini Slump	61
4.1.4 Ensayos con amasado único y mesa de sacudidas.....	64
4.2 Tiempos de fraguado	66
4.3 Evolución de propiedades mecánicas	70
4.3.1 Ensayo de resistencia a la compresión.....	70
4.3.2 Ensayo de resistencia a la flexo-tracción	71
5. Conclusiones.....	73
6. Futuras investigaciones	75
Referencias.....	76

Lista de figuras

Figura 1. <i>Familias UHPFRC</i>	13
Figura 2. Componentes del UHPC	14
Figura 3. Diferentes formas de utilizar aditivos reductores de agua de alto rango	18
Figura 4. <i>Clasificación de los componentes de la mezcla de UHPC determinada mediante granulometría láser</i>	20
Figura 5. <i>Hormigón tradicional vs UHPC</i>	24
Figura 6. <i>Cambios que tienen lugar en el proceso de hidratación de los silicatos del cemento</i>	25
Figura 7. <i>Volúmenes relativos de los compuestos principales en la microestructura de las pastas de cemento en procesos de hidratación</i>	26
Figura 8. <i>Proceso de hidratación del cemento</i>	27
Figura 9. <i>Resistencia del hormigón según compuestos que participan de la hidratación</i>	27
Figura 10. <i>Tiempo de fraguado para cementos Portland</i>	28
Figura 11. <i>Esquema de trabajo propuesto</i>	33
Figura 12. <i>Mesa de sacudidas</i>	37
Figura 13. <i>Ensayos con amasado continuo y mesa de sacudidas</i>	38
Figura 14. <i>Ensayos con amasado único y prueba de Mini Slump</i>	39
Figura 15. <i>Comportamiento 1</i>	41
Figura 16. <i>Comportamiento 2</i>	42
Figura 17. <i>Comportamiento 3</i>	42
Figura 18. <i>Comportamiento 4</i>	43
Figura 19. <i>Lámina superficial en estado de solidificación (costra)</i>	43
Figura 20. <i>Protección de muestra con tela húmeda</i>	44
Figura 21. <i>Aparato Vicat manual típico</i>	45
Figura 22. <i>Ejemplo probeta prismática</i>	46
Figura 23. <i>Ensayo a flexión</i>	47
Figura 24. <i>Ensayo a compresión</i>	47
Figura 25. <i>Aparato Vicat Manual</i>	48
Figura 26. <i>Probeta prismática</i>	48
Figura 27. <i>Amasadora</i>	49
Figura 28. <i>Molde tronco cónico normalizado (I)</i>	49
Figura 29. <i>Molde tronco cónico normalizado (II)</i>	50
Figura 30. <i>Tubo no normalizado</i>	50
Figura 31. <i>Mesa de sacudidas</i>	50
Figura 32. <i>Prensa para ensayos de flexión y compresión</i>	51
Figura 33. <i>Cemento sulforresistente CEM I, 42.5 R-SR5</i>	52
Figura 34. <i>Áridos silíceos</i>	52
Figura 35. <i>Humo de sílice</i>	53
Figura 36. <i>Aditivos superplastificantes</i>	54
Figura 37. <i>Amasado continuo - Mini Slump (modificación de Finos)</i>	56
Figura 38. <i>Amasado continuo - Mini Slump (modificación de aditivos)</i>	56
Figura 39. <i>Amasado continuo - Mini Slump (modificación aditivo - fino – A/C)</i>	57

Figura 40. Amasado continuo - Mini Slump (consolidado)	58
Figura 41. Amasado continuo - Mesa de sacudidas (modificación de finos)	59
Figura 42. Amasado continuo - Mesa de sacudidas (modificación de aditivos)	59
Figura 43. Amasado continuo - Mesa de sacudidas (modificación aditivo - fino – A/C).....	60
Figura 44. Amasado continuo - Mesa de sacudidas (consolidado).....	61
Figura 45. Amasado único - Mini Slump (modificación de finos).....	62
Figura 46. Amasado único - Mini Slump (modificación de aditivos).....	62
Figura 47. Amasado único - Mini Slump (modificación aditivo - fino – A/C).....	63
Figura 48. Amasado único - Mini Slump (consolidado).....	64
Figura 49. Amasado único - Mesa de sacudidas (modificación de finos).....	64
Figura 50. Amasado único - Mesa de sacudidas (modificación de aditivos).....	65
Figura 51. Amasado único - Mesa de sacudidas (modificación aditivo - fino – A/C).....	65
Figura 52. Amasado único - Mesa de sacudidas (consolidado).....	66
Figura 53. Tiempo de inicio de fraguado.....	67
Figura 54. Tiempo de fin de fraguado.....	68
Figura 55. Tiempo de iniciales y finales de fraguado consolidados.....	68
Figura 56. Muestras con falso fraguado. Izq. M6 RI-S-90NG – M6 – Der. M7 RI-S-20HEXMC.....	69
Figura 57. Tiempo total de fraguado.....	69
Figura 58. Resistencia media a compresión (Mpa).....	71
Figura 59. Resistencia a flexo-tracción (Mpa).....	72
Figura 60. Muestras elaboradas con superplastificante VP-MC-Perma-71 (forma líquida).....	72

Lista de tablas

Tabla 1. Clasificación del cemento Portland en América Latina	15
Tabla 2. Tipos de aditivos y sus funciones	17
Tabla 3. Proporciones de mezcla UHPC de Ductal®	21
Tabla 4. Proporciones de mezcla UHPC de Teichmann y Schmidt.....	21
Tabla 5. Proporciones de mezcla UHPC de CEMTECmultiscale	22
Tabla 6. Los siete productos de la familia de cementos comunes resistentes a los sulfatos	23
Tabla 7. Normas aplicables	30
Tabla 8. Muestra base.....	31
Tabla 9. Resumen nuevas dosificaciones descritas	32

Resumen

El hormigón de ultra altas prestaciones (UHPC) ha revolucionado la industria de la construcción con sus propiedades mecánicas sobresalientes caracterizadas en alta durabilidad y resistencia. En este estudio se buscó evaluar la trabajabilidad y tiempos de fraguado del UHPC a través de modificaciones en la dosificación. Para lograr este objetivo, se realizaron modificaciones en una muestra base de UHPC, evaluando las propiedades mecánicas y reológicas resultantes de estos cambios. El propósito final fue identificar la influencia de los componentes analizados y de los criterios de fabricación en las propiedades fundamentales del UHPC.

El programa experimental se enfocó en revisar el efecto de modificar la dosificación de áridos, aditivos y adiciones en la dosificación base del UHPC. Se emplearon ensayos específicos, como el Mini Slump y la Mesa de Sacudidas para medir parámetros relacionados con la trabajabilidad, y el ensayo de Vicat para los tiempos de fraguado, así como ensayos de compresión simple y flexo-tracción para evaluar propiedades mecánicas. Se destaca la propuesta de usar los tipos de ensayos de trabajabilidad para abordar dos condiciones representativas del mercado: la producción de hormigón premezclado y fabricado in situ con puesta en obra inmediata. Se realizaron los ensayos bajo estas propuestas, consiguiendo adicionalmente identificar la influencia en la trabajabilidad de la agitación constante en el proceso de fabricación y transporte. Este aspecto se revela como una herramienta valiosa para optimizar la trabajabilidad y la fluidez del UHPC.

Con esta investigación se logró identificar que el aumento de materiales cementantes aumenta la resistencia, pero disminuye la trabajabilidad requiriendo más aditivos para su conservación. Un aumento moderado en el contenido de agua mejora la trabajabilidad y la resistencia a la flexo-compresión. Reemplazar finos con arena de sílice prolonga la trabajabilidad. El uso adecuado de superplastificantes mejora la fluidez y las propiedades mecánicas. La agitación constante beneficia la trabajabilidad y la homogeneidad de la mezcla. Destaca la dosificación de la muestra obtenida con la reducción de la cantidad de harina de cuarzo. Los resultados constantemente altos en todas las pruebas indican que esta muestra merece una consideración seria y podría tener un impacto positivo, por lo cual se recomienda realizar estudios con producción de esta dosificación de UHPC a mayor escala.

Summary

Ultra-high-performance concrete (UHPC) has revolutionized the construction industry with its outstanding mechanical properties characterized by high durability and strength. This study sought to evaluate the workability and setting times of UHPC through modifications in the dosage. To achieve this objective, modifications were made to a UHPC base sample, evaluating the mechanical and rheological properties resulting from these changes. The final purpose was to identify the influence of the analyzed components and manufacturing criteria on the fundamental properties of the UHPC.

The experimental program focused on examining the effect of modifying the dosages, aggregates, additives, and supplementary materials in the base mix design of UHPC. Specific tests were employed, such as the Mini Slump and Shaking Table tests to measure parameters related to workability, the Vicat test for setting times, and simple compression and flexural tests to assess mechanical properties. The proposal to use workability tests addressed two market-representative conditions: the production of precast concrete and on-site casting with immediate placement. The tests were conducted under these proposals, additionally identifying the influence of constant agitation in the manufacturing and transportation process on workability. This aspect emerges as a valuable tool for optimizing the workability and fluidity of UHPC.

This research identified that an increase in cementitious materials enhances strength but decreases workability, necessitating additional additives for preservation. A moderate increase in water content improves workability and flexural-compressive strength. Substituting fines with silica sand extends workability. The proper use of superplasticizers enhances fluidity and mechanical properties. Constant agitation benefits workability and mixture homogeneity. Noteworthy is the dosage of the sample obtained with the reduction of quartz flour. Consistently high results in all tests indicate that this sample deserves serious consideration and could have a positive impact; therefore, studies with production at a larger scale are recommended.

Resum

El formigó d'ultra altes prestacions (UHPC) ha revolucionat la indústria de la construcció amb les seves propietats mecàniques excel·lents caracteritzades per la seua alta durabilitat i resistència. En aquest estudi es va buscar avaluar la treballabilitat i els temps d'adormiment de l'UHPC a través de modificacions en la dosificació. Per assolir aquest objectiu, es van fer modificacions en una mostra base d'UHPC, avaluant les propietats mecàniques i reològiques resultants d'aquests canvis. El propòsit final va ser identificar la influència dels components analitzats i dels criteris de fabricació, en les propietats fonamentals de l'UHPC.

El programa experimental es va enfocar a revisar l'efecte de modificar la dosificació d'àrids, additius i addicions en la dosificació base de l'UHPC. Es van emprar assaigs específics, com el Mini Slump i la Taula de Sacsejades per mesurar paràmetres relacionats amb la treballabilitat, i l'assaig de Vicat per als temps de fraguat, així com assaigs de compressió simple i flexotracció per avaluar propietats mecàniques. Es destaca la proposta de fer servir els tipus d'assajos de treballabilitat per abordar dues condicions representatives del mercat: la producció de formigó fabricat en planta per al transport i el fabricat in situ amb posada en obra immediata. Es van fer els assajos sota aquestes propostes, aconseguint addicionalment identificar la influència en la treballabilitat de l'agitació constant en el procés de fabricació i transport. Aquest aspecte es revela com una eina valuosa per optimitzar la treballabilitat i la fluïdesa de l'UHPC.

Amb aquesta investigació es va aconseguir identificar que l'augment de materials cimentants augmenta la resistència, però disminueix la treballabilitat requerint més additius per a la seva conservació. Un augment moderat en el contingut d'aigua millora la treballabilitat i la resistència a la flexocompressió. Reemplaçar fins (farina de sílice) per arena allarga el temps de treballabilitat. L'ús adequat de superplastificants millora la fluïdesa i les propietats mecàniques. L'agitació constant beneficia la treballabilitat i homogeneïtat de la barreja. Destaca la dosificació de la mostra obtinguda amb la eliminació de la quantitat de farina de quars. Els resultats constantment alts en totes les proves indiquen que aquesta mostra mereix una consideració seriosa i podria tenir un impacte positiu, per la qual cosa es recomana fer estudis amb producció d'aquesta dosificació d'UHPC a escala més gran.

Introducción

Durante las últimas décadas el hormigón ha evolucionado constantemente en diferentes aspectos, buscando con ello mejoras sustanciales en sus propiedades, y como parte de esta evolución se ha fabricado en la historia más reciente el UHPC, material que se caracteriza por tener una mayor densificación de la matriz, por sus componentes más finos y su distribución granulométrica controlada, logrando con esto conservar o mejorar las propiedades de su contraparte, los hormigones ordinarios. Las mejoras conseguidas permiten la elaboración de elementos más esbeltos, entre otras ventajas. (Bache, 1993; Cheyrezy et al., 1995; Green et al., 2015).

Para la fabricación de los UHPC se requiere gran variedad de componentes dentro de los cuales se encuentran los aditivos químicos que buscan mejorar las prestaciones. Con la creación de nuevas generaciones de superplastificantes se permite satisfacer las necesidades que se están presentando en el mercado, porque estos materiales mejoran la reología del hormigón (Nkinamubanzi, 2016).

Conjuntamente se ha ampliado el campo investigativo procurando que el UHPC reduzca la generación de CO₂ en la industria de la construcción, que actualmente produce hasta el 8 % del total mundial (Amran et al., 2022). Esta reducción haría del hormigón un material más amigable con el medio ambiente, mediante el uso de materiales más eficientes que mejoren las propiedades y permitan la reducción del cemento necesario para las mismas prestaciones estructurales, requiriendo un menor contenido en clínker para la misma cantidad producida, lo que es coherente con los esfuerzos de sostenibilidad en la construcción. Se busca ver cómo se comportan las muestras enfocadas en disminuir consumos de materiales cementantes.

Ahora bien, al realizar todos estos cambios en los materiales indicados se busca que el UHPC tenga una mayor versatilidad y se pueda emplear en otras industrias de la construcción, de forma similar a como lo realiza la industria de los prefabricados, que actualmente usan hormigones especiales patentados, que se encuentran en la línea de los UHPC.

Las propiedades de trabajabilidad del UHPC y los tiempos de fraguado de la mezcla se convierten en un tema importante de evaluar. En la industrialización, estos tiempos deben ser competitivos. Sin embargo, algunos estudios indican que los tiempos de inicio de fraguado están del orden de los 100 minutos, y fin de fraguado entre 250 a 300 minutos para hormigones ordinarios (Kosmatka et al., 2004), tiempos que son inferiores a los de los UHPC que pueden llegar a 300 - 400 minutos de duración para todo el proceso de fraguado. Así mismo, al momento de realizar variaciones o alteraciones de los componentes fundamentales suele presentar cambios significativos en las propiedades del hormigón (Ge et al., 2023). Con ensayos debidamente estandarizados y normalizados, se podrá conseguir información para identificar los cambios comportamentales en las propiedades.

Con el programa experimental planteado se pretende evaluar el efecto de modificar la dosificación de áridos, aditivos, adiciones y otras fracciones finas en la dosificación base del UHPC, y analizar propiedades relacionadas con el mantenimiento de la trabajabilidad, los tiempos de fraguado y las propiedades mecánicas. Se emplean ensayos específicos, como el Mini Slump, la

Mesa de Sacudidas y el ensayo de Vicat para medir estos parámetros. Es importante destacar que se abordan dos condiciones representativas del mercado: la producción de hormigón premezclado y la fabricación in situ con puesta en obra inmediata. Se realizan ensayos bajo estas condiciones, evaluando la influencia de la agitación constante en el proceso de fabricación. Este aspecto se revela como una herramienta valiosa para optimizar la trabajabilidad y la fluidez del UHPC.

A medida que la industria de la construcción busca soluciones más eficientes y respetuosas con el medio ambiente, la necesidad de comprender y mejorar el UHPC se vuelve cada vez más crítica. Esta investigación no solo contribuye al avance en la comprensión de este material innovador, sino que también tiene el potencial de impulsar la creación de hormigones más versátiles y amigables con el medio ambiente, alineados con los esfuerzos de sostenibilidad en la construcción.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar diferentes dosificaciones para aumentar los tiempos de trabajabilidad en el UHPC y, al mismo tiempo, controlar los tiempos de fraguado con respecto a los productos actualmente disponibles en el mercado. Para lograrlo, se realizaron modificaciones en los componentes de una dosificación base, y se evaluaron las variaciones en el comportamiento reológico y las propiedades mecánicas de las muestras resultantes de estos cambios. El propósito fue identificar la influencia de los componentes analizados y los criterios de fabricación en las propiedades fundamentales de este estudio, con la idea de proponer nuevos criterios de dosificación que tengan en cuenta estos factores.

1.2 Objetivos específicos

- Proponer una serie de dosificaciones de UHPC con variaciones en sus granulometrías de áridos, aditivos y adiciones.
- Realizar una comparación de propiedades mecánicas y reológicas de las muestras fabricadas.
- Proponer una serie de criterios de fabricación que permitan estandarizar el proceso para este estudio.

2. Estado del arte

2.1 Historia

A lo largo de la historia es evidente la constante búsqueda de materiales de construcción que ofrezcan durabilidad, resistencia y facilidad de trabajo. Ejemplos antiguos incluyen el uso de yeso como agente aglutinante, en Egipto desde el sexto milenio a.C., y el uso histórico de la cal por los romanos en construcciones a gran escala, incorporando la puzolana volcánica para resistir el agua salada (Adam, 2005; Bajaber & Hakeem, 2021).

En relación con lo anterior, en el año 15 a.C., el arquitecto Marco Vitruvio destacó la importancia de una meticulosa selección de materiales, proporciones y mano de obra en el hormigón romano (Delatte, 2001), por esto, los romanos adaptaban las dosificaciones de mortero para diferentes estructuras. La investigación reveló que el mortero del Coliseo contenía principalmente cal calcárea, mientras que el mortero de la Cisterna estaba compuesto de material sílice puzolánico (Silva et al., 2005). La cúpula del Panteón (43,4 metros) se erige como un ejemplo supremo del dominio del hormigón romano (Delatte, 2001, p. 109).

Los romanos fueron pioneros en el uso generalizado del mortero a base de cal, revolucionando la albañilería al reemplazar la arcilla y permitir la construcción de hormigón, a gran escala, incluyendo impresionantes bóvedas (Adam, 2005). Aunque no fueron los primeros en utilizar puzolanas reactivas, sus técnicas sistemáticas de aplicación merecen reconocimiento (Silva et al., 2005). Posteriormente, el uso de materiales romanos fue decayendo, dando paso a la construcción con piedra y argamasa (Bajaber & Hakeem, 2021). A pesar del uso generalizado de estos materiales, desde el siglo I a. C. hasta el siglo II d. C., su adopción disminuyó, lo que provocó una pérdida del conocimiento sobre morteros de alta calidad durante la Edad Media. La historia del hormigón moderno comenzó en 1756 con John Smeaton y su evolución continuó a lo largo del siglo XX (Zongjin, 2011).

El hormigón, el material de construcción predominante, se ha transformado en una sustancia químicamente compleja. Ahora integra componentes minerales, aditivos químicos y moléculas orgánicas para mejorar propiedades específicas o abordar limitaciones (Aitcin, 2000, p. 1349). Los recientes desarrollos en la industria del cemento, centrados en mezclas optimizadas, han dado lugar a innovaciones como el Ultra-High-Performance Concrete o en español hormigón de ultra alto rendimiento, abreviado como UHPC (Jaramillo Murcia, 2020).

En 1981, el investigador danés Hans Henrik Bache, en Aalborg Portland, introdujo el "Densified Small Particle", un conglomerado de alta densidad. Luego, en 1986, introdujo el hormigón armado compacto (CRC), una forma especializada de hormigón reforzado con fibras de alto rendimiento (FRHPC) con una resistencia superior a 140 MPa. El CRC presenta un contenido sustancial de microsílíce y proporciones típicamente bajas de agua a aglutinante (Aarup, 2011, p. 2). El CRC se considera una de las primeras formas de UHPC. El término "UHPC" fue acuñado por primera vez por DE Lar y TX a principios de la década de 1990 (Larrard y Sedran, 1994).

Además, hubo una evolución continua, ejemplificada por el desarrollo del hormigón en polvo reactivo (RPC) (Green et al., 2015). RPC es conocido por su alto contenido de humo de sílice y

su muy baja relación agua-cemento. La optimización de la granulometría y el tratamiento térmico fue clave para lograr excelentes propiedades mecánicas y de durabilidad (Cheyrez et al., 1995, p. 1491). Esto implicó eliminar agregados gruesos, optimizar la estructura granulométrica y aplicar presión durante el proceso de endurecimiento. En particular, en 2002, la primera definición oficial de UHPC en Francia se estableció en el documento francés *Recomendaciones provisionales*:

Se refiere a materiales con una matriz de cemento y una resistencia a la compresión característica superior a 150 MPa, posiblemente alcanzando los 250 MPa. Contienen fibras de acero para lograr un comportamiento dúctil y, si es posible, prescindir de la necesidad de refuerzo pasivo. (Hajar et al., 2004, p. 1)

Además, este documento describe varios proyectos en todo el mundo que involucraron esta tecnología. Es importante destacar que la primera estructura de ingeniería diseñada con hormigón de ultra alto rendimiento en el mundo fue el puente peatonal de Sherbrooke, en la ciudad del mismo nombre (Quebec), construido en 1997 (Hajar et al., 2004, p. 1).

2.2 Tipos de hormigones

A lo largo de su historia, el hormigón ha experimentado importantes avances tecnológicos, dando como resultado el desarrollo del UHPC. Por lo tanto, es crucial resaltar otros ejemplos de hormigón que actualmente están disponibles en el mercado y contribuyen a este proceso evolutivo.

- **Hormigón autocompactante (SCC):** Este tipo de hormigones no requiere vibración externa para reorganizar sus partículas, lo que les permite fluir hacia el encofrado o moldes y llenarlo por completo. Esto les permite distribuirse adecuadamente entre las armaduras y otros elementos que componen la estructura que se está hormigonando (Okamuro & Ouchi, 2003).
- **Hormigón de alta resistencia (HSC):** Hormigones que se caracterizan por una alta resistencia a la compresión, del orden de 50 a 100 Mpa. Está orientado a reducir las dimensiones de los elementos y mejorar la durabilidad; además, utiliza materiales finos en grandes cantidades y aditivos para mejorar su durabilidad (Gjørv, 2008). Según la American Concrete Institute (ACI), este hormigón se define como High-Strength Concrete (HSC) y se considera como aquel que tiene una resistencia a la compresión, especificada de 8000 psi (55 MPa) o mayor, y no incluye hormigón impregnado de polímeros, hormigón epóxico ni hormigón elaborado con materiales artificiales, agregados de peso normal y pesado (ACI Committee 363, 2011).
- **Hormigón reforzado con fibra (FRC):** Son hormigones a los que se les añade algún tipo de fibra, comúnmente fibras cortas, aunque los hay de diferentes longitudes y tipos de materiales (vidrio, polímero, acero u otros materiales). La adición de fibras contribuye a mejorar las condiciones de resistencia y ductilidad del hormigón (More & Subramanian, 2022). El hormigón de ultra alto rendimiento (UHPC) suele contener fibras, y entre estos hormigones, la notación más conocida es el Hormigón de Ultra Alto Rendimiento con Fibras (UHPFRC), pero existen diferentes variaciones. El documento "ACI PRC-544.4-18: Guía para el diseño con hormigón reforzado con fibras" proporciona descripciones adicionales sobre este tema (ACI Committee 544, 2018).
- **Hormigones en polvo reactivo (RPC):** Un hormigón con un alto contenido de material fino, su composición consta de cemento Portland ordinario (OPC), humo de sílice, agregados muy finos,

arena con un diámetro medio de grano de 250 μm , cuarzo triturado (con un diámetro medio de grano de 10 μm), lo que permite obtener una matriz altamente densificada y resistencias que superan los 200 MPa (Cheyreyz et al., 1995; Green et al., 2015).

Además de estos, la familia de hormigones del entorno de UHPFRC (Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete) es bastante representativa debido a la variación de sus componentes. Un ejemplo de ello se puede ver en la caracterización del hormigón llevado a cabo en la Universitat Politècnica de València (Camacho, 2010; Cordero Morrobel, 2015) (Figura 1).

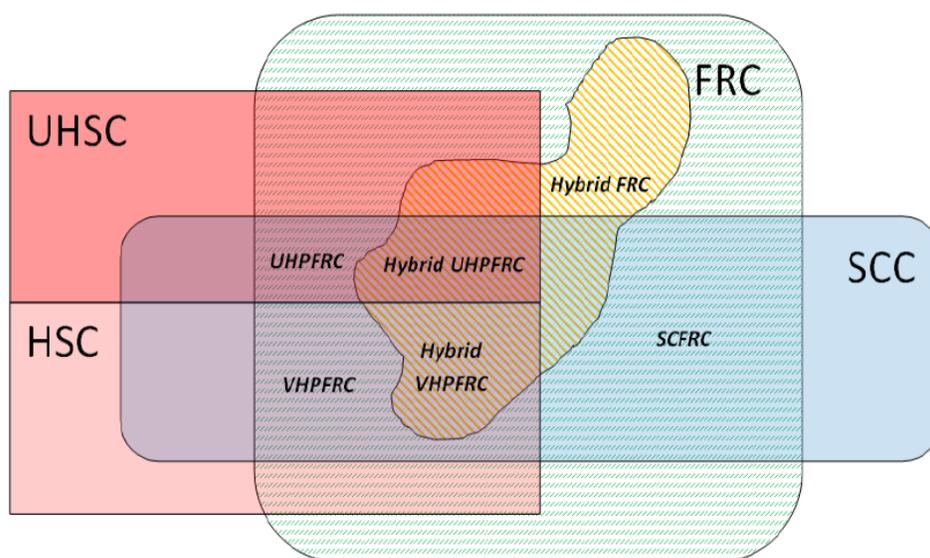


Figura 1. Familias UHPFRC. Fuente: Información tomada de Camacho (2010).

2.3 Componentes del UHPC

El UHPC generalmente se produce con cemento Portland, humo de sílice, arena fina (rango de tamaño de partículas de 75 a 600 μm), polvo de cuarzo, aditivo reductor de agua de alto rango (HRWRA), aceleradores, fibras de acero discretas y agua (Hasan et al., 2022). Así como se han desarrollado diferentes tipos de hormigón, también es evidente que el desarrollo de este material ha causado una revolución en otras industrias que participan activamente en la producción de aditivos, adiciones y otros componentes, que son constituyentes fundamentales del UHPC y, a su vez, mejoran sus propiedades.

Las mezclas de UHPC se desarrollan utilizando una relación agua-material cementante (A/C) muy baja, generalmente inferior a 0,20. El humo de sílice ayuda a mejorar la microestructura al llenar los espacios vacíos con los hidratos secundarios producidos, debido a su reacción con el hidróxido de calcio para formar C-S-H secundarios. El polvo de cuarzo se utiliza para aumentar la reacción puzolánica. Los aditivos reductores de agua de alto rango (HRWRA) se agregan para mejorar la trabajabilidad de la mezcla, mientras que las fibras de acero se utilizan para mejorar la ductilidad a tracción. La selección de cada uno de estos materiales desempeña un papel importante

en el desarrollo de UHPC, que muestra propiedades mecánicas y de durabilidad superiores (Hasan et al., 2022). Sin embargo, existen diferentes variaciones de UHPC debido al contenido de otros aditivos y materiales cementicios desarrollados a lo largo de varios años (Dunuweera & Rajapakse, 2018; Hung et al., 2021).

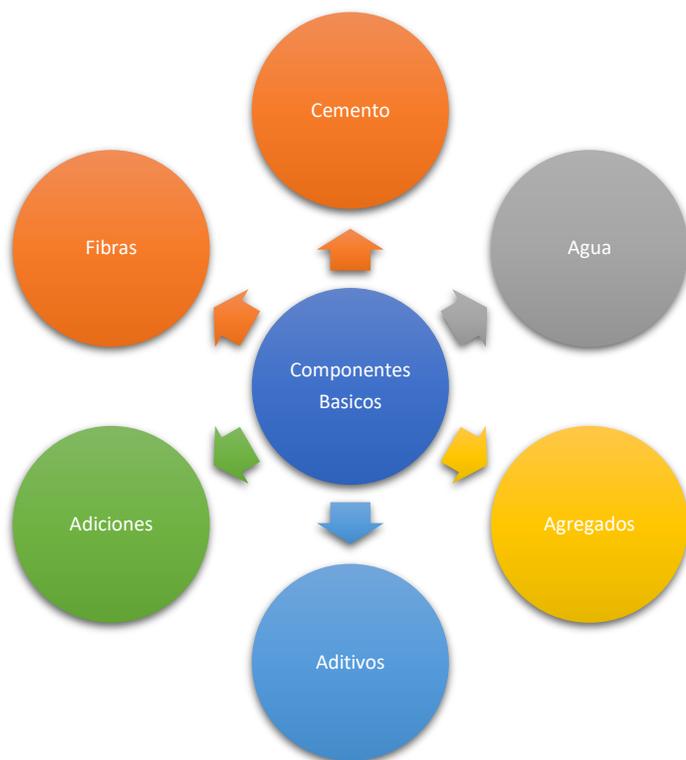


Figura 2. Componentes del UHPC. Fuente: Adaptado de Bajaber and Hakeem (2021).

Cemento: Es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que al mezclarse con agua forma una pasta que fragua y endurece mediante procesos de hidratación y reacciones. Después de endurecerse, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua (Asociación Española de Normalización y Certificación - AENOR, 2012).

El cemento se clasifica y se utiliza en la construcción para diversos tipos de proyectos, razón por la cual existen regulaciones que lo clasifican según sus propiedades, adiciones, usos y otros aspectos, lo que permite su manejo adecuado en la industria. A efectos de este estudio se ha trabajado con la clasificación ofrecida por la Asociación Española de Normalización - Normas Europeas (UNE-EN).

Sin embargo, este sistema de clasificación no es el único; por ejemplo, en la norma ASTM C150/AASHTO M 85 (American Society for Testing and Materials - ASTM, 2022a) existe otra clasificación que enumera cinco tipos de cementos y sus respectivos usos. Asimismo, la ASTM C595/AASHTO M 240 (ASTM, 2021) detalla cementos hidráulicos combinados con algunas adiciones.

También, existen otras clasificaciones de tipos de cemento a nivel mundial; pero, la mayoría están referenciadas a las normas anteriormente mencionadas. Por ejemplo, en Latinoamérica existen las siguientes normas (ver Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación del cemento Portland en América Latina

País	Tipo de Cemento Portland					
	Normal		Moderada resistencia a los Sulfatos		Alta Resistencia Inicial	
	Tipo	Norma	Tipo	Norma	Tipo	Norma
Argentina	CPN	IRAM 50000		IRAM 50001	ARI	IRAM 50001
Bolivia	IF	NB 011	—	—	—	—
Chile	Cemento portland	Nch 148	—	—	ARI	Nch 148
Colombia	I	NTC 121 NTC 321	II	NTC 121 NTC 321	III	NTC 121 NTC 321
Costa Rica	I ²	NCR 40	II ³	NCR 40	III ⁴ o ARI	NCR 40
Ecuador	I	INEN 151 y 152	II	INEN 151 y 152	III	INEN 151 y 152
El Salvador	I	ASTM C 150	—	—	III	ASTM C150
Guatemala	I	NGO41001	—	—	—	—
México	CPO	NMX – C – 414 – ONNCCE	⁵	NMX – C – 414 – ONNCCE	⁶	NMX – C – 414 – ONNCCE
Panamá	I	COPANIT 5	II	COPANIT 5	III	COPANIT 5
Paraguay	I – P	NP 70	—	—	—	—
Perú	I	NTP 334.009	II y MS	NTP 334.009 y NTP 334.082	—	—
Uruguay	P	UNIT 20	—	—	ARI	UNIT 20
Venezuela	I	COVENIN 28	II	COVENIN 28	III	COVENIN 28

País	Bajo Calor de Hidratación		Alta Resistencia a los Sulfatos		Blanco	
	Tipo	Norma	Tipo	Norma	Tipo	Norma
Argentina	⁷	IRAM 50001	ARS	IRAM 50001	—	—
Chile	—	—	—	—	I Blanco	Nch 148
Colombia	—	—	—	—	Portland Blanco	NTC 1362
Costa Rica	IV	NCR 40	V	NCR 40	—	—
Ecuador	—	—	—	—	Blanco	INEN 151 y 152
El Salvador	—	—	—	—	I – Blanco	ASTM C150
Guatemala	—	—	V	NGO41001	Blanco	NGO41001
México	⁸	NMX – C – 414 – ONNCCE	—	—	CPO B	NMX – C – 414 – ONNCCE
Panamá	—	—	—	—	I – Blanco	ASTM C150
Perú	—	—	V	NTP 334.009	Blanco	NTP334.050
Uruguay	BCH	UNIT 1024	—	—	Blanco	UNIT 20
Venezuela	IV	COVENIN 28	V	COVENIN 28	Blanco I	COVENIN 28

Fuente: Adaptado de Kosmatka et al. (2004, p. 47).

Agua: Utilizada tanto para el mezclado como para el curado del hormigón en obra, no debe contener ingredientes nocivos en cantidades tales que afecten a las propiedades del hormigón o a la protección de las armaduras contra la corrosión. En general, podrán utilizarse todas las aguas

sancionadas como aceptables por la práctica (AENOR, 2009; Real Decreto 470, 2021; ASTM, 2003, 2022b).

Es importante destacar que el agua juega un papel relevante en el proceso de hidratación del hormigón.

Agregados: son materiales granulares utilizados en la construcción. Estos pueden ser naturales, artificiales o reciclados (AENOR, 2009). Aunque comúnmente se considera que el agregado es un relleno inerte, esto no siempre es cierto en un entorno de hormigón. Ciertos agregados pueden reaccionar con los hidróxidos alcalinos presentes en el cemento y otros materiales, lo que provoca expansión y deterioro (ACI Committee 201, 2008).

Se han llevado a cabo investigaciones para resaltar la necesidad de optimizar la distribución del tamaño de grano de los materiales cementosos para mejorar la trabajabilidad y la resistencia. Se explica el efecto beneficioso de agregar un polvo tan fino en una mezcla de hormigón debido a que las diminutas partículas de humo de sílice, esféricas y bien dispersas en el sistema cemento-agua pueden desplazar las moléculas de agua de las inmediaciones de los granos de cemento. De esta manera, las moléculas de agua atrapadas entre las partículas de cemento aglomeradas pueden liberarse y contribuir así a fluidificar la mezcla. Desde un punto de vista de los materiales, el hormigón de alto rendimiento no es más que un hormigón con una porosidad muy baja. Esta porosidad extremadamente baja se logra principalmente utilizando mucha menos agua que en el hormigón convencional, de modo que el cemento y las partículas cementicias suplementarias están mucho más cerca entre sí que en las mezclas de hormigón convencionales. A medida que disminuye la porosidad de la pasta, la resistencia del hormigón aumenta, siempre y cuando los agregados, en particular los gruesos, sean lo suficientemente fuertes. Por lo tanto, la selección y la proporción de los ingredientes del hormigón de alto rendimiento es un asunto mucho más crítico que en el caso del hormigón convencional (Aïtcin, 2004).

Además, la producción de hormigón de alta calidad requiere áridos con propiedades fisicoquímicas y mecánicas, distribución granulométrica y forma de árido favorables, de acuerdo con la norma. Esto se debe a que las características de los áridos deben permitir que el hormigón elaborado con ellos alcance la resistencia, durabilidad y demás condiciones requeridas en las especificaciones técnicas del proyecto. (AENOR, 2009; Real Decreto 470, 2021).

Aditivos: Se entienden como sustancias o productos que, cuando se incorporan al hormigón antes de la mezcla (o durante la mezcla o durante mezclas adicionales), en una cantidad que no excede el 5 % del peso del cemento, producen la modificación deseada, en estado fresco o endurecido, de algunas de sus características, propiedades habituales o comportamiento (Real Decreto 470, 2021). Existen diferentes tipos de aditivos químicos, y, al igual que con el cemento, hay diversas clasificaciones (ver Tabla 2).

A continuación, la clasificación de los aditivos según el Real Decreto 470, 2021.

Tabla 2. Tipos de aditivos y sus funciones

Tipo de aditivo	Función principal
Reductores de aguas/ plastificantes	Disminuir el contenido de agua de un hormigón para una misma trabajabilidad o aumentar la trabajabilidad sin modificar el contenido de agua
Reductores de agua de alta actividad / superplastificantes	Disminuir significativamente el contenido de agua de un hormigón sin modificar la trabajabilidad o aumentar significativamente la trabajabilidad sin modificar el contenido de agua
Modificadores de fraguado/ aceleradores, retardadores	Modificar el tiempo de fraguado de un hormigón
Inclusores de aire	Producir en el hormigón un volumen controlado de finas burbujas de aire, uniformemente repartidas, para mejorar su comportamiento frente a las heladas
Multifuncionales	Modificar más de una de las funciones principales definidas con anterioridad
Moduladores de la viscosidad	Limitar la segregación mediante la mejora de la cohesión

Fuente: Real Decreto 470 (2021, p. 97740).

Como se puede ver, existe diversidad de aditivos químicos que permiten mejorar las características del hormigón. Para los efectos e intereses de este trabajo, los aditivos que interesan son los que permiten mejorar la trabajabilidad sin necesidad de que la relación agua-cemento sea muy elevada; son denominados reductores de agua de alta actividad o superplastificantes.

Los superplastificantes son aditivos utilizados para aumentar la trabajabilidad en mezclas de hormigón con bajas relaciones agua-aglomerante (A/C), también conocidos como reductores de agua de alto rango (HRWR, por sus siglas en inglés). Estos aditivos son principalmente a base de éter de policarboxilato. Su función principal es mejorar la fluidez y trabajabilidad del hormigón, permitiendo una mejor colocación y compactación del mismo con menos agua, lo que contribuye a lograr una mayor resistencia y durabilidad en la mezcla.

Los principales tipos de superplastificantes pueden dividirse en primera, segunda y tercera generación. Entre los de primera generación, se pueden encontrar, por una parte, los lignosulfonatos (LS), con una capacidad limitada de reducción de agua de alrededor del 10 %, actualmente se utilizan principalmente en formulaciones para mejorar la retención de la trabajabilidad en aplicaciones de premezclado. También están los condensados de naftaleno formaldehído sulfonados (PNS), también conocidos como polinaftaleno sulfonatos (PNS), tienen una interacción débil con los minerales arcillosos y una capacidad de reducción de agua de hasta un 30 % (Nkinamubanzi, 2016).

En la segunda generación pueden encontrarse los polímeros sintéticos, como los policarboxilatos y los copolímeros acrílicos (PCE) tienen estructuras químicas versátiles y pueden lograr hasta un 40 % de reducción de agua, pero generalmente tienen una baja tolerancia a los minerales arcillosos (Nkinamubanzi, 2016). Por su parte, en la tercera generación están los policarboxilatos y copolímeros acrílicos (PCE), que permiten conseguir mejoras significativas en las propiedades indicadas anteriormente; además, mejoran las características del asentamiento inicial,

se reducen los tiempos de mezclado y se mejora la trabajabilidad, manteniéndola durante más tiempo (Nkinamubanzi, 2016).

La Figura 3 muestra el comportamiento de la pasta de hormigón en el ensayo de mesa de flujo, como lo indica la Especificación Normativa de Mesa de Flujo para uso en ensayos de cemento hidráulico - ASTM C 23. Este ensayo está estandarizado en la norma española UNE-EN 12350-5 (AENOR, 2020), prueba de hormigón fresco parte 5, prueba de Mesa de Sacudidas.

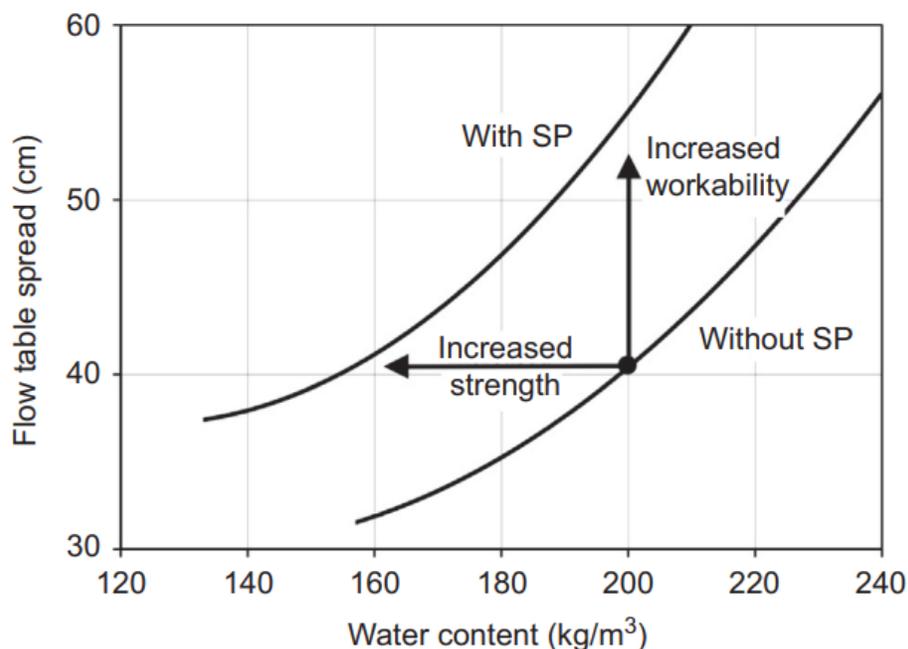


Figura 3. Diferentes formas de utilizar aditivos reductores de agua de alto rango. Fuente: Nkinamubanzi (2016, p. 354).

Sin embargo, cabe señalar que se ha intentado ampliar los estándares de reducción de agua a los superplastificantes y no se ha logrado un resultado consistente, porque se obtiene una amplia variedad de rendimientos con diferentes reductores de agua. Además, las pruebas se llevan a cabo en lechadas y morteros, ya que trabajar con hormigones requiere más tiempo, energía, espacio y materiales, lo que lo hace menos factible. No obstante, estos desarrollos nos han permitido identificar aquellas pruebas como el Mini Slump, la dispersión de flujo y la prueba del cono Marsh, realizadas dentro de los primeros 90 minutos después de la mezcla, permiten evaluar cómo cambian las propiedades reológicas de la muestra. Las dos primeras pruebas se utilizan principalmente para evaluar el límite elástico, y la tercera se utiliza para controlar la viscosidad plástica en el caso de límites elásticos bajos (Nkinamubanzi, 2016).

Adiciones: Se entiende por adiciones aquellos materiales inorgánicos, puzolánicos o hidráulicos latentes que, finamente divididos, pueden añadirse al hormigón con el fin de mejorar algunas de sus propiedades o darle características especiales (Real Decreto 470, 2021).

Como se ha podido observar hasta el momento, cada vez se utilizan más adiciones para la fabricación y producción del hormigón, que en algunos casos provienen de procesos industriales.

Hay varios tipos de adiciones. A continuación, se enumeran las que tienen cierta actividad puzolánica:

- Puzolanas naturales
- Humo de sílice
- Ceniza Volante
- Escoria de alto horno
- Filler Calizo
- Entre otros

En lo que respecta a las adiciones, las normativas existentes suelen ser un poco más complejas. Por lo general, las normas utilizan sus propios sistemas de especificaciones para catalogar, clasificar y autorizar el uso de adiciones en el hormigón. Por ejemplo, en la normativa española existen normas para:

- Cenizas volantes: deben seguir lo indicado en la especificación UNE-EN 450-1
- Humo de sílice: debe cumplir con la especificación UNE 13263-1

Además, dentro de las normas para la determinación del contenido de puzolánicas se encuentran la UNE 80-225, UNE 196-2, UNE 196-5. Asimismo, la norma ASTM incluye, entre otras, las siguientes normas:

- Ceniza volante - puzolana natural calcinada o cruda: debe cumplir con la Especificación C 618 cuando corresponda.
- Escoria granulada de alto horno: debe seguir con la Especificación C 989.
- Humo de sílice: debe estar conforme con la Especificación C 1240.

Humo de sílice: Subproducto de la producción de silicio elemental (Si) y aleaciones de ferrosilicio en hornos de arco eléctrico, derivado del cuarzo, la piedra caliza y el hierro. Se compone de aproximadamente un 95 - 98 % de sílice amorfa (SiO₂) con un diámetro de partícula promedio de 1 µm, lo que significa que contiene partículas más pequeñas que las del cemento.

El uso de este material ultrafino da como resultado una matriz densa que mejora las propiedades mecánicas y la durabilidad del hormigón. Se sabe que contenidos más altos de humo de sílice conducen a una mejor resistencia a la compresión. Esto se debe principalmente a que el humo de sílice llena los espacios vacíos entre las partículas de hormigón y actúa como plastificante, mejorando las propiedades de resistencia a la tracción. En otras palabras, contribuye significativamente a la cohesión de la matriz UHPC.

Sin embargo, aumentar las cantidades de humo de sílice reduce la trabajabilidad y requiere mayores cantidades de agua, para lo cual los aditivos químicos como los superplastificantes contribuyen significativamente. Además, introduce silicatos a la mezcla, dando como resultado una menor proporción de aluminatos, lo que provoca un retraso en el inicio del proceso de fraguado debido a la mayor necesidad de agua durante la hidratación.

Las proporciones utilizadas en el hormigón oscilan entre el 10 % y 30 % de la masa de cemento; es decir, 150-250 kg/m³. Se debe tener cuidado con las proporciones porque lo que se busca es que funcione como relleno y no que el exceso de humo de sílice genere silicatos (Bajaber & Hakeem, 2021).

Harina de cuarzo: El tamaño de partícula de la harina de cuarzo (SiO_2 cristalino) se encuentra entre el tamaño de los granos de cemento y el humo de sílice, lo que lo convierte en un componente favorable para la distribución del tamaño de partícula de UHPC, contribuyendo a la densificación de la matriz. Al igual que el humo de sílice, retarda el proceso de fraguado, lo que requiere una proporción de agua más alta (Mazanec et al., 2010).

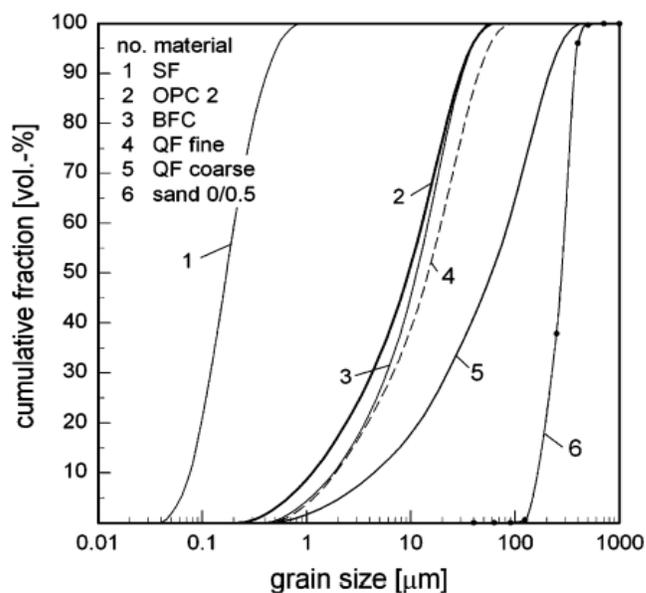


Figura 4. Clasificación de los componentes de la mezcla de UHPC determinada mediante granulometría láser. Fuente: Mazanec et al. (2010, p. 359).

2.4 Dosificación de hormigón

La mezcla de UHPC, en general, es un proceso algo diferente a la mezcla de hormigón convencional. El UHPC específicamente incluye una cantidad limitada de agua y poco, o incluso ningún, agregado grueso (ACI Committee 239, 2018). El principio más importante para producir UHPC incluye: 1) mejora de la microestructura, 2) aumento de la homogeneidad, 3) reducción de la porosidad, 4) excelente hidratación y 5) mejora de la resistencia (Mishra & Singh, 2019). Por esta razón, el UHPC requiere una mayor cantidad de energía de mezcla, tanto para dispersar el agua como para superar la baja acción de mezcla interna, debido a la falta de agregado grueso (ACI Committee 239, 2018).

Un proceso de mezclado típico implica primero cargar la mezcladora con los componentes secos y asegurarse de que estén completamente mezclados. A continuación, se añaden y dispersan el agua y las mezclas líquidas. La mezcla continúa, a veces durante un período prolongado dependiendo de la entrada de energía del mezclador, hasta que el UHPC cambia de un polvo seco a una mezcla fluida (ACI Committee 239, 2018).

En la dosificación de este tipo de hormigones se utiliza una cantidad importante de cemento, que oscila entre 700 y 1100 kg/m³. Esta cantidad es considerablemente mayor que la

utilizada en el hormigón ordinario, lo que conduce a un notable aumento del calor de hidratación y de la contracción autógena. Además, como se mencionó anteriormente, se incluyen varios tipos de materiales como componentes de la mezcla, lo que da como resultado una amplia variedad de dosificaciones disponibles en el mercado. A continuación, se presentan algunas de estas dosificaciones que forman parte de la evolución de los hormigones modernos.

Tabla 3. *Proporciones de mezcla UHPC de Ductal®*

Material	lb/yd³	kg/m³	Percentage by Weight
Portland Cement	1,200	712	28.5
Fine Sand	1,720	1,020	40.8
Silica Fume	390	231	9.3
Ground Quartz	355	211	8.4
HRWR	51.8	30.7	1.2
Accelerator	50.5	30.0	1.2
Steel Fibers	263	156	6.2
Water	184	109	4.4

Fuente: Pagán-Ortiz (2013, p. 5). Nota: Ductal® Dosage, una patente que nace de la investigación de Lafarge, Bouygues y Rhodia (Fehling et al., 2014; Pimienta & Chanvillard, 2005).

Otro ejemplo es el estudio de Teichmann y Schmidt (ver Tabla 4), donde proponen dos mezclas:

- La mezcla 1 tuvo un tamaño de agregado máximo de 0,32 pulgadas (8 mm) proporcionado por la arena.
- La mezcla 2 tuvo un tamaño de agregado máximo de 0,32 pulgadas (8 mm) proporcionado por el basalto.

Tabla 4. *Proporciones de mezcla UHPC de Teichmann y Schmidt*

Material	Mix 1		Mix 2	
	lb/yd³	kg/m³	lb/yd³	kg/m³
Cement	1,235	733	978	580
Silica Powder	388	230	298	177
Fine Quartz 1	308	183	503	131
Fine Quartz 2	0	0	848	325
HRWR	55.5	32.9	56.2	33.4
Sand	1,699	1,008	597	354
Basalt	0	0	1,198	711
Steel Fibers	327	194	324	192
Water	271	161	238	141
Water-Binder Ratio	0.19	0.19	0.21	0.21

Fuente: Pagán-Ortiz (2013, p. 7).

Otro, el CEMTEC multiscale desarrollado por el Grupo Vicat, donde investigadores liderados por Rossi, en el Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) de París, desarrollaron un material de clase UHPC (Pagán-Ortiz, 2013).

Tabla 5. *Proporciones de mezcla UHPC de CEMTECmultiscale*

Material	lb/yd³	kg/m³
Portland Cement	1,770	1,050
Sand	866	514
Silica Fume	451	268
HRWR	74	44
Steel Fibers	1,446	858
Water	303	180

Fuente: Pagán-Ortiz (2013, p. 8).

Estas dosificaciones ratifican lo indicado anteriormente respecto a los componentes de un UHPC:

- Gran cantidad de cemento
- Aditivos superplastificantes
- Áridos silíceos
- Adiciones:
 - Harina de cuarzo – en algunas dosis
 - Humo de sílice
 - Otros
- Fibras

Teniendo presente la gran variedad de dosificaciones existentes en el mercado, y con el ánimo de contar con una buena dosificación que se pueda reproducir con los materiales de laboratorio y usarla como dosificación base, se trabajará con el estudio Dosage Optimization and Bolted Connections for UHPFRC Ties, realizado en la UPV por Esteban Camacho Torregrosa (2013), como parte del programa de tesis doctoral, donde se recopilieron más de 110 dosificaciones de diferentes autores.

Según el estudio anterior, los cementos generalmente utilizados para UHPC son cementos Portland, bajos en álcalis CEM I de clases de resistencia 42,5 R y 52,5 R según DIN EN 196, preferiblemente con una alta resistencia a los sulfatos y un bajo calor de hidratación (HS /N / A). Estos cementos son ventajosos porque, a pesar de su alto potencial de resistencia y del alto contenido de cemento de UHPC de grano fino (700–850 kg/m³), el requerimiento de agua y la contracción química son limitados y la posibilidad de una reacción álcali-sílice es prácticamente inexistente (Fehling et al., 2014).

Como se vio, existen diferentes tipos de cementos. Para este estudio se tomó uno de la clasificación de los productos de la familia de cementos con resistencia a los sulfatos, indicados en la norma EN-197-1 (ver Tabla 6).

Tabla 6. Los siete productos de la familia de cementos comunes resistentes a los sulfatos

Main types	Notation of the seven products (types of sulfate resisting common cement)		Composition (percentage by mass ^a)				
			Main constituents				Minor additional constituents
			Clinker K	Blast furnace slag S	Pozzolana natural P	Siliceous fly ash V	
CEM I	Sulfate resisting Portland cement	CEM I-SR 0 CEM I-SR 3 CEM I-SR 5	95 – 100				0 – 5
CEM III	Sulfate resisting blast furnace cement	CEM III/B-SR	20 – 34	66 – 80	-	-	0 – 5
		CEM III/C-SR	5 – 19	81 – 95	-	-	0 – 5
CEM IV	Sulfate ^b resisting pozzolanic cement	CEM IV/A-SR	65 – 79		← --- 21 – 35 --- →		0 – 5
		CEM IV/B-SR	45 – 64		← --- 36 – 55 --- →		0 – 5

^a The values in the table refer to the sum of the main and minor additional constituents.

^b In sulfate resisting pozzolanic cements, types CEM IV/A-SR and CEM IV/B-SR, the main constituents other than clinker shall be declared by designation of the cement (for examples, see Clause 8).

Fuente: Adaptado de AENOR (2012, p. 18).

2.5 Propiedades características

Durante la investigación y desarrollo del UHPC, este ha demostrado características superiores en comparación con el hormigón convencional (OC) o el hormigón de alta resistencia, entre otros. Las que se han vuelto más populares son su alta resistencia y gran durabilidad. A continuación, se presentan algunas de sus características.

Alta resistencia a la compresión: El UHPC es un material que alcanza resistencias a la compresión, donde se logra una resistencia a compresión especificada de al menos 120 MPa (17 000 psi), con un tamaño máximo nominal de agregado de menos de 5 mm [1/4 de pulgada] y un flujo entre 200 y 250 mm [8 y 10 pulgadas] (ASTM, 2017, p. 1).

En otras palabras, con este material se pueden construir estructuras más esbeltas y lograr un mejor rendimiento bajo cargas sísmicas, de impacto y explosión, en comparación con el hormigón convencional. Además, investigadores e ingenieros han estado evaluando ampliamente el uso de UHPC en estructuras de nueva construcción, refuerzo estructural y rehabilitación e infraestructura civil (Hung et al., 2021). La diferencia significativa con respecto al hormigón convencional radica en su dosificación, que implica el uso de aditivos reactivos con granos muy finos, como humo de sílice y cuarzo fino, entre otros, así como superplastificantes. Esto da como resultado un mayor contenido de aglomerante y una baja relación agua-aglomerante.

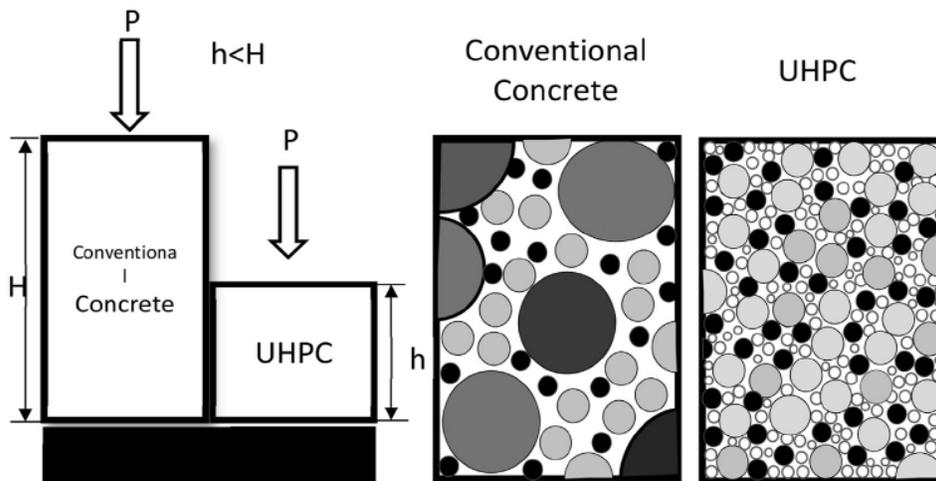


Figura 5. Hormigón tradicional vs UHPC. Fuente: Bajaber & Hakeem (2021, p. 1060).

A pesar de todas estas ventajas, también tiene algunos inconvenientes. La producción de UHPC requiere una cantidad muy alta de contenido de aglutinante (800-1000 kg/m³), lo que afecta su calor de hidratación junto con su costo de producción. Su complicado diseño de mezcla y su altísimo costo de fabricación han limitado su uso únicamente a estructuras de masa. De ahí que se requieran estudios para superar estos inconvenientes y convertirlo en un material de construcción económico y eficiente (Mishra & Singh, 2019).

Densidad de empaquetamiento de partículas: La resistencia a la compresión y a la tracción del UHPC se obtiene mediante una alta densidad de empaquetamiento de las partículas. Las altas densidades de empaquetamiento requieren una dispersión eficiente de las partículas finas en los aglomerados y la combinación del cemento y las adiciones minerales durante el proceso de mezclado (Mazanec et al., 2010).

Resistencia a la tracción: El UHPC puede reconocerse como una clase especial de compuestos cementosos, reforzados con fibra de alto rendimiento, que presentan un comportamiento pseudoplástico elástico o de endurecimiento por deformación acompañado de grietas estrechas y muy espaciadas, comúnmente conocidas como respuesta de agrietamiento múltiple (Hung et al., 2021).

La resistencia a la tracción del UHPC es mayor que la del hormigón convencional, y el UHPC puede exhibir una resistencia a la tracción sostenida después del primer agrietamiento. Por lo tanto, los resultados de las pruebas de resistencia a la tracción del UHPC a menudo informan un valor de la primera resistencia al agrietamiento, así como un valor máximo de resistencia al agrietamiento. En consecuencia, la resistencia a la tracción cobra cada vez más importancia como propiedad a considerar en el diseño (Pagán-Ortiz, 2013).

2.6 Mecanismo de hidratación y trabajabilidad

El mecanismo de hidratación del cemento está conformado por una serie de fases y etapas, dentro de las cuales se desarrollan una serie de procesos químicos acoplados entre sí, los cuales van regidos por unas velocidades que dependerán del estado del sistema en cada instante. Ocurre cuando se agrega agua (H₂O) a la mezcla y reacciona con los minerales, principalmente, Belita (C₂S), Alita (C₃S), Celita (C₃A) y Brownmillerita (C₄AF).

La alita constituye del 50 % hasta el 70 % del clínker, mientras que la belita es responsable por sólo el 15 % hasta el 30 %. Los compuestos de aluminato constituyen aproximadamente del 5 % al 10 % del clínker, y los compuestos de ferrita del 5 % al 15 % (Kosmatka et al., 2004). Se muestra a continuación la curva de generación de calor que se da durante la hidratación del cemento, proceso conformado por cinco etapas, en el cual interactúa cada una de las fases indicadas.

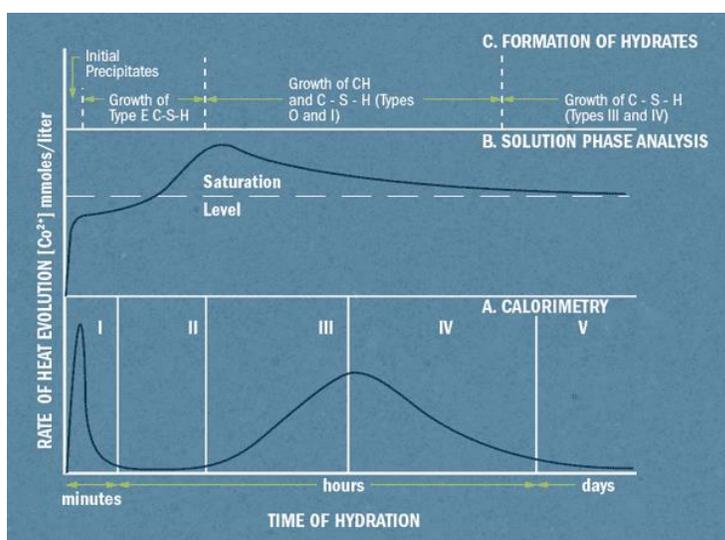


Figura 6. Cambios que tienen lugar en el proceso de hidratación de los silicatos del cemento. Fuente: Tomado de 360 En Concreto (s.f., s.p.).

Es pertinente indicar los nombres de las etapas (Figura 6), aunque estos pueden variar según los autores (Kosmatka et al., 2004):

- Inducción o preinducción: Inicio de humedecimiento o hidrólisis inicial debido al primer contacto del agua con los silicatos del cemento; aumento del calor interno del hormigón.
- Latencia: Periodo de inactividad, conocido también como periodo de incubación; se caracteriza por baja concentración hidratos. Es acá donde el hormigón se encuentra en estado plástico y presenta muy buena trabajabilidad.
- Endurecimiento: Este periodo es conocido como tiempo de fraguado. Acá se presenta el endurecimiento del hormigón, por lo cual es fundamental tener claridad sobre dos conceptos: el Initial set y el final set, debido a que durante el intervalo entre estos dos tiempos se contará con la plasticidad suficiente para moldear y acomodar el hormigón a necesidad.

Ahora bien, se conoce como principio de fraguado al momento en el cual se empieza a desarrollar una resistencia en el hormigón y aún conserva características plásticas, y el fin del fraguado viene dado por la pérdida de plasticidad del hormigón lo que, a su vez, implica una resistencia mayor que imposibilita la maniobrabilidad de la mezcla. La norma UNE-EN 197-1:2011 indica que los tiempos de inicio de fraguado para cementos de clase resistente 32.5, 42.5 y 52.5 son ≥ 75 ; ≥ 60 y ≥ 45 min y no se fijan tiempos de fin (AENOR, 2012).

Para la identificación del tiempo de fraguado se cuenta con diversas pruebas, por ejemplo, desarrollo de calor de hidratación, resistividad eléctrica, medidas de consistencia, transmisión de ultrasonidos, ensayo de vicat, etcétera.

- Enfriamiento: Desaceleración de la formación de productos de hidratación, se habla de resistencia inicial.
- Densificación: Se continuarán formando productos de hidratación, pero en menor medida. Es una etapa de estabilización y la velocidad de hidratación es baja.

En la Figura 7, se muestra también el comportamiento de cada uno de los compuestos durante el proceso de hidratación.

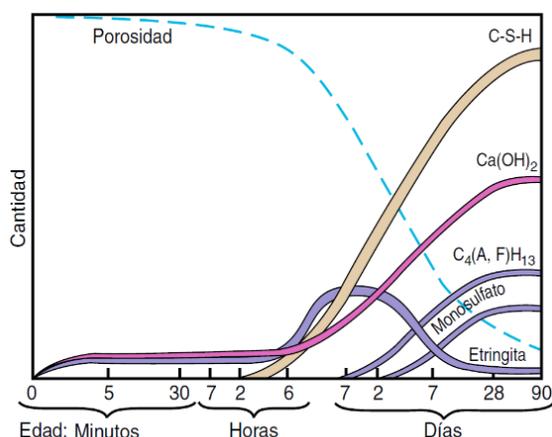


Figura 7. Volúmenes relativos de los compuestos principales en la microestructura de las pastas de cemento en procesos de hidratación. Fuente: Kosmatka et al. (2004, p. 55).

Esta información permite identificar los compuestos que se van formando en el tiempo. Se observa que, luego de finalizado el tiempo de fraguado, el componente C3S es el que más proporción representa en el hormigón. Además, se visualiza el comportamiento de la portlandita, los monosulfatos, la etringita entre otros.

Es importante notar, además, cómo la porosidad empieza a disminuir dentro de la matriz del hormigón, lo cual va directamente relacionado con el proceso de hidratación y el relleno de poros por parte de los nuevos minerales, que van surgiendo de las reacciones químicas durante el proceso de hidratación.

Así mismo, se puede ver de forma individual el grado de hidratación de cada uno de los compuestos, y cómo, al pasar el tiempo, su consumo se va estabilizando, lo cual es consecuente con la etapa 5, indicada en la curva de calor de hidratación mostrada anteriormente.

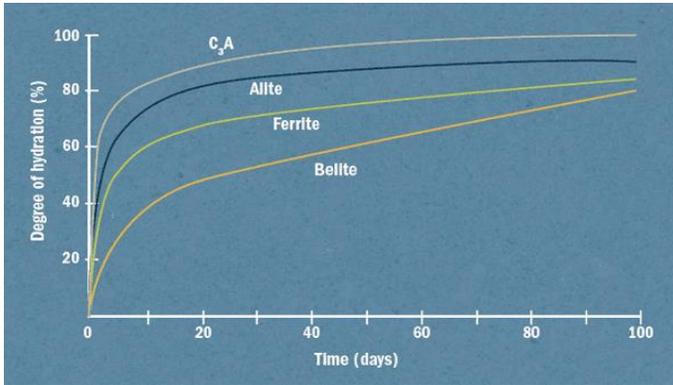


Figura 8. Proceso de hidratación del cemento. Fuente: Tomado de 360 En Concreto (s.f., s.p.).

Finalmente, la Figura 9 permite ver de forma consolidada el aporte en la resistencia del hormigón de cada uno de los compuestos que participan del proceso de hidratación.

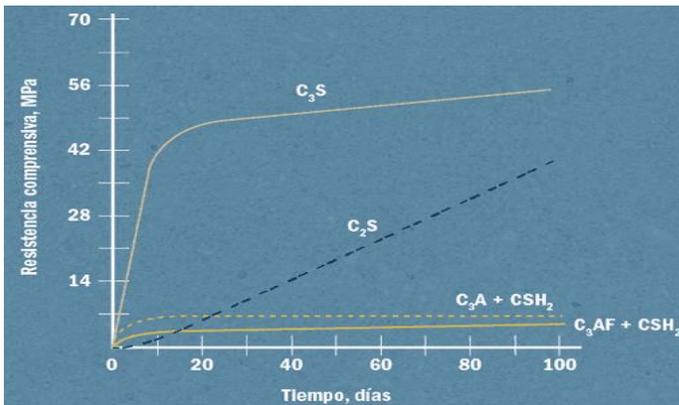


Figura 9. Resistencia del hormigón según compuestos que participan de la hidratación. Fuente: 360 En Concreto (s.f., s.p.).

Ahora bien, como se pudo observar en la Figura 6, durante el proceso de hidratación del hormigón las etapas 2 y 3 son fundamentales para la trabajabilidad de este; es decir, son estos dos periodos los que permitirán transportar y conformar el hormigón en el sitio requerido antes de que se solidifique. De allí la importancia de identificar los tiempos del proceso de fraguado, con el fin de que se pueda disponer debidamente y así evitar la generación de fisuras.

No obstante, es importante tener presente que se puede presentar falso fraguado o endurecimiento rápido, el cual se puede deber a varios motivos: precipitación de etringita o rápida cristalización y entrelazamiento de estructuras en forma de agujas con el yeso secundario, o deshidratación de sulfatos al momento del mezclado; se caracteriza por pérdida de plasticidad sin evolución de la temperatura. Es posible realizar mezclado nuevamente sin adicionar ningún otro componente y recuperar la trabajabilidad de la mezcla. Dentro de los factores que pueden influir en los tiempos de fraguado se encuentran:

- Relación agua/conglomerante con baja proporción de agua; implicará menos tiempo de fraguado.

- Contenido de cemento implicaría que: a mayor cantidad de cemento es mayor la disponibilidad de silicatos para reaccionar con el agua, generando más silicatos hidratados y, así mismo, menor tiempo de fraguado.
- La composición del cemento, la cantidad de clínker y su composición, el contenido de yesos (sulfato cálcico), de aluminato tricálcico, entre otros, pueden generar variaciones en el fraguado.

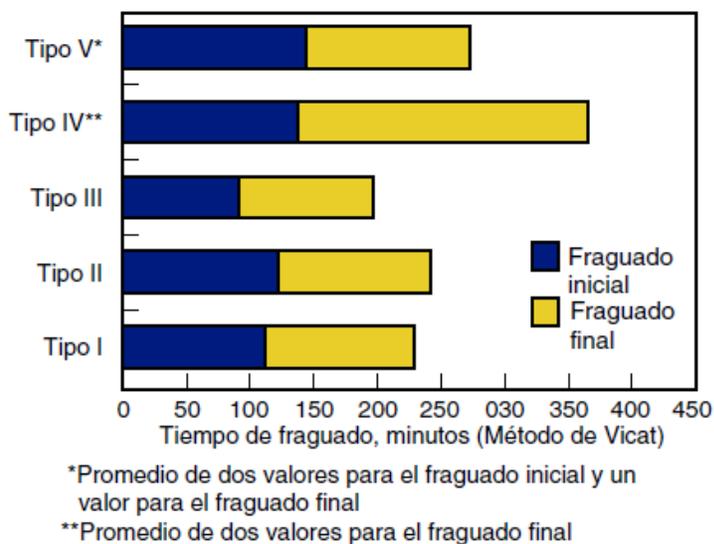


Figura 10. *Tiempo de fraguado para cementos Portland.* Fuente: Kosmatka et al. (2004, p. 62).

- Climatología, se refiere a las variaciones en el fraguado por las temperaturas elevadas o muy bajas. Así mismo, las condiciones de vientos, exposición al sol y demás actores del clima tienen influencia directa en el fraguado del hormigón

Referente a la trabajabilidad, es frecuente que esta sea verificada dentro de estudios que buscan identificar similitud de la mezcla propuesta versus hormigones ordinarios o con propiedades ya conocidas. Ejemplo de estos son estudios como el realizado por Roshazita Che Amat et al. (2022) el cual presenta una serie de modificaciones a un hormigón ordinario y evalúa la trabajabilidad, encontrando que su comportamiento se ve alterado por la influencia de los factores indicados anteriormente:

La compactación disminuye a medida que disminuye el porcentaje de desplazamiento. El factor que contribuyó a esta circunstancia es el contenido de agua. Se realizaron pruebas de la mezcla de hormigón antes de proceder a la cantidad exacta de relación agua-cemento para determinar la relación adecuada que satisfaga los criterios de asentamiento verdadero [...] El resultado muestra la trabajabilidad del hormigón obtenido con 0 % de sustitución de Ceniza de Fondo (BA) que es 30 mm después de la medición. Seguido de una sustitución del 10 % de Cenizas de fondo de incineración de residuos sólidos municipales (MSWIBA) sin tratar en el hormigón, la lectura se reduce aproximadamente 2 mm. Para las últimas tres muestras también presentó la misma lectura donde el resultado obtenido fue 30 mm igual que la muestra de control. (p. 285)

De igual forma ocurre en el estudio *Workability and Density of Concrete Containing Coconut Fiber* de Ibrahim et al. (2022), el cual, al modificar el tipo de fibras empleadas en el hormigón, evalúa la trabajabilidad de este, encontrando que al conservar los demás materiales se puede conservar una trabajabilidad similar al hormigón base.

No obstante, estos estudios identifican que una de las mejores formas para evaluar la trabajabilidad es emplear el ensayo de asentamiento, el cual permite hacer un seguimiento, segundo a segundo, del comportamiento de la mezcla, como bien lo indica, “la trabajabilidad del hormigón puede medirse de varias maneras dependiendo de los tipos de hormigón. La prueba de asentamiento es el método más utilizado para medir la consistencia del hormigón en su estado fresco” (Ibrahim et al., 2022, p. 347).

Ahora bien, se han encontrado algunos estudios como *Study on the workability, mechanical property and wáter absorption of reactive powder concrete* (Ge et al., 2023), el cual está enfocado a revisar el comportamiento de la fluidez de un RPC estudiando “Se examinaron los parámetros efectivos (relación agua-aglomerante, contenido de reductor de agua, tasas de reemplazo de ceniza volante (FA), humo de sílice (SF) y polvo de escoria (SL)) de los RPC mediante pruebas de fluidez de la pasta, resistencia a la compresión y flexión, así como absorción de agua.” De este estudio se concluye, entre otras cosas, que:

- Los reductores de agua de 1 % a 2,5 % aumentan fluidez; así mismo, aumentar el contenido de humo de sílice reduce la fluidez de la pasta.
- La relación agua-cemento muestra influencia directa en propiedades mecánicas; grandes cantidades de agua disminuyen resistencia a la compresión; se recomienda relación agua-cemento del orden de 0.19.
- La absorción del agua mejora inicialmente y luego disminuye con el humo de sílice; sin embargo, con ceniza volante o polvo de escoria aumenta continuamente.

Y otros enfocados en la trabajabilidad y su variación, debido a la inclusión de aditivos de tipo Polycarboxylate, consiguiendo resultados favorables en relaciones 1 a 1.5 % (Sumiati, 2020).

De igual forma se encontró una investigación enfocada a proponer una forma de medición de la trabajabilidad más novedosa, empleando la potencia “Basado en la teoría reológica y la relación lineal observada entre la fuerza cortante y la deformación por flujo de mezclas de hormigón, se estableció un modelo matemático para caracterizar la trabajabilidad del hormigón utilizando el poder de agitación de hormigoneras” (Rong et al., 2022, p. 1). En este estudio se diseñó y probó un mezclador de dos ejes a escala de laboratorio con un sistema de control de velocidad de rotación y un sistema de monitoreo de potencia, concluyendo que:

los resultados de diferentes tipos de hormigón muestran que el método propuesto se puede aplicar sobre hormigón fresco con diseños de mezcla muy diferentes. La comparación con la prueba de asentamiento muestra que el método propuesto puede identificar con precisión el tiempo de mezclado óptimo para el hormigón fresco en términos de trabajabilidad (Rong et al., 2022, p. 1).

2.7 Normatividad

No existe ningún código o estándar sobre los materiales de UHPC que proporcione una definición clara ni orientación sobre la categorización de UHPC. Anteriormente, en algunos países como Francia, Japón, Estados Unidos y Suiza, solo estaban disponibles guías técnicas y recomendaciones profesionales. Estas guías no tenían un estatus “oficial”, lo que dificultaba su referencia y uso en proyectos. Su estandarización permitirá ahora establecer especificaciones claras y codificadas. Los códigos y estándares UHPC se recopilaron de todas las referencias disponibles en diferentes lugares del mundo (Bajaber & Hakeem, 2021).

Durante el desarrollo del documento se han listado una serie de especificaciones que se emplean para clasificar materiales principalmente, pero los ensayos para medición de propiedades mecánicas y demás suelen ser los mismos que se aplican a los hormigones ordinarios, como lo indica el ACI 238.1r-08 report on measurements of workability and rheology of fresh concrete (ACI Committee 238, 2008). En la definición de los ensayos a realizar para las diferentes propiedades de la mezcla, que interesa revisar, se usó este estándar para identificar los ensayos que más aplican al desarrollo de este trabajo investigativo. En él se explica brevemente cada uno de los ensayos que se autorizan para evaluar propiedades reológicas del material fresco, para lo cual se cuenta con un listado con los métodos de prueba para la categorización de la trabajabilidad (Tabla 7).

De igual forma, se ha trabajado con los ensayos debidamente normalizados y aceptados en la Asociación Española de Normalización – Normas Europeas (UNE-EN) y que se encuentren vigentes de acuerdo con la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), por lo cual se hizo una revisión en busca de estas equivalencias.

Tabla 7. Normas aplicables

Norma	Título
ACI 238.1R-08	Report on measurements of workability and rheology of fresh concrete.
ASTM C1437 – 20	Standard test method for flow of hydraulic cement mortar.
ASTM C230_C230M-21	Standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement.
UNE-EN 196-3:2017	Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen.
UNE-EN 480-2	Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Determinación del tiempo de fraguado.
UNE-EN 12350-5:2018	Ensayos hormigón fresco. Parte 1: Mesa de sacudidas.
UNE-EN 1015-3:2000	Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas).
UNE-EN 196-1:2018	Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias.
UNE-EN 13279-2	Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción Parte 2: Métodos de ensayo

3. Programa experimental

Este estudio se enfocó en evaluar el efecto de modificar la dosificación de ciertos aditivos y adiciones y otros finos, así como la estructura granular de los sólidos, sobre una dosificación base de UHPC (Ver Tabla 8). Las propiedades que se analizaron están relacionadas con la caracterización de tiempo de aplicabilidad (pot life, tiempo abierto o vida útil) de este material que influye en la trabajabilidad y su evolución con el tiempo, así como los tiempos de fraguado. Además, se analizaron algunas de sus propiedades mecánicas.

El enfoque de este programa experimental se basó en el hecho de que los UHPC se caracterizan por contener aditivos y adiciones en grandes cantidades, lo que produce una muy alta trabajabilidad a corto plazo, que se pierde en tiempos relativamente cortos y que suele estar relacionado con tiempos de fraguado muy largos.

Tabla 8. *Muestra base*

Componentes	Peso (g)
CEM I, 42.5 R-SR5	800
Humo de sílice 940-U	175
Harina de cuarzo U-S 500	225
Arena media 0,8 mm. sílicea	565
Arena fina 0,4 mm. sílicea	305
Agua	170
Sika viscocrete 20HE (líquido)	30
Tiempo amasado (min)	15
Velocidad de amasado	Lenta

Para alcanzar los objetivos, se llevó a cabo una serie de ensayos, entre los que se incluyen el ensayo de Mini Slump y la mesa de sacudidas, para evaluar la trabajabilidad del material. Además, se realizó la medición de tiempos de fraguado mediante el ensayo de Vicat. En paralelo, se emplearon, para monitorear el comportamiento de las propiedades mecánicas, los ensayos de compresión simple y flexo-tracción.

Es importante destacar que la muestra base se identifica como "MB" y se corresponde con la dosificación especificada en la Tabla 9. Esta denominación se reflejará de manera consistente en las figuras.

Tabla 9. Resumen nuevas dosificaciones descritas

COMPONENTES	PESO (g)										
	MB	M1 R- HCx C	M2 R- HCxF C	M3 R- HCxA S0.4 (100)	M4 R- HCxAS (50/50)	M5 I- S- 20HE	M6 RI-S- 90NG	M7 RI-S 20HE xMC	M8 I- A/C	M9 R- HCxA S(30/ 70)- 20HE	M10 R- HCxA S(30/ 70)- MC
CEM I, 42.5 R-SR5	800	1025	800	800	800	800	800	800	800	800	800
Humo de sílice 940-U	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175
Harina de Cuarzo U-S 500	225					225	225	225	225		
Filler Calizo			225								
Arena gruesa 1,2 mm sílicea.										237	237
Arena media 0,8 mm Sílicea	565	565	565	565	677	565	565	565	565	553	553
Arena fina 0,4 mm sílicea.	305	305	305	530	417	305	305	305	305	305	305
Agua	170	170	170	170	170	170	170	170	190	170	170
SIKA VISCOCRETE 20HE (liquid)	30	30	30	30	30	40			30	25	
SIKA VISCOCRETE 90NG (liquid)							40				
MC POWER FLOW 3095 (liquid)								40			30
% Relación aditivo/cemento	3.75 %	2.93 %	3.75 %	3.75 %	3.75 %	5.00 %	5.00 %	5.00 %	3.75 %	3.13 %	3.75 %

Nota: proporciones de mezcla para 1 litro de mezcla de UHPC.

La Tabla 9 presenta las variaciones que se analizaron sobre la dosificación base para la realización del estudio. A continuación, se presenta el ajuste específico para cada muestra, desde la eliminación de la harina de cuarzo y su reemplazo por cemento hasta cambios en la relación agua-cemento y la cantidad y tipo de aditivos:

- **M1 R-HCxC:** Eliminación del 100 % de la harina de cuarzo; se reemplaza por cemento. El nuevo contenido de cemento es de 1025 g/l.
- **M2 R-HCxFC:** Reemplazo de la harina de cuarzo por filler calizo en proporciones iguales.
- **M3 R-HCxAS0.4 (100):** Reemplazo de la harina de cuarzo por arena de sílice de 0.4 mm en proporciones iguales.
- **M4 R-HCxAS (50/50):** Reemplazo del 100 % de la harina de cuarzo por un 50 % de arena de sílice de 0.4 mm y un 50% de arena de sílice de 0.8 mm.
- **M5 I-S-20HE:** Incremento en la cantidad del aditivo Sika Visocrete 20HE de 30 g/l a 40 g/l.

- **M6 RI-S-90NG:** Reemplazo del aditivo Sika Visocrete 20HE por el aditivo Sika Visocrete 90NG a 40 g/l e incremento de aditivo.
- **M7 RI-S-20HExMC:** Reemplazo del aditivo Sika Visocrete 20HE por el aditivo MC POWERFLOW 3095 e incremento a 40 g/l de aditivo.
- **M8 I-A/C:** Aumento de la relación agua-cemento de 0.21 a 0.23, es decir, de 170 g/l de agua a 190 g/l.
- **M9 R-HCxAS(30/70)-20HE:** Reemplazo del 100 % de la harina de cuarzo por un 30 % de arena de sílice de 1.2 mm y un 70 % de arena de sílice de 0.8 mm. Además, se reduce la cantidad del aditivo a 25 g/l.
- **M10 R-HCxAS(30/70)-MC:** Reemplazo del 100 % de la harina de cuarzo por un 30 % de arena de sílice de 1.2 mm y un 70 % de arena de sílice de 0.8 mm. Se reemplaza el aditivo Sika Visocrete 20HE por el aditivo MC POWERFLOW 3095 a 30 g/l.

La Figura 11 muestra el esquema de trabajo realizado sobre cada una de las variaciones analizadas.



Figura 11. Esquema de trabajo propuesto.

Como variable adicional se decidió valorar la influencia de las condiciones representativas de la producción del hormigón y su transporte, considerando los tiempos de amasado y la velocidad de amasado como factores que pueden modificar la tendencia a mantener la trabajabilidad o al inicio de fraguado y, al mismo tiempo, permitirá una homogenización durante el proceso.

Después de establecer el sistema de producción, y antes de proceder a la implementación de los ensayos, se abordaron dos condiciones que representan las situaciones de transporte y fabricación más comunes en el mercado: hormigón premezclado y fabricación in situ con puesta en obra inmediata. Para ello se planteó lo siguiente:

- *Amasado continuo*

Se define como amasado continuo el proceso en el cual se realiza una mezcla constante mientras la misma conserve homogeneidad y fluidez. El amasado se suspende

momentáneamente solo para la extracción de muestras para ensayos. Este método simula los procesos de transporte en camiones hormigoneros, donde la mezcla se mantiene en movimiento hasta su destino.

– *Amasado único*

El amasado único se lleva a cabo solo hasta la extracción de una única muestra para los ensayos, sin continuidad en el amasado. Esta modalidad representa la fabricación in situ de hormigón, donde se realiza un solo amasado antes de su uso en la construcción.

Para evaluar la evolución de la trabajabilidad de las muestras de hormigón, bajo estas condiciones, se realizaron ensayos específicos en diferentes combinaciones considerando los ensayos de conformidad con las normas ASTM C230 / ASTM C1437 (Mini Slump) y UNE-1015-3 (mesa de sacudidas).

Con esto se pueden evaluar las variaciones del comportamiento de las muestras de hormigón, bajo cada una de las situaciones propuestas, empleando los ensayos indicados. Se tuvo en cuenta realizar las mediciones con los ensayos, en intervalos de 15 minutos cada uno.

Para medir los tiempos de fraguado, se trabajó con las normas UNE-EN-196-3, UNE-EN-480-2 y UNE-EN 13279-2. Esta selección se debe a que las dos primeras normativas presentan variaciones en las mediciones de inicio y fin de fraguado, las cuales se determinan mediante la penetración de la aguja en la muestra. No obstante, aunque en hormigones ordinarios esto no suele afectar significativamente el resultado final de tiempo de fraguado, es importante destacar que, en el caso de los UHPC, que tienen una alta densidad de empaquetamiento debido a la granulometría de sus componentes, estas distancias de penetración pueden no reflejar de manera precisa las condiciones reales de la mezcla, lo que podría afectar significativamente la medición. Por esta razón, se optó por emplear la norma UNE-EN 13279-2 que establece parámetros para determinar el inicio del fraguado, en función de comportamientos específicos observados en la mezcla. Estos comportamientos abarcan la contaminación de la aguja, la estabilidad del hueco y la presencia de agua en el fondo. Esta elección se basa en la búsqueda de mediciones más precisas y apropiadas para las características particulares de los UHPC, asegurando la fiabilidad de los resultados obtenidos.

Para el análisis de las propiedades mecánicas, se siguieron los procedimientos establecidos en la UNE-EN 196-1:2018, Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias (AENOR, 2018).

3.1 Metodología

Este capítulo proporciona una guía integral sobre cómo se desarrolló el estudio y ofrece una base sólida para la interpretación de los resultados presentados en resultados y discusión. Es por ello por lo que, como se mencionó en el marco teórico, se eligió la dosificación base, que se muestra en la Tabla 8, con base en el estudio previo realizado por Camacho Torregrosa (2013) en la UPV.

Para garantizar la uniformidad de todas las muestras a emplear en el estudio, se llevaron a cabo procedimientos de calibraciones generales de proceso de fabricación del hormigón:

– *Criterios de fabricación de hormigón (Procedimiento de agregado de materiales)*

- Pesar cada uno de los materiales componentes del UHPC.
- Agregar los materiales al vaso de la mezcladora en el siguiente orden: primero las arenas y el filler calizo o la harina de Cuarzo.
- Amasado durante un minuto.
- Agregar el cemento y el humo de sílice.
- Amasado durante un minuto.
- Agregar agua, contabilizar 30 segundos y agregar el aditivo superplastificante.
- El tiempo de amasado se registró a partir del inicio de la reacción del aditivo.

– *Tiempo de amasado*

Se realizaron ciclos de amasado con duraciones de 5, 10 y 15 minutos, contados a partir de la reacción del superplastificante. Tras analizar los resultados, se determinó que el tiempo de amasado óptimo es de 15 minutos, ya que garantiza un comportamiento homogéneo y estable en las muestras.

– *Velocidad de amasado*

Se evaluó el comportamiento de la mezcla utilizando una amasadora con dos velocidades: baja (velocidad I) y alta (velocidad II). Tras una serie de pruebas, se concluyó que la velocidad I (baja) generaba un comportamiento más fluido.

Con esto estos parámetros estandarizados para todas las muestras, tiempo de amasado de 15 min y velocidad de amasado baja, se procedió a la realización de los experimentos de acuerdo con las consideraciones que se indican a continuación.

3.1.1 Evolución de trabajabilidad

Para evaluar la trabajabilidad del UHPC que estamos utilizando, se consideraron dos escenarios representativos relacionados con la comercialización y fabricación de los hormigones convencionales, porque estos son fundamentales para industrializar este tipo de productos. En estos dos escenarios se pueden presentar situaciones distintas en cuanto a la trabajabilidad del UHPC, por lo que se formulan dos enfoques específicos a la hora de evaluar adecuadamente esta propiedad en las muestras. El primer escenario se asemeja al transporte mediante camión hormigonero, y el segundo representa la fabricación “in situ” del hormigón. Como resultado, se diseñaron los siguientes dos planteamientos como estrategia para su estudio.

– *Amasado continuo*

Este primer escenario se refiere a un proceso en el cual se lleva a cabo un amasado constante y continuo mientras la mezcla de hormigón mantiene su homogeneidad y fluidez óptimas. Durante este proceso, se suspende brevemente el amasado únicamente para extraer muestras con fines de ensayo. Este enfoque se ha concebido con el propósito de simular los procesos de transporte de hormigón en camiones hormigoneros u otros medios similares. En estas circunstancias, generalmente se mantiene un amasado continuo mientras el hormigón se

encuentra en movimiento hacia su destino final. Una vez que el hormigón llega a su destino, se procede a su descarga parcial, en varias etapas, hasta completar la descarga total del contenido. Este método de amasado continuo es esencial para comprender cómo evoluciona la trabajabilidad del hormigón, en situaciones donde la mezcla se mantiene en movimiento durante el transporte y la entrega.

– *Amasado único*

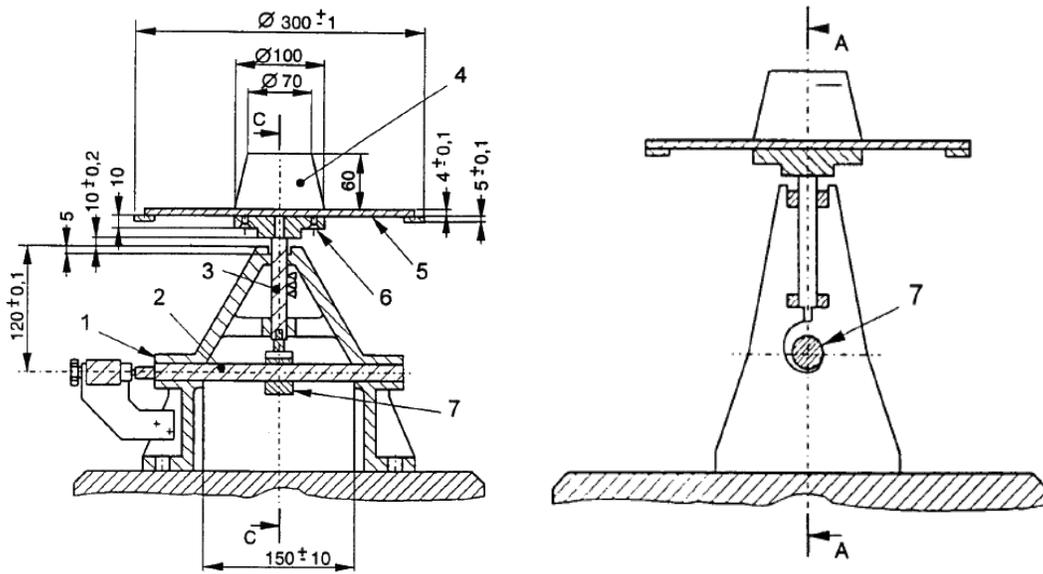
El segundo escenario, el amasado, se lleva a cabo solo hasta el momento de la extracción de una única muestra que se utilizará para realizar diversos ensayos, sin que haya una continuidad en el proceso de amasado. Esta metodología se ha concebido específicamente para representar situaciones comunes en proyectos de construcción donde se lleva a cabo la fabricación del hormigón “in situ”. En este contexto, el amasado único se realiza antes de la colocación y uso del hormigón en la construcción, y no se prolonga más allá de la toma de la muestra. Este enfoque permite evaluar cómo se comporta la mezcla en condiciones donde se lleva a cabo un solo amasado antes de su aplicación en el lugar de construcción.

Las anteriores condiciones de amasado pretenden identificar el comportamiento de la mezcla en las diferentes situaciones posibles que se puede tener durante la fabricación industrial.

Para la evaluación de las condiciones mencionadas, se realizaron pruebas tanto con mesa de sacudidas como sin ella, empleando los dos siguientes métodos normalizados:

- *Ensayo sin mesa de sacudidas:* Se emplea la prueba Mini Slump, diseñada por Kantro (ACI Committee 238, 2008). Este método se basa en el molde tronco cónico empleado para el ensayo UNE-1015-3 (AENOR, 2000). Este ensayo consiste en llenar el molde con el UHPC fresco, sin aplicación de compactación; luego, se levanta el molde y después de un minuto se procede a medir dos diámetros mediante diagonales ortogonales. El resultado de la prueba se obtiene del promedio de estos dos valores. Ensayo de acuerdo con las normas ASTM C230 / ASTM C1437.

- *Ensayo con mesa de sacudidas:* Para este caso se realiza la implementación de la norma UNE-1015-3. Para la realización de este ensayo se coloca el molde en la parte central del disco que se encuentra ubicado en sobre la mesa de sacudidas; se llena con mortero garantizando un llenado uniforme, sin aplicación de compactación. Luego se elimina el exceso de mortero. Después de 15 segundos se procede a dar 15 sacudidas en la mesa, con una frecuencia de aproximadamente una sacudida por segundo. Posteriormente, se miden los diámetros del mortero en dos direcciones perpendiculares. Finalmente, se calcula el promedio de estas dos mediciones. A continuación, se presenta un esquema del equipo descrito en la norma.



Número	1 Bastidor
2 Eje horizontal	3 Eje elevador
4 Molde troncocónico	5 Disco
6 Placa rígida	7 Leva de elevación

Figura 12. Mesa de sacudidas. Fuente: Norma UNE-1015-3

Sin embargo, dado que no se cuenta con moldes troncocónicos en cantidad suficiente para llevar a cabo todos los ensayos, bajo condiciones similares al mismo tiempo, se ha optado por usar un tubo no normalizado que contenga un volumen equivalente al del tronco cónico normalizado. Además, se realizaron pruebas de calibración para determinar las mejores características para el tubo no normalizado. Las dimensiones de este tubo no normalizado son: un diámetro de 7 cm y una altura constante de 6 cm.

En resumen, la estrategia de implementación de los ensayos para evaluar la evolución de la trabajabilidad se basa tener en cuenta los dos escenarios de amasado y los dos tipos de ensayos normalizados a realizar:

- Ensayos con amasado continuo y prueba de Mini Slump
- Ensayos con amasado continuo y mesa de sacudidas
- Ensayos con amasado único y prueba de Mini Slump
- Ensayos con amasado único y mesa de sacudidas

Cada uno de estos ensayos se lleva a cabo de la siguiente manera:

- *Ensayos con amasado continuo y prueba de Mini Slump*
 - Se utilizó un tubo no normalizado para evaluar trabajabilidad y fluidez. Este tubo se dispone sobre una superficie de vidrio.
 - La primera muestra se tomó inmediatamente después de 15 minutos de amasado, desde el momento de la reacción del superplastificante.
 - La prueba consiste en llenar el tubo y levantarlo conforme indica la norma.
 - Se tomaron dos medidas de los diámetros de la muestra de forma ortogonal.
 - Finalizado el procedimiento, la mezcla se reintegró a la mezcladora para continuar su amasado.
 - Se repitió el mismo procedimiento cada 15 minutos.

- *Ensayos con amasado continuo y mesa de sacudidas*
 - Se utilizó un tubo no normalizado para evaluar la trabajabilidad y la fluidez del UHPC. En este caso, el tubo se colocó sobre el disco de vidrio que se encuentra en la mesa de sacudidas.
 - La primera muestra se tomó inmediatamente después de 15 minutos de amasado, desde el momento de la reacción del superplastificante.
 - La prueba implicó llenar el tubo y levantarlo según lo indica la norma, seguido de 15 sacudidas de acuerdo con el estándar.
 - Se tomaron dos medidas de los diámetros de la muestra de forma ortogonal.
 - Finalizado el procedimiento, la mezcla se reintegró a la mezcladora para continuar su amasado.
 - Se repitió el mismo procedimiento cada 15 minutos.



Figura 13. *Ensayos con amasado continuo y mesa de sacudidas.*

- *Ensayos con amasado único y prueba de Mini Slump*
 - Se emplearon seis tubos no normalizados para llevar a cabo este ensayo.
 - Los seis tubos se llenaron inmediatamente después de quince minutos desde la reacción del superplastificante.
 - La primera muestra se tomó inmediatamente después de 15 minutos de amasado, desde el momento de la reacción del superplastificante.
 - A partir de la anterior prueba, cada 15 minutos se levanta un tubo de los que quedan llenos en la mesa (Figura 14).
 - Se realizó la prueba levantando el tubo, siguiendo los procedimientos indicados en la norma.



Figura 14. *Ensayos con amasado único y prueba de Mini Slump.*

- *Ensayos con amasado único y mesa de sacudidas*
 - Esta prueba se realizó con cada uno de los tubos que fueron levantando de la prueba anterior.
 - Se realizó en los mismos tiempos que el ensayo anterior, con lo cual se garantiza la continuidad en la realización de la prueba.

3.1.2 Tiempos de fraguado

Para la medición de tiempos de fraguado se contó principalmente con las normas UNE-EN-196-3 (AENOR, 2017) y UNE-EN-480-2 (AENOR, 2007). Al revisar dichas normas se identifican diferencias entre ellas, las cuales se detallan a continuación.

– *Tiempos para medición*

- Norma UNE-EN- 196-3: Esta norma establece que el tiempo de fraguado se mide desde el momento en que se posiciona la aguja sobre el molde con la pasta.
- Norma UNE-EN-480-2: En contraste, esta norma considera el tiempo de fraguado a partir de la finalización del amasado.

Al analizar el procedimiento descrito en ambas normas, se pudo inferir que esta variación no resulta significativa al momento de establecer la duración total del fraguado. Sin embargo, al momento de comparar la medición de inicio y fin de fraguado se presentan diferencias en la medición.

– *Penetración de la aguja*

- Norma UNE-EN 196-3
 - Inicio fraguado: distancia entre la aguja y la base de la placa corresponde a 6 ± 3 mm
 - Fin fraguado: penetración de la aguja de 0.5 mm.
- Norma UNE-EN-480-2
 - Inicio fraguado: distancia entre la aguja y la base de la placa corresponde a 4.0 mm
 - Fin fraguado: penetración de la aguja de 2.5 mm.

Es evidente que existen diferencias en las distancias de la penetración de la aguja entre ambas normas. Además, es importante tener en cuenta que la primera norma establece tolerancias, mientras que la segunda no lo hace.

No obstante, en el caso de los UHPC, que se caracterizan por tener una alta densidad de empaquetamiento debido a la granulometría de sus componentes, se planteó una situación relevante. Debido a la alta densidad del material se podría tener una mayor cohesión de la mezcla, lo que podría afectar la forma en que se comporta el ensayo. Por lo tanto, es pertinente considerar que las distancias de penetración de la aguja, establecidas por las normas, no sean coherentes con las condiciones reales de fraguado del UHPC, lo que podría traducirse en distancias diferentes y posiblemente menores al de inicio de fraguado y mayores al final de este.

Previendo la situación descrita, se decidió incluir las consideraciones de la norma UNE-EN 13279-2 de yesos de construcción, y conglomerantes a base de yeso, para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo. De forma particular, se modificó la forma en que fue definido el inicio de fraguado, centrándose en las características visuales y de comportamiento de la muestra de hormigón al retirar la aguja de la probeta. No obstante, aunque se siguió el mismo proceso de preparación indicado en las normas anteriores, ahora se consideraron cuidadosamente los siguientes aspectos al determinar los tiempos de fraguado:

- Aspecto visual: Esto implica la observación de cambios en la textura, color y brillo de la superficie del UHPC.
- Resistencia a la penetración: Identificar el momento en que la aguja puede ingresar en el hormigón, sin dejar marcas visibles ni causar daños superficiales.

- Consistencia: La consistencia del UHPC es otro indicador clave. A medida que el hormigón inicia el proceso de fraguado puede volverse más rígido y menos fluido. Se observa cualquier cambio en la capacidad del hormigón para fluir y auto-nivelarse.
- Comportamiento superficial: Se presta especial atención al comportamiento del UHPC en la superficie, incluyendo la formación de costra, la aparición de grietas o cualquier cambio en la textura.
- Pruebas táctiles: Junto con las observaciones visuales, se realizaron pruebas táctiles para evaluar la resistencia del hormigón a la manipulación superficial, como el deslizamiento de los dedos. Esta evaluación táctil proporciona información adicional sobre el estado de fraguado.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se decidió que, al llevar a cabo los ensayos, se consideraran los siguientes comportamientos para determinar el inicio de fraguado:

- Comportamiento 1: Arrastre material y cierre del hueco

Al momento de la extracción de la aguja se puede observar que está contaminada con material fino; además, su extracción genera pérdida de consistencia y que el hueco se cierre inmediatamente o contados unos segundos. Ese comportamiento indica que el fraguado aún no ha comenzado.



Figura 15. *Comportamiento 1.*

- Comportamiento 2: Arrastra material y no se cierra el hueco.

En el momento de la extracción se evidencia un hueco consistente, lo que indica que el material está adquiriendo cohesión. Es de destacar que hay presencia de agua en el fondo. Este comportamiento sugiere que el material está adquiriendo cohesión, pero el fraguado todavía no ha iniciado por completo.



Figura 16. *Comportamiento 2.*

- Comportamiento 3: No arrastra material y el hueco es estable

Al extraer completamente la aguja, no se encuentra contaminación en su superficie; el material exhibe con cohesión y suficiente resistencia para conservar el hueco estable; no se detecta presencia de agua en el fondo. Este comportamiento indica que el tiempo de fraguado ha comenzado.



Figura 17. *Comportamiento 3.*

- Comportamiento 4: Poca penetración de la aguja.

La aguja penetra muy poco o no penetra en absoluto en la muestra. Se toma este punto como el final de fraguado, de acuerdo con la norma UNE-EN 196-3.



Figura 18. *Comportamiento 4.*

Además de las consideraciones anteriores, que llevaron al ajuste del planteamiento para la medición del tiempo de fraguado, se debe tener en cuenta que en los UHPC es común que se genere una lámina superficial en estado de solidificación (costra) con un espesor de 2 a 3 mm (ver Figura 19), lo que impide que la aguja penetre, generando una falsa impresión de fraguado. Para abordar este problema se plantearon dos soluciones: la primera consistió en remover manualmente la costra, mientras que la segunda opción fue cubrir la probeta con telas húmedas. En este estudio se optó por la segunda alternativa como la más adecuada.

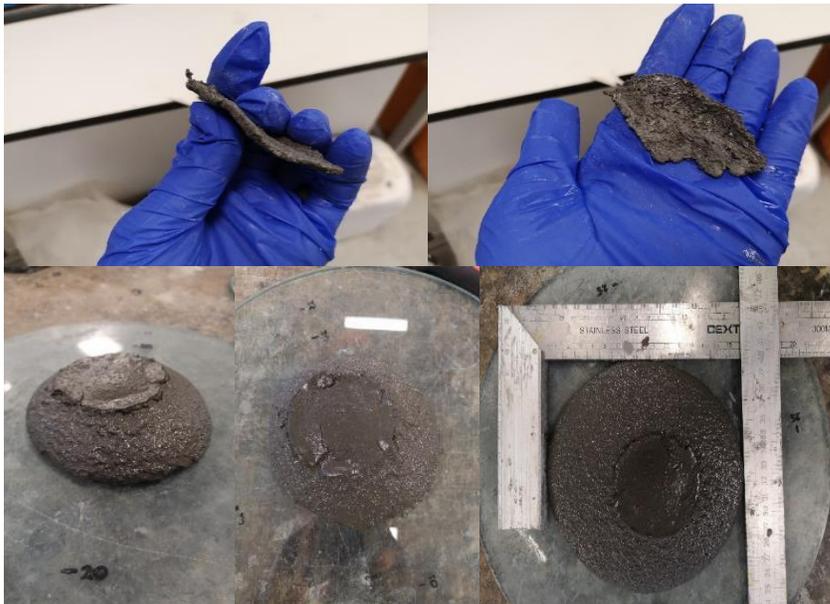


Figura 19. *Lámina superficial en estado de solidificación (costra).*

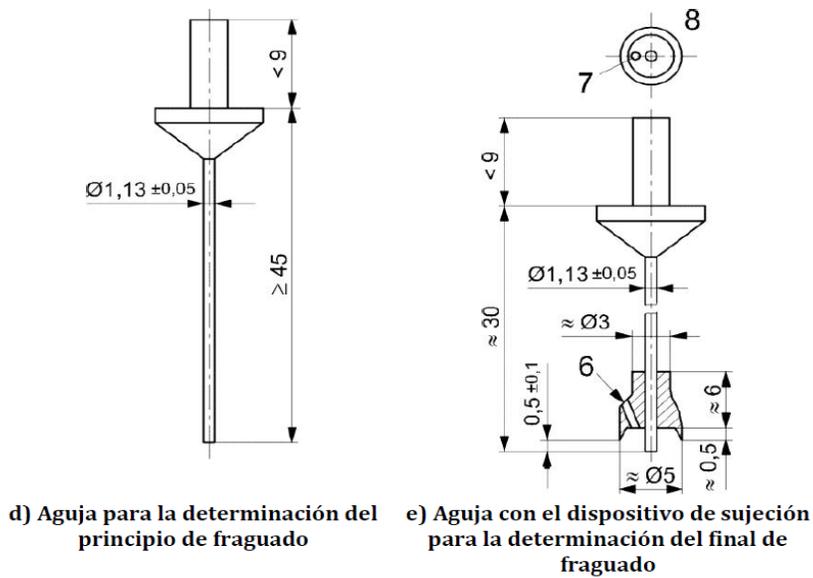
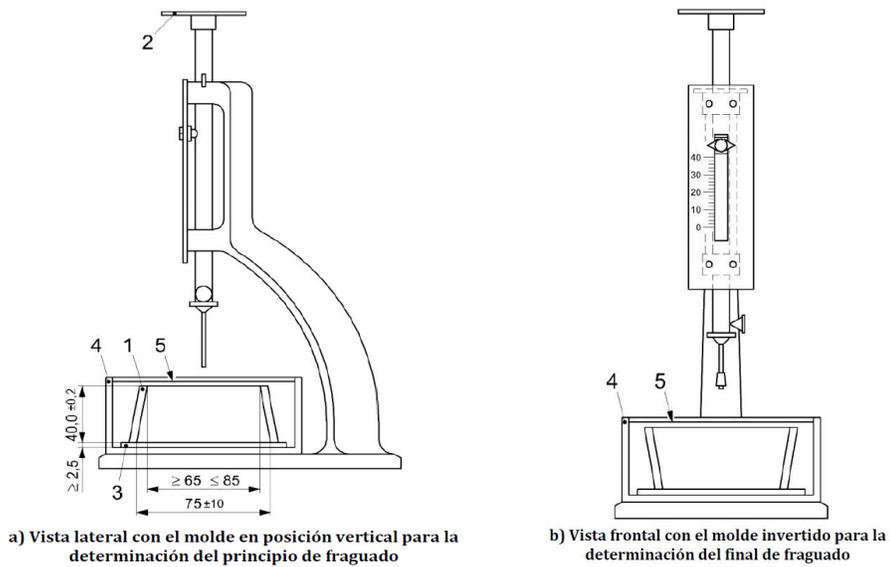
La opción de cubrir las probetas con telas húmedas minimiza la perturbación de las muestras y facilita una evaluación más precisa y coherente del inicio del fraguado en condiciones realistas (ver Figura 20). Esta metodología podría revestir una especial relevancia en investigaciones posteriores que involucren UHPC, donde la formación de una costra superficial es un fenómeno común y puede influir en los resultados de los ensayos de fraguado. Cubriendo las muestras con una tela húmeda se disminuyó la creación de la costra, lo que permitió tener penetración de la aguja y control en el ensayo con máquina de Vicat.



Figura 20. Protección de muestra con tela húmeda.

Para futuros estudios se sugiere, la utilización de esta misma alternativa, ya que la de remover la costra de forma manual puede generar alteraciones significativas a las muestras analizadas. Al retirar la costra se genera presión sobre el molde, lo que podría provocar reorganización de las partículas finas de la matriz y, consecuentemente, provocar desplazamiento del agua interna. Este efecto podría resultar en la liberación de agua desde el interior de los poros y microporos, alterando potencialmente el proceso de hidratación del hormigón.

Las normas indicadas presentan el siguiente equipo para la implementación de este ensayo (ver Figura 21).



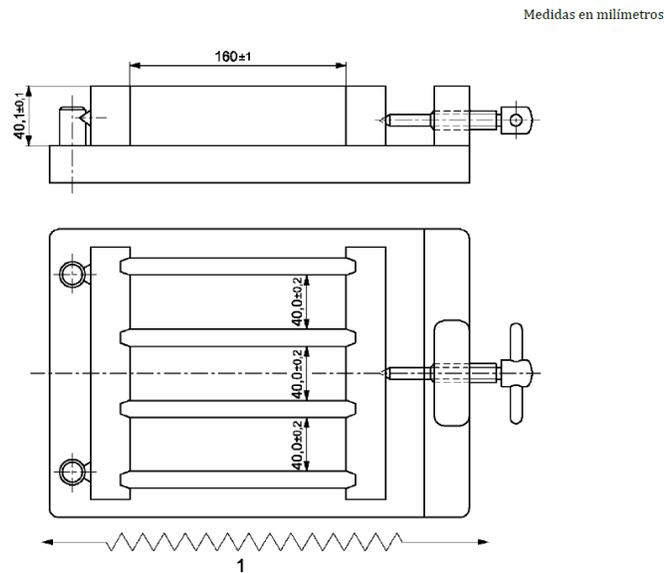
Leyenda

1	Molde	5	Agua
2	Placa correctora de pesos	6	Purga de aire (Ø aproximado 1,5)
3	Placa base	7	Purga de aire
4	Contenedor	8	Vista inferior de la aguja con el dispositivo de sujeción para la determinación del final de fraguado

Figura 21. Aparato Vicat manual típico. Fuente: Norma UNE-1015-3.

3.1.3 Evolución de propiedades mecánicas

Para la realización de los ensayos, indicados en este capítulo, se siguen los procedimientos estipulados en la norma UNE-EN 196-1:2018, Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias (AENOR, 2018). En este se indica que se debe trabajar con una probeta de 40mmx40mmx160mm, molde que se presenta a continuación.



Leyenda

1 Indicación de la dirección de enrasado con movimiento de sierra

Figura 22. Ejemplo probeta prismática. Fuente: AENOR (2018) y Kosmatka et al. (2004, p. 13).

Esta norma recomienda compactar con 60 golpes; sin embargo, debido al carácter autocompactante de las mezclas de UHPC con las que se está trabajando, se optó por omitir este procedimiento como parte de este ensayo. En su lugar, se vertió la mezcla directamente a la probeta y luego se llevó a la cámara húmeda a 20°C y una humedad superior al 90 %.

Para los ensayos a flexo-tracción, se realizaron conforme lo indica la norma, con el método de carga de tres puntos, colocando una de las caras laterales de la probeta sobre los rodillos de soporte y se aplicó la carga de manera vertical hasta que se produjo la rotura. Posteriormente, se calculó la resistencia a la flexión en Megapascuales.



Figura 23. *Ensayo a flexión.*

En cuanto al ensayo a compresión, se utilizaron las dos mitades resultantes del ensayo de flexo-tracción, sometiendo cada una a carga en aumento hasta rotura. La resistencia a la compresión se calcula también en Megapascuales.

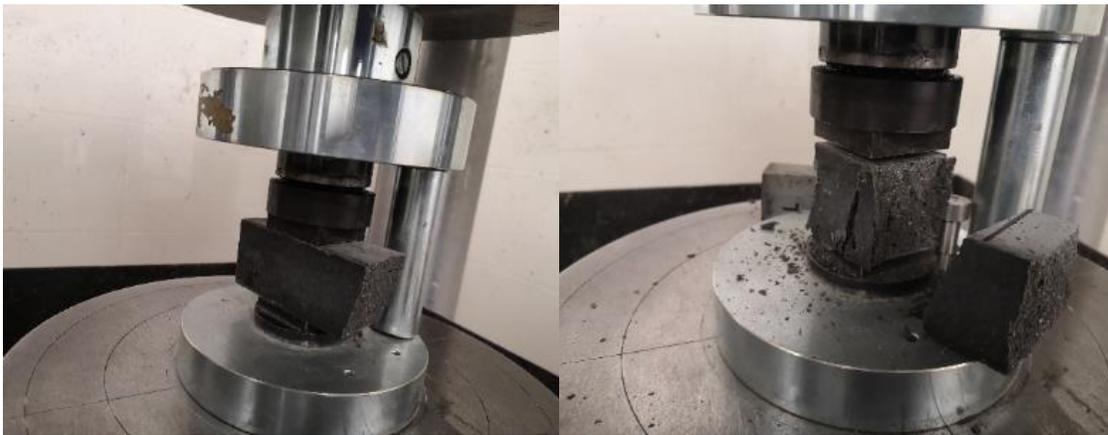


Figura 24. *Ensayo a compresión.*

3.2 Moldes y equipos

– *Aparato Vicat Manual*

Equipo con las dimensiones y especificaciones indicadas en la norma para la determinación de tiempos de fraguado.



Figura 25. *Aparato Vicat Manual.*

– *Probeta prismática*

Probeta de 40x40x160mm para determinación de resistencias mecánicas, de acuerdo con la norma.



Figura 26. *Probeta prismática.*

– *Amasadora*

De acuerdo con la norma



Figura 27. Amasadora.

– *Moldes*

Molde tronco cónico normalizado: para determinación de tiempos de fraguado, con dimensiones de 8.5 cm de diámetro exterior, 7 cm de diámetro interior y 4 cm de altura.



Figura 28. Molde tronco cónico normalizado (I).

Molde tronco cónico normalizado: dimensiones de 10 cm de diámetro inferior, 7 cm de diámetro superior y 5 cm de altura.



Figura 29. *Molde tronco cónico normalizado (II).*

– *Tubo no normalizado* con dimensiones de 7 cm de diámetro y 6 cm de altura constante.



Figura 30. *Tubo no normalizado.*

– *Mesa de sacudidas*



Figura 31. *Mesa de sacudidas.*

- Prensa para ensayos de flexión y compresión



Figura 32. Prensa para ensayos de flexión y compresión.

- Cámara para curado de probetas

Con temperatura controlada de 20°C y humedad superior a 90 % según norma.

3.3 Materiales

- *Cemento*

Se empleó cemento sulforresistente CEM I, 42.5 R-SR5 de Lafarge Holcim para la mezcla de hormigón, el cual es usado en hormigones armados o pretensados, así como aquellos que requieren de altas resistencias, tanto iniciales como finales. Este tipo de cemento se eligió porque, según sus componentes, mejora las condiciones de trabajabilidad de la mezcla, ya que cuenta con un contenido inferior al 5 % de C3A en clínker, el cual reacciona de forma rápida al contacto con el agua, lo que significa que, al contar con una menor cantidad, el proceso de hidratación sea más lento y por ende la trabajabilidad del hormigón sea mayor (Lafarge Holcim, s.f.).



Figura 33. Cemento sulforresistente CEM I, 42.5 R-SR5.

– *Agua*

El agua de amasado se toma del sistema de agua potable de la UPV, cumpliendo las normas vigentes.

– *Áridos silíceos*

Se usó arena fina de tamaño 0.4mm, arena media de 0.8 mm, y arena gruesa de 1.2 mm. Todos los áridos empleados son de tipo silíceo, caracterizados por tener una alta resistencia mecánica, además de brindar mejora a las propiedades mecánicas y de durabilidad.



Figura 34. Áridos silíceos.

– *Humo de sílice*

Se empleó humo de sílice sin densificar Elkem Microsilica 940 U, con una densidad entre 200 y 350 Kg/m³. Las esferas cuentan con un tamaño de partícula medio del orden de 0,15 micras.



Figura 35. Humo de sílice.

– *Harina de cuarzo / Filler Calizo*

Se usó harina de cuarzo U-S 500, Sibelco Hispania, fabricada por Sika, compuesta en más del 90 % por sílice cristalina (SiO_2 cristalino).

Con este material se busca mejorar la densificación de la matriz con una curva granulométrica que contiene tamaños de grano muy finos; además, permite disminuir las cantidades requeridas de cemento.

– *Aditivo superplastificante*

Se emplearon cuatro aditivos diferentes, todos ellos de tercera generación y compuestos principalmente por policarboxilatos modificados en base acuosa:

- SIKA VISCOCRETE 20HE (líquido): Aditivo superplastificante de altas prestaciones, ideal para hormigones autocompactantes, con una densidad de 1.09 kg/l. Dentro de sus características se encuentra que proporciona una alta fluidez, altas resistencias a temprana edad, un PH aproximado de 4.5 (Sika, s.f.a).
- SIKA VISCOCRETE 90NG (líquido): Superplastificante de altas prestaciones, se emplea en hormigones autocompactantes, altas resistencias iniciales y finales, mejora fluidez y plasticidad, tiempo de manejabilidad prolongado, con una densidad de 1.06-1.08 kg/l, Ph de 2 a 4 (Sika, s.f.b).
- MC-POWERFLOW 3095 (líquido): Superplastificante de alta concentración; se caracteriza por reducido tiempo de mezcla, a alta resistencia a edades tempranas, alta calidad de acabado de superficies, con una densidad de 1.08 Kg/l, idóneo para hormigones muy fluidos, autocompactantes, entre otros (MC-Bauchemie, s.f.a)

- VP-MC-Perma-71 (líquido): Aditivo superplastificante con alta retención de fluidez, baja adherencia, conservación de la fluidez, adecuado para hormigones con alta fluidez y con necesidad de tolerancia a altas temperaturas. Presenta una densidad de 1.05 kg/l (MC-Bauchemie, s.f.b).

Los cuatro productos son especificados como reductores de agua, con bajos tiempos de absorción, además de mejorar prestaciones de resistencia a edades tempranas. Dos productos son de la compañía Sika y los otros dos son de la firma MC.

Se trabajará con relación aditivo/ cemento del orden de 3 % a 5 % del peso del volumen de cemento.

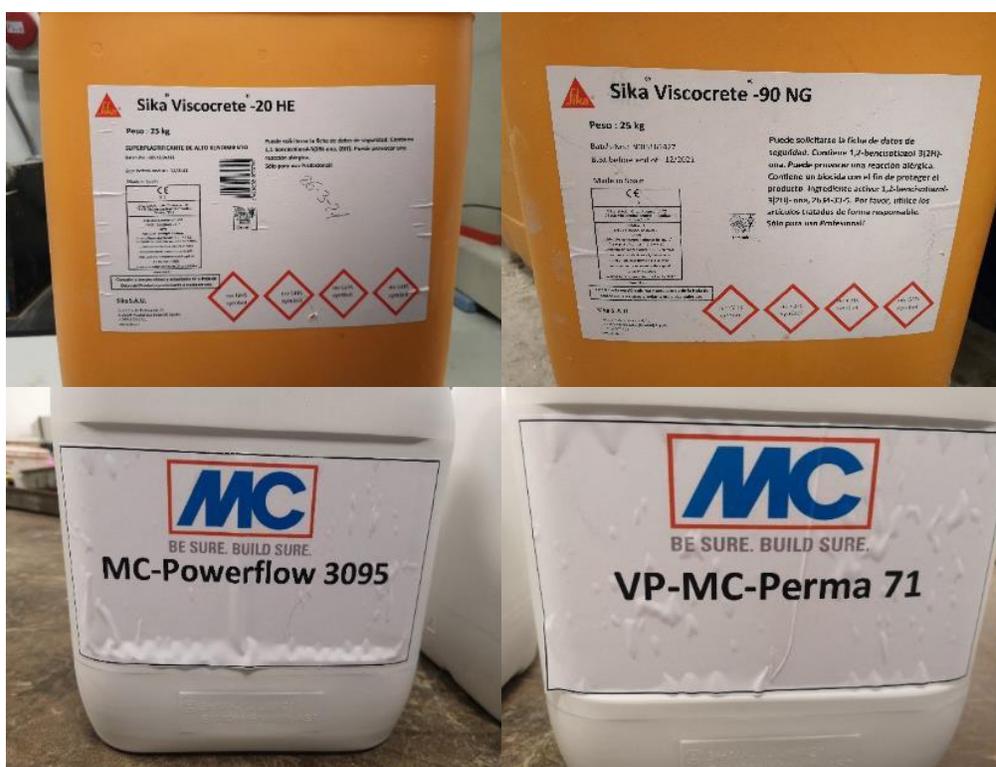


Figura 36. Aditivos superplastificantes.

4. Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados de la campaña experimental propuesta. Para una mayor comprensión, las figuras tendrán, además de las notaciones de cada muestra, una clasificación por colores, donde:

- Rojo: Muestra base (MB)
- Azules: Muestras a las que se modificaron los finos. M1 R-HCxC / M2 R-QFxFC / M3 R-HCxAS0.4 (100) / M4 R-HCxAS (50/50)
- Verde: Muestras a las que se modificaron los aditivos. M5 I-S-20HE / M6 RI-S-90NG / M7 RI-S-20HExMC
- Gris: Modificación de aditivo, fino, y relación A/C. M8 I-A/C / M9 R-HCxAS(30/70)-20HE / M10 R-HCxAS(30/70)-MC

4.1 Evolución de trabajabilidad

Se presentan los resultados obtenidos de manera gráfica para cada uno de los planteamientos propuestos para la evolución de la trabajabilidad. La figura de evolución de la fluidez, medida como el diámetro de la mezcla en la mesa de flujo, permite observar cómo varía la fluidez a medida que transcurre el tiempo, hasta llegar a perder consistencia.

4.1.1 Ensayos con amasado continuo y prueba de Mini Slump:

Evaluando solo la modificación de finos se puede ver que la muestra base presenta disminución significativa en la trabajabilidad, alcanzado diámetros de 10 centímetros a los 90 minutos. En contraste, las mezclas en las que se reemplazó la harina de cuarzo por arena de sílice (M3 R-HCxAS0.4 (100) - M4 R-HCxAS (50/50)) muestran un comportamiento muy positivo, manteniendo una buena trabajabilidad durante un período de 210 minutos, conservando diámetros de hasta 13 cm antes de perder la consistencia. De igual manera, la mezcla con reemplazo de harina de cuarzo por Filler Calizo (M2 R-HCxFC) consigue resultados muy favorables, alcanzado buena trabajabilidad hasta los 165 min y diámetros de 12.5 cm. Por último, la muestra en la que se realizó el reemplazo por Cemento (M1 R-HCxC) presenta un comportamiento desfavorable en términos de trabajabilidad, pues esta propiedad se pierde rápidamente, con tiempos de 75 min, después de lo cual la prueba no se puede llevar a cabo debido a la falta de fluidez (Figura 37).

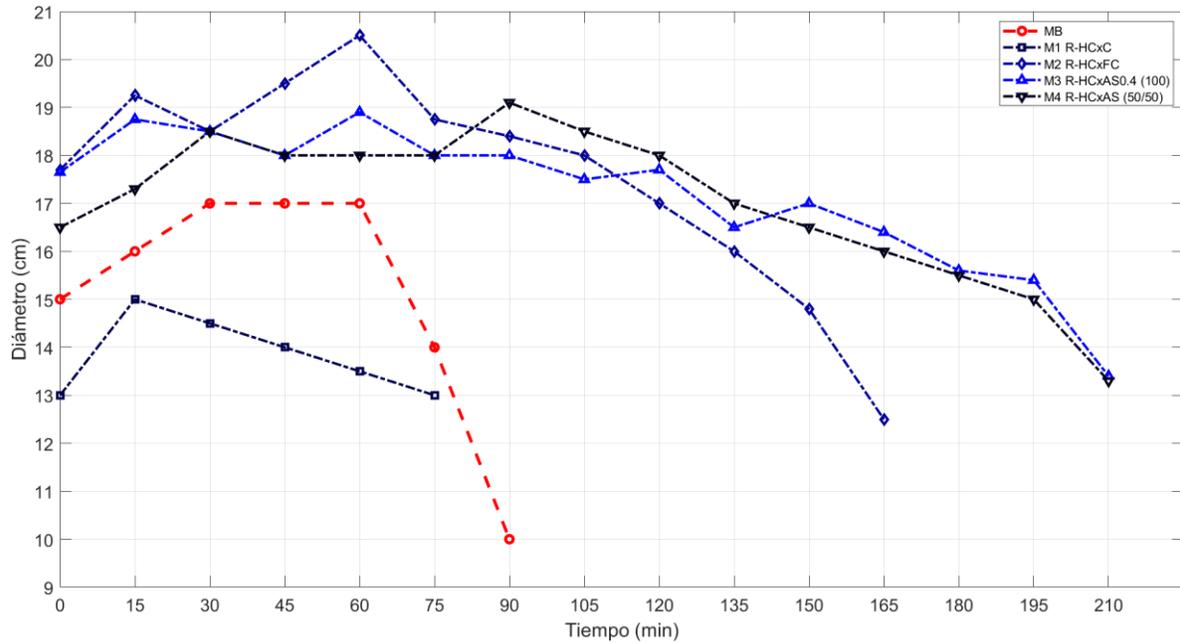


Figura 37. Amasado continuo - Mini Slump (modificación de Finos).

En el caso de las modificaciones con aditivos, se observa que las muestras con un aditivo diferente a Sika Visocrete 20HE han mostrado tiempos de fluidez más cortos y diámetros menores en contraste con lo ocurrido en la muestra que contiene una mayor cantidad de este aditivo. Sin embargo, es importante destacar que, aunque los tiempos de fluidez logrados con la modificación del aditivo superan los de la muestra base, estos resultan menos representativos en comparación con las mejoras logradas mediante las modificaciones en la fracción fina del material (Figura 38).

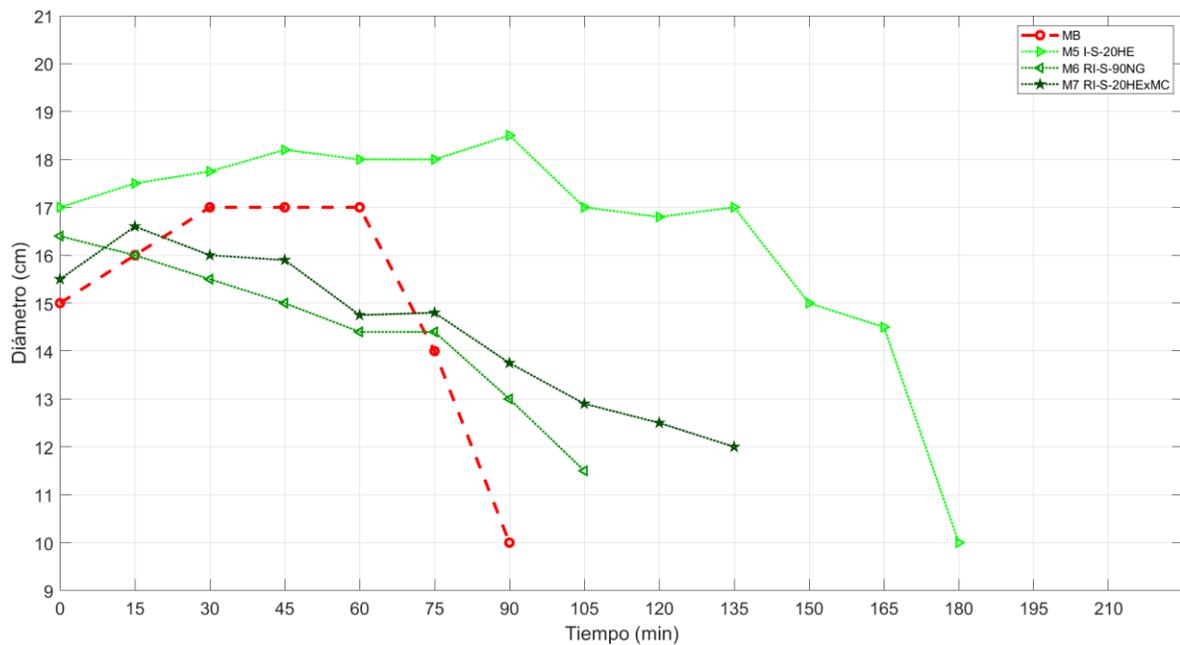


Figura 38. Amasado continuo - Mini Slump (modificación de aditivos).

La Figura 39 demuestra que las modificaciones en las adiciones, aditivos y la relación agua-cemento combinadas tienen un impacto positivo en la trabajabilidad en comparación con la muestra base, incluso teniendo en cuenta las modificaciones presentadas en figuras anteriores. Destacan especialmente M9 R-HCxAS(30/70)-20HE y M10 R-HCxAS(30/70)-MC por su comportamiento más uniforme y su capacidad para mantener una mayor fluidez a lo largo del tiempo. Es importante destacar que la muestra con Sika Visocrete 20HE contiene 25 g/l de aditivo, a diferencia de la mezcla con MC POWER FLOW 3095 que contiene 30 g/l. La modificación en la fracción fina de la matriz es la misma para ambas muestras. Por último, la dosificación en la cual solo se modificó la relación agua-cemento, M8 I-A/C, obtiene resultados muy favorables, manteniendo su homogeneidad y fluidez durante 165 minutos.

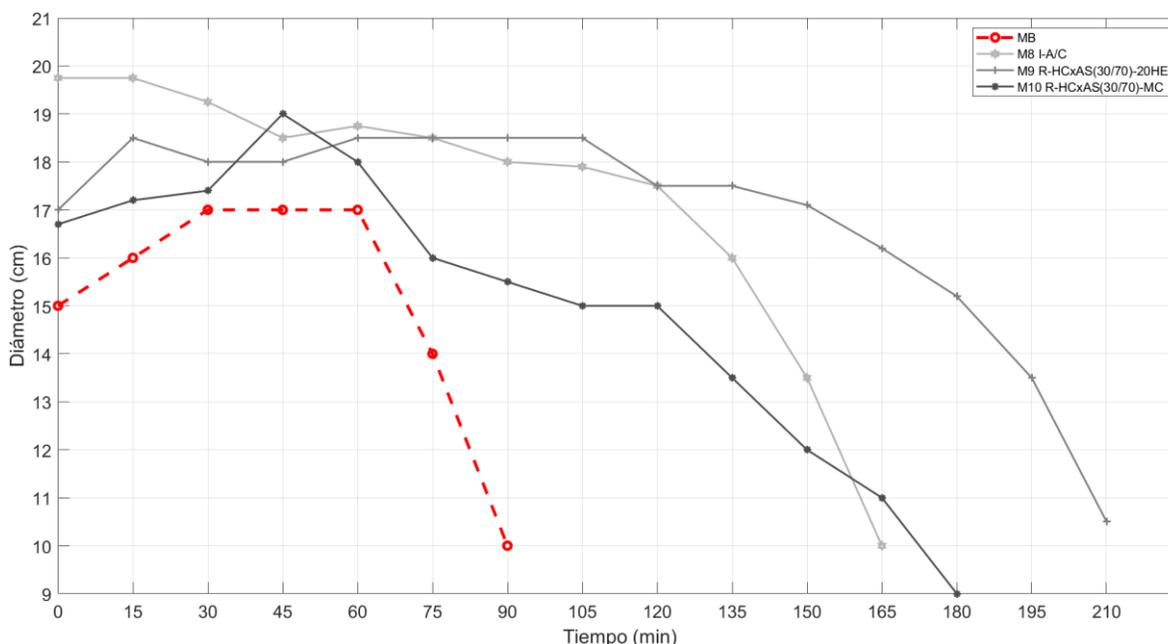


Figura 39. Amasado continuo - Mini Slump (modificación aditivo - fino – A/C).

El consolidado presentado en la Figura 40 permite ver que las dosificaciones, en términos generales, han conseguido mejoras en la trabajabilidad en comparación con la muestra base, consiguiendo curvas más tenidas y conservadas en el tiempo. En el caso de la modificación de la fracción fina, las mezclas que sustituyeron la harina de cuarzo por arena de sílice (M3 R-HCxAS0.4 (100) - M4 R-HCxAS (50/50)) mantuvieron una buena trabajabilidad durante 210 minutos, al igual que la muestra M9 R-HCxAS(30/70)-20HE, que combina modificaciones en la fracción fina y aditivos. En cuanto a las modificaciones con aditivos, la muestra M5 I-S-20HE, que incluye Sika Visocrete 20HE, logra tiempos de fluidez de hasta 180 minutos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que un exceso de finos resulta en una pérdida rápida de esta propiedad, como se observa en la muestra que sustituyó la harina de cuarzo por cemento (M1 R-HCxC) (Figura 40).

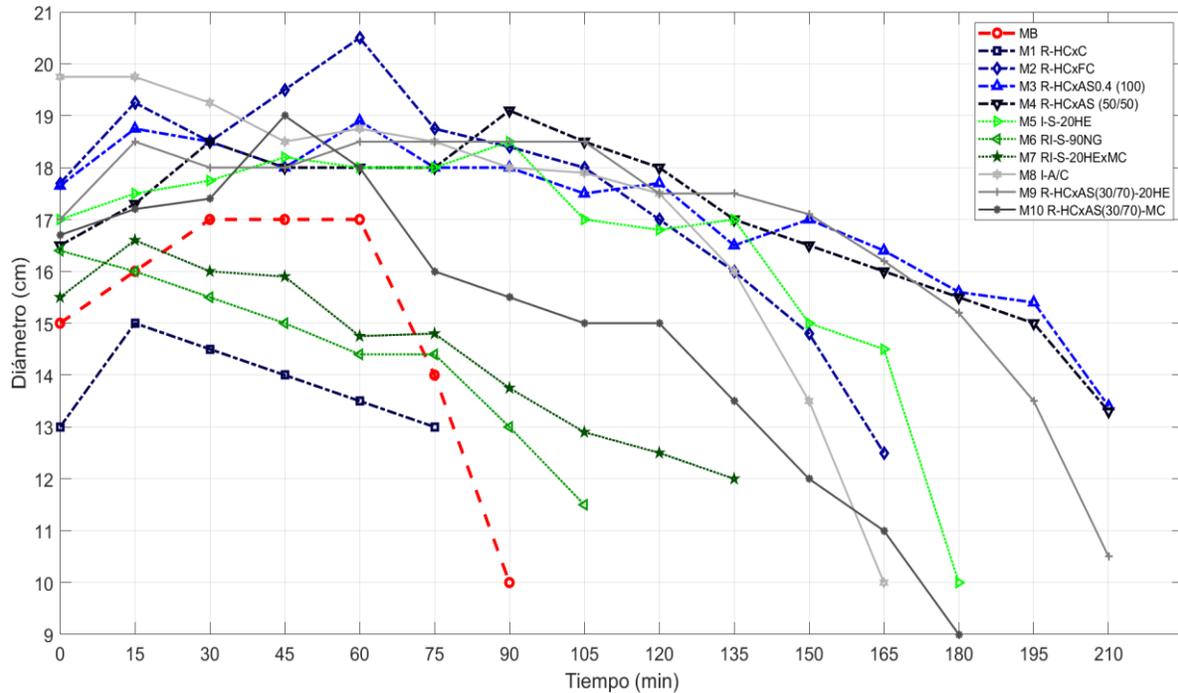


Figura 40. Amasado continuo - Mini Slump (consolidado).

4.1.2 Ensayos con amasado continuo y mesa de sacudidas

Al someter las muestras a la mesa de sacudidas (ver Figuras 41-44), se observa una mejora en el comportamiento de la muestra base, con tiempos de hasta 120 minutos y diámetros de 13 cm antes de la pérdida de fluidez. Esta mejoría también se mantiene en las mezclas en las que se reemplazó la harina de cuarzo por arena de sílice (M3 R-HCxAS0.4 (100) - M4 R-HCxAS (50/50)), que conservan su fluidez hasta 210 minutos con diámetros de 16 y 17 cm, respectivamente. En contraste, la mezcla con reemplazo de harina de cuarzo por filler calizo (M2 R-HCxFC) no muestra mejoras significativas y pierde homogeneidad a los 165 minutos, manteniendo una buena trabajabilidad con 14 cm de diámetro. En el caso de M1 R-HCxC (reemplazo por cemento), se logran tiempos de 90 minutos, pero la fluidez y la homogeneidad se pierden drásticamente, sin evidenciar mejoras en los diámetros.

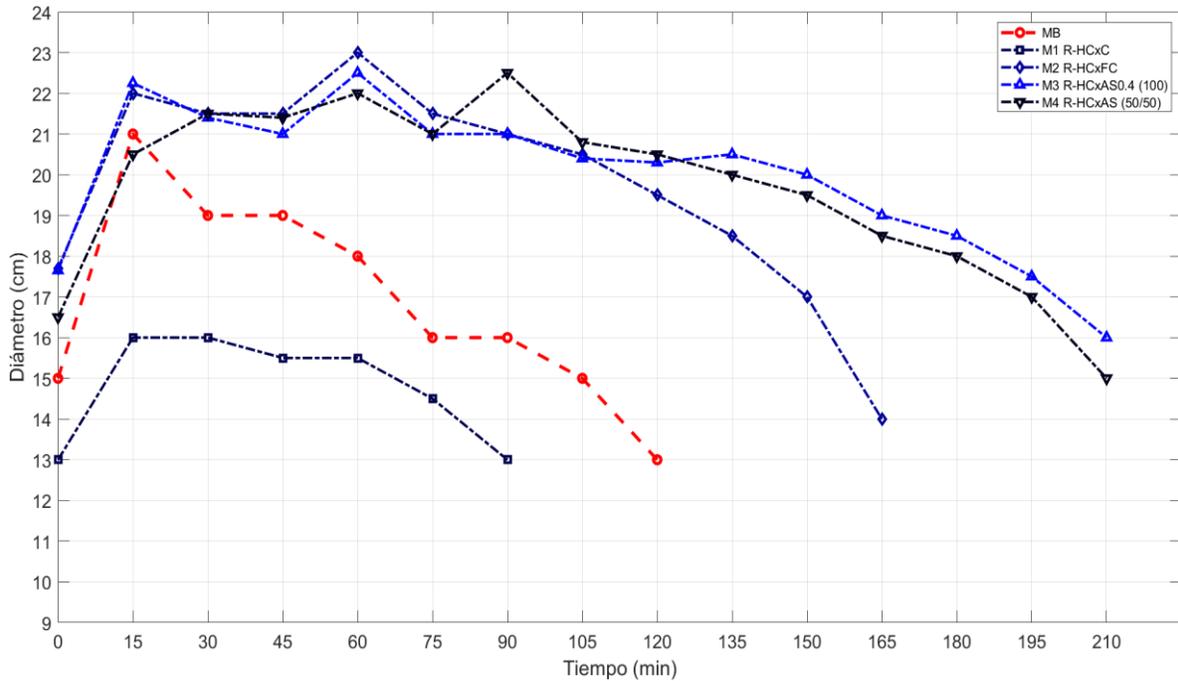


Figura 41. Amasado continuo - Mesa de sacudidas (modificación de finos).

Las muestras mantienen el comportamiento observado en el ensayo anterior, donde destaca claramente la muestra M5 I-S-20HE por sus resultados. En este ensayo, las demás muestras conservan diámetros y tiempos similares, oscilando entre 13 y 13.5 cm de diámetro y 105 a 135 minutos antes de perder su homogeneidad y fluidez.

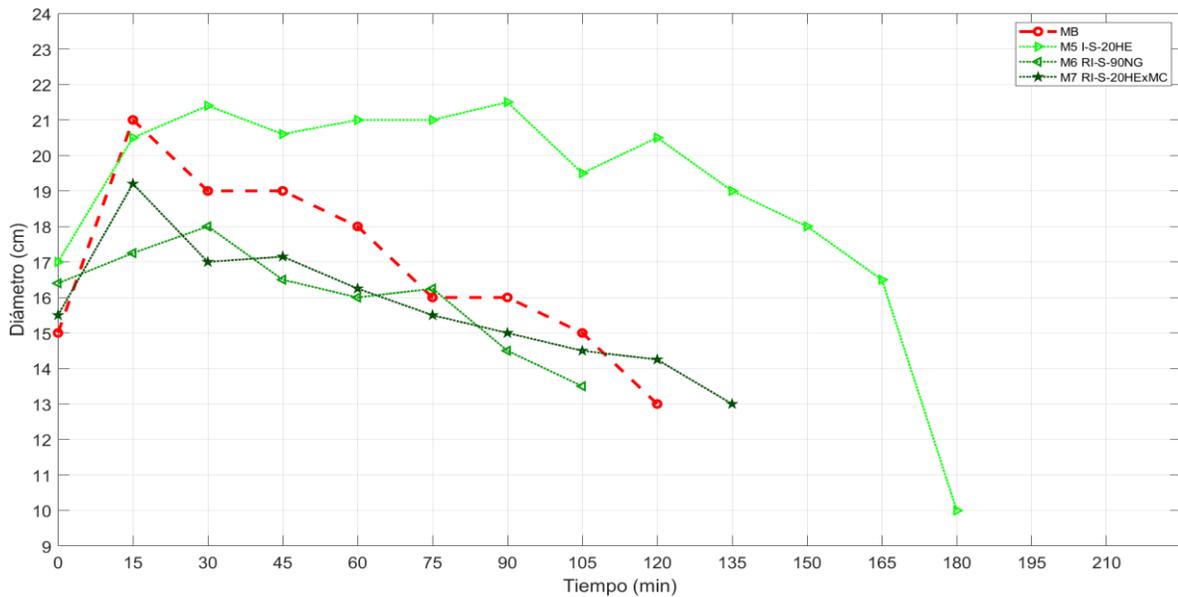


Figura 42. Amasado continuo - Mesa de sacudidas (modificación de aditivos).

Continúa sobresaliendo la muestra M9 R-HCxAS(30/70)-20HE, seguida por M10 R-HCxAS(30/70)-MC y M8 I-A/C, consiguiendo resultados muy favorables, con diámetros superiores a 10 cm antes de perder fluidez y homogeneidad, lo que se ve como una mejora significativa en esta propiedad respecto a la muestra base.

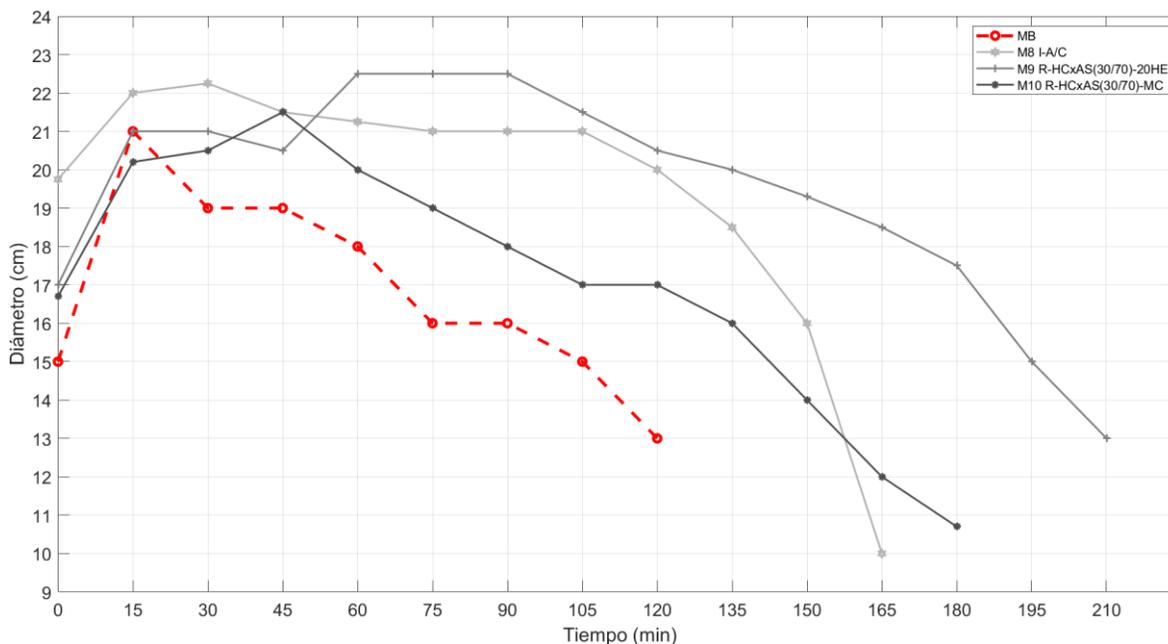


Figura 43. Amasado continuo - Mesa de sacudidas (modificación aditivo - fino – A/C).

Esta figura consolidada marca una tendencia donde claramente las muestras M3 R-HCxAS0.4 (100), M4 R-HCxAS (50/50) y M9 R-HCxAS(30/70)-20HE sostienen fluidez y homogeneidad hasta los 210 min, y conservan diámetros de entre 13 y 16 cm. M1 R-HCxAS es la muestra con la menor trabajabilidad, incluso luego de aplicar mesa de sacudidas.

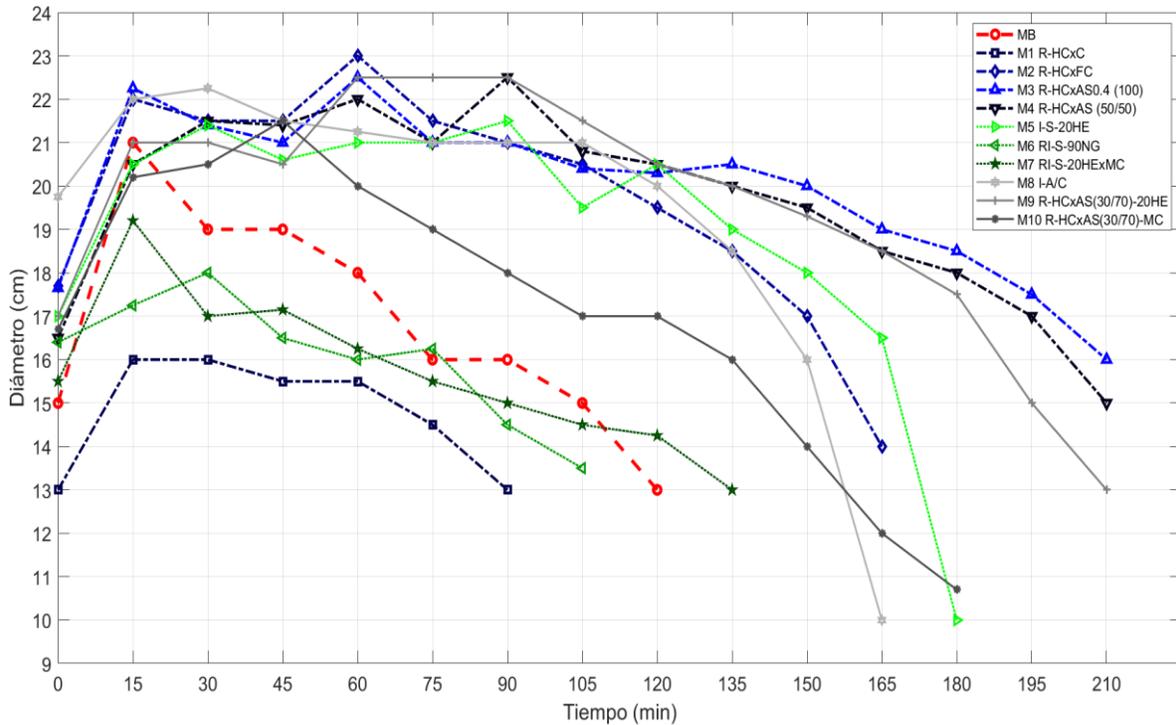


Figura 44. Amasado continuo - Mesa de sacudidas (consolidado).

4.1.3 Ensayos con amasado único y prueba de Mini Slump

La Figura 45 se puede ver que, las muestras con sustitución de harina de cuarzo por arena de sílice tienen un comportamiento mejorado; sin embargo, muestran una pérdida constante de trabajabilidad en menos de 60 minutos. Se nota que M3 R-HCxAS0.4 (100) mantiene su fluidez durante un tiempo ligeramente superior en comparación con M4 R-HCxAS (50/50). Por otro lado, la muestra con reemplazo por filler calizo inicia con una alta trabajabilidad 17.4 cm y experimenta una rápida disminución de esta, alcanzando 10.5 cm al final del ensayo, un valor inferior a las otras dos muestras, que concluyen el ensayo con 12 cm. La muestra base muestra una disminución progresiva en la trabajabilidad y la pierde a los 30 minutos. Finalmente, se observa que la muestra con mayor contenido de material cementante es la que presenta una menor trabajabilidad, experimentando una pérdida de esta propiedad en los primeros 15 minutos.

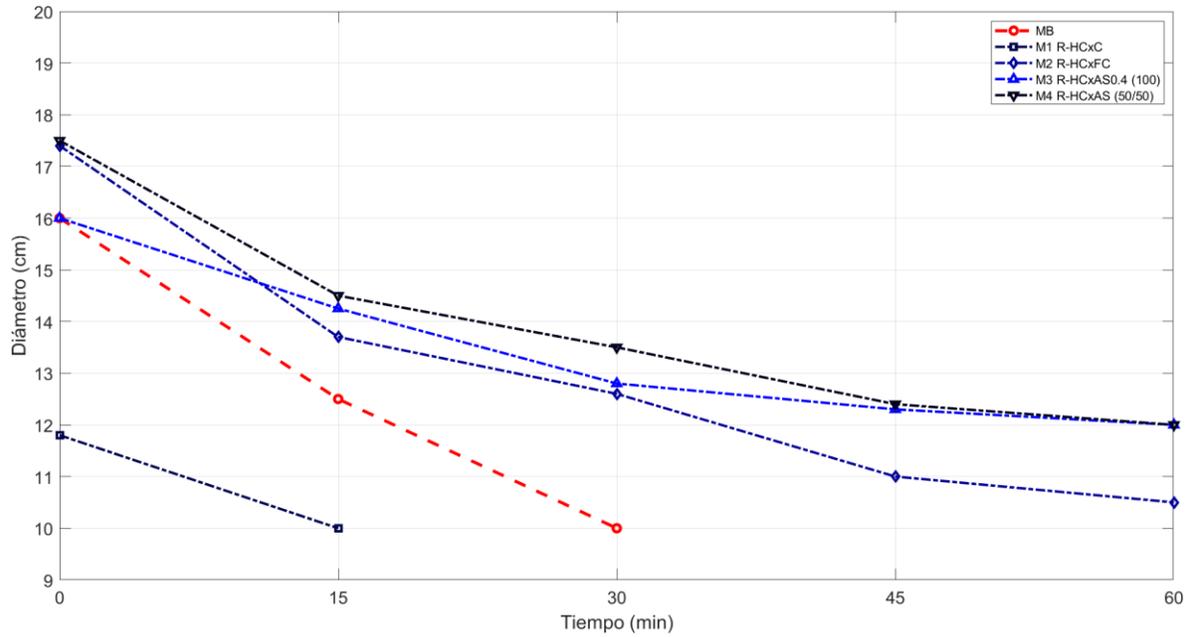


Figura 45. Amasado único - Mini Slump (modificación de finos).

La muestra M7 RI-S-20HExMC, que tiene reemplazo de aditivo superplastificante Sika Viscocrete 20HE por MC Power Flow 3095, presenta una caída elevada de la trabajabilidad en los primeros 15 minutos, y conserva durante 30 minutos un diámetro de entre 11 y 10.5 cm. En comparación, la muestra M5 I-S-20HE, con incremento en la cantidad de aditivo, presenta un rendimiento inferior al de la muestra M6 RI-S-90NG, que tiene cambio de aditivo. Ambas muestras trabajan con 40 g/l de superplastificante, como se ve en la Figura 46.

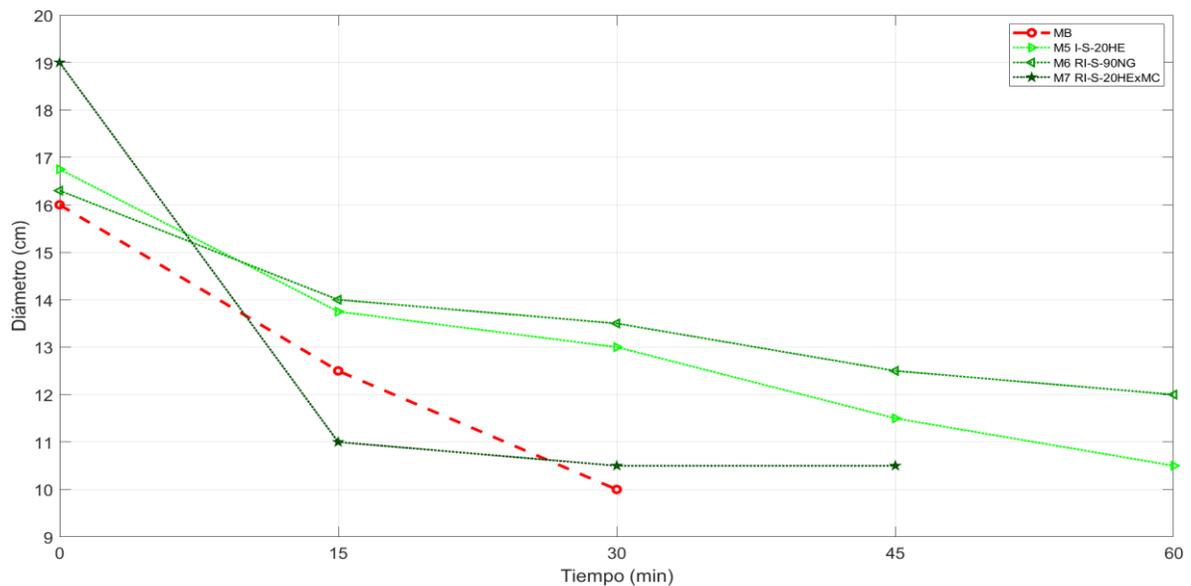


Figura 46. Amasado único - Mini Slump (modificación de aditivos).

La muestra con un aumento en la relación agua-cemento, de 0.21 a 0.24, presentó una alta trabajabilidad al inicio del ensayo, pero experimenta una pérdida significativa en los primeros 15 minutos. A partir de ese punto, la pérdida es menos pronunciada, manteniendo una consistencia homogénea durante todo el ensayo. Las otras dos, aunque muestran un comportamiento similar al principio, presentan variaciones en su fluidez con el tiempo, siendo la muestra M9 R-HCxAS(30/70)-20HE la que tiene un mejor comportamiento en general (Figura 47).

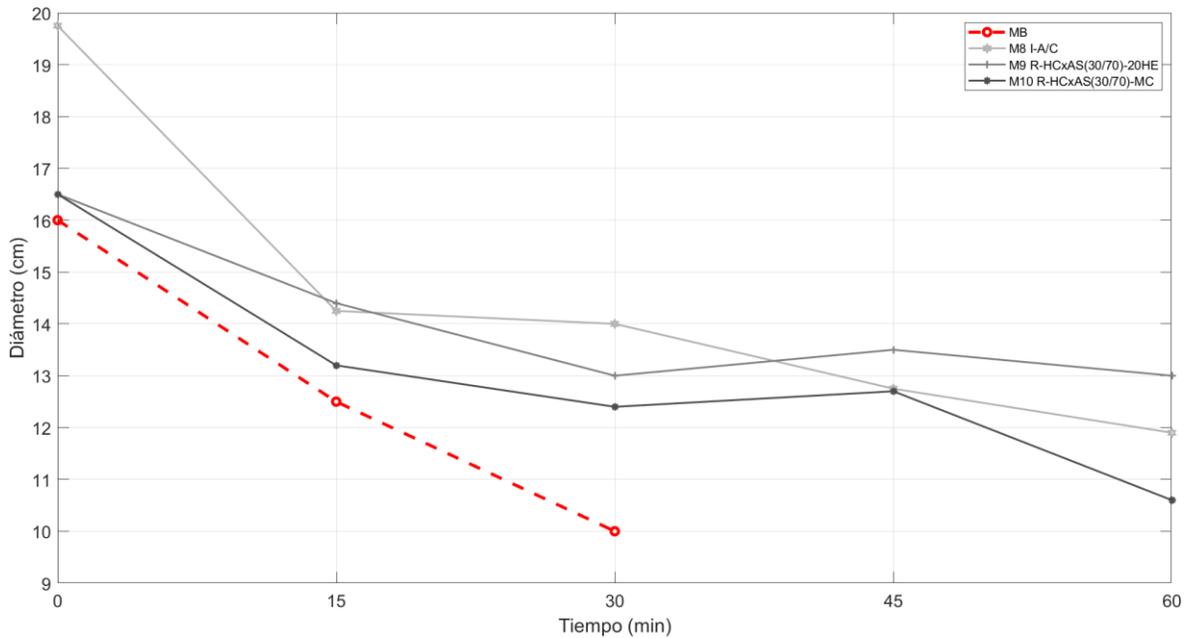


Figura 47. Amasado único - Mini Slump (modificación aditivo - fino – A/C).

La Figura 48 presenta todos los resultados unificados; se confirma que las muestras M8 I-A/C y M7 RI-S-20HExMC presentan una alta trabajabilidad al comienzo del ensayo; sin embargo, experimentan una pérdida significativa de esta propiedad en los primeros 15 minutos. Se destaca que M8 I-A/C muestra un mejor comportamiento en la parte intermedia del ensayo en comparación con las otras muestras. Finalmente, la muestra M9 R-HCxAS(30/70)-20HE presenta los mejores resultados de trabajabilidad al final del ensayo. M1 R-HCxC continua como la muestra con menor trabajabilidad.

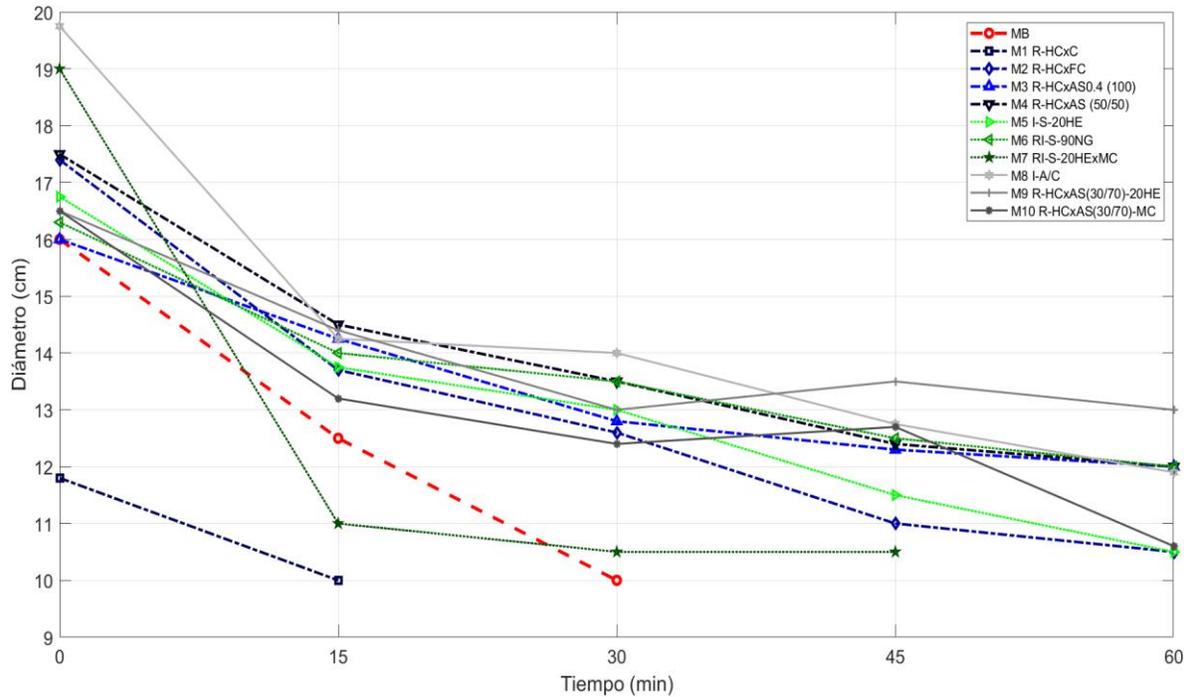


Figura 48. Amasado único - Mini Slump (consolidado).

4.1.4 Ensayos con amasado único y mesa de sacudidas

La vibración o agitación realizada con la mesa de sacudidas continúa mejorando la trabajabilidad y arrojando diámetros superiores a los del ensayo Mini Slump. Continúa las muestra M3 R-HCxAS0.4 (100) y M4 R-HCxAS (50/50) arrojando resultados favorables respecto a la muestra base, como se ve en la Figura 49.

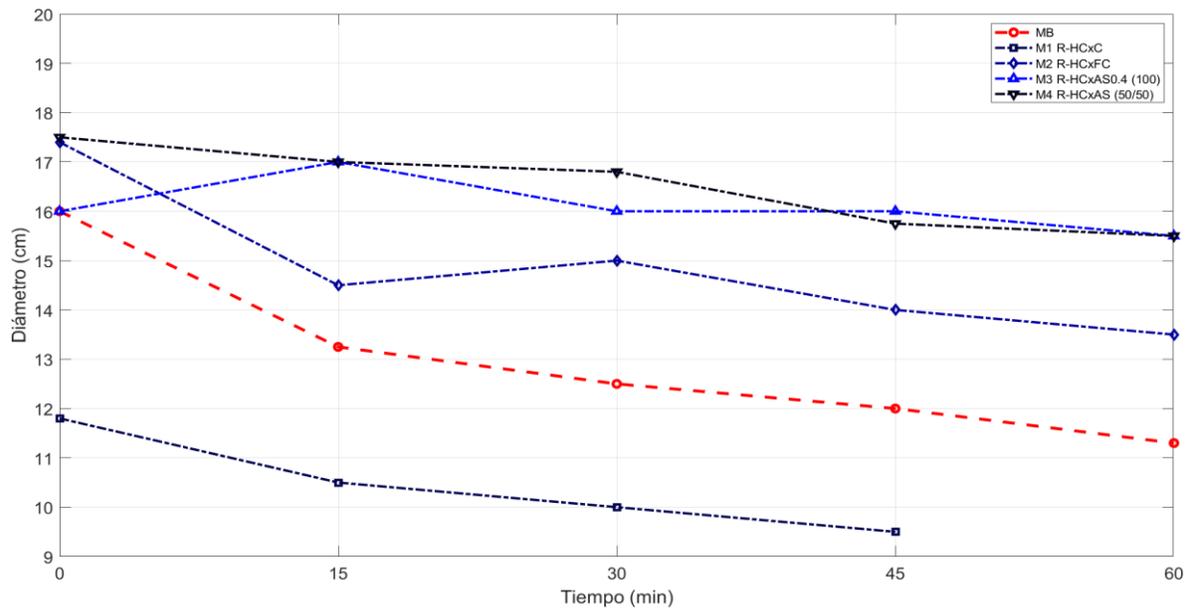


Figura 49. Amasado único - Mesa de sacudidas (modificación de finos).

En la Figura 50 se evidencia mejora en los diámetros, principalmente en la muestra M7 RI-S-20HExMC que sostiene diámetros de entre 12 y 13 cm durante la realización de los ensayos, lo que permite una menor pérdida de trabajabilidad respecto al resultado sin vibración. Las muestras con resultado más homogéneo continúan siendo M5 I-S-20HE y M6 RI-S-90NG, ambos superplastificantes de la marca Sika.

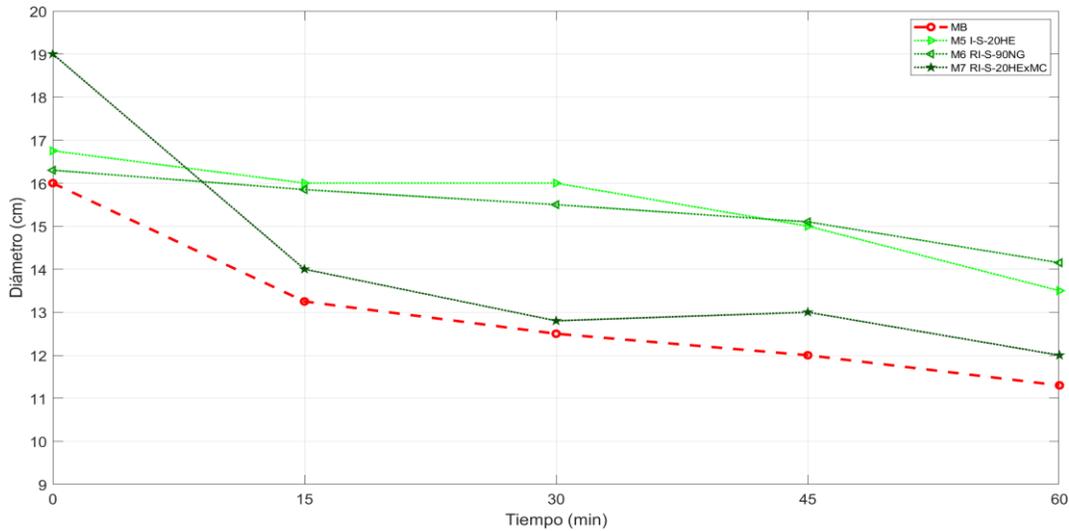


Figura 50. Amasado único - Mesa de sacudidas (modificación de aditivos).

A pesar de que la muestra que experimenta el cambio de harina de cuarzo por arena de sílice y la adición del superplastificante Sika Visocrete 20HE muestra una menor trabajabilidad al inicio, logra mantener esta propiedad a lo largo del tiempo, lo que la hace más estable. Las demás muestras presentan una disminución constante en la pendiente (Figura 51).

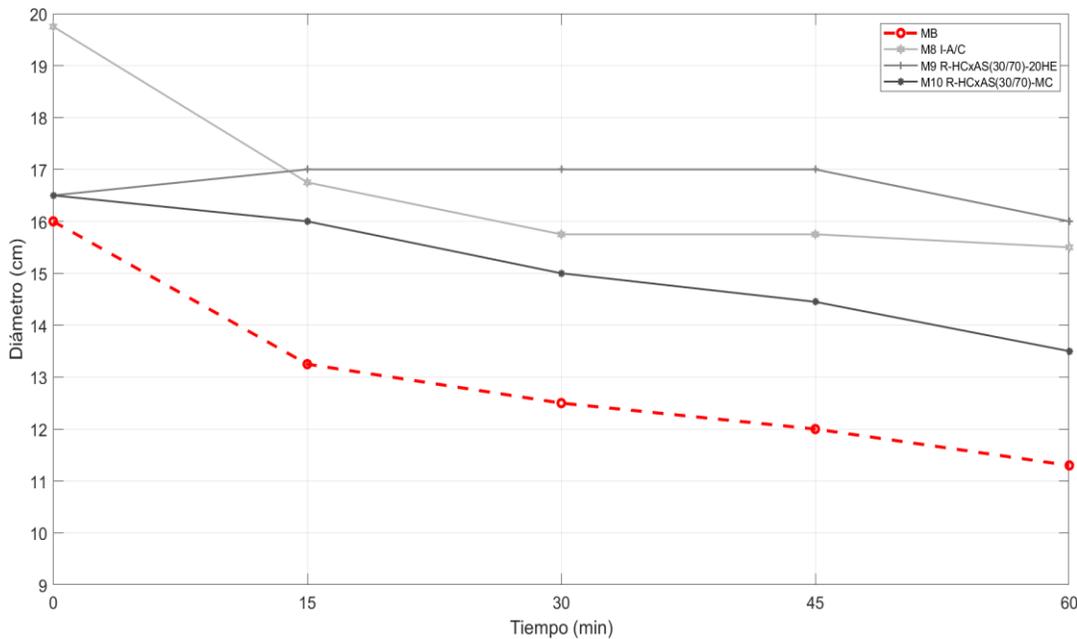


Figura 51. Amasado único - Mesa de sacudidas (modificación aditivo - fino - A/C).

El consolidado presentado en la Figura 52 permite ver claramente lo indicado respecto a la muestra a la cual se le aumentó la relación agua cemento; así mismo, evidencia lo indicado respecto a la muestra M9 R-HCxAS(30/70)-20HE. En este caso siguen M3 R-HCxAS0.4 (100), M4 R-HCxAS (50/50) y M10 R-HCxAS(30/70)-MC con un comportamiento muy bueno en comparación con la muestra base. Finalmente, se ratifica que la muestra con mayor cantidad de cemento es la que menor trabajabilidad presenta.

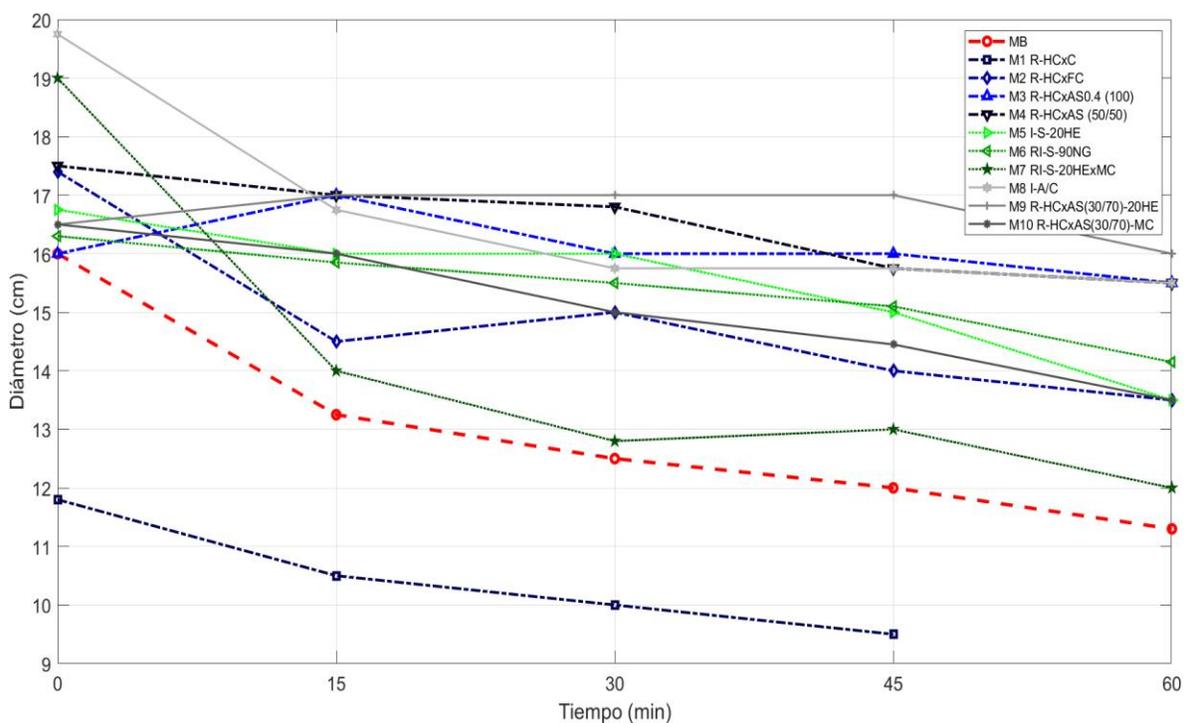


Figura 52. Amasado único - Mesa de sacudidas (consolidado).

4.2 Tiempos de fraguado

Con la metodología propuesta, se cuantificaron los tiempos de fraguado de las mezclas. A continuación, se presentan los tiempos de inicio.

La Figura 53 nos presenta lo siguiente, la muestra M1 R-HCxC, con un mayor contenido de cemento, presenta el tiempo más corto para el inicio del proceso de fraguado. Le sigue la Muestra M7 RI-S-20HExMC con MC Powerflow 3095. Estos hallazgos son consistentes con los resultados de los ensayos de trabajabilidad, donde estas muestras tienden a mostrar una trabajabilidad inferior en comparación con las demás, con valores muy por debajo de los obtenidos con la muestra base.

Por otro lado, las muestras M5 I-S-20HE, M6 RI-S-90NG, M3 R-HCxAS0.4 (100) y M4 R-HCxAS (50/50) presentan tiempos de inicio de fraguado más prolongados. Estas muestras, siendo las dos primeras las que contienen una mayor cantidad de aditivo y las dos últimas las que reemplazan completamente la harina de cuarzo por arena de sílice, indican que niveles elevados de aditivo pueden resultar contraproducentes para el inicio del fraguado. Además, el reemplazo total del

material fino por arena garantiza tiempos de trabajabilidad más extensos. Estas últimas observaciones se aplican a las muestras M9 R-HCxAS(30/70)-20HE y M10 R-HCxAS(30/70)-MC.

Finalmente, la muestra M8 I-A/C, con una mayor cantidad de agua, presenta tiempos prolongados de inicio de fraguado.

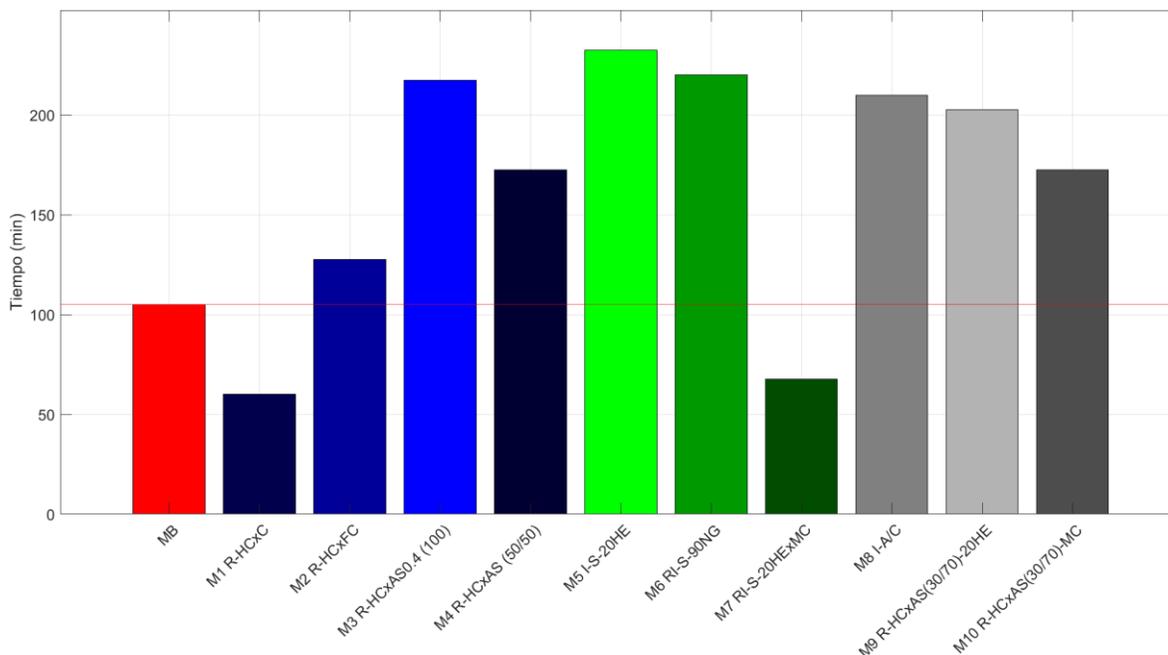


Figura 53. Tiempo de inicio de fraguado.

Se aprecia que la muestra M1 R-HCxC, con un mayor contenido de cemento, es la que alcanza el fin de fraguado más rápidamente, seguida de cerca por M8 I-A/C, que tiene una mayor cantidad de agua, estando ambas con tiempos inferiores a la muestra base. En el caso de M3 R-HCxAS0.4 (100), M4 R-HCxAS (50/50) y M9 R-HCxAS (30/70)-20HE, que involucra el reemplazo de finos por arenas, se obtienen tiempos similares en el orden de 420 a 450 minutos hasta el fin de fraguado, valor de igual forma muy cercano a M5 I-S-20HE con 480 minutos (Figura 54). Así mismo, se presenta a continuación un consolidado de iniciales y finales de fraguado (Figura 55).

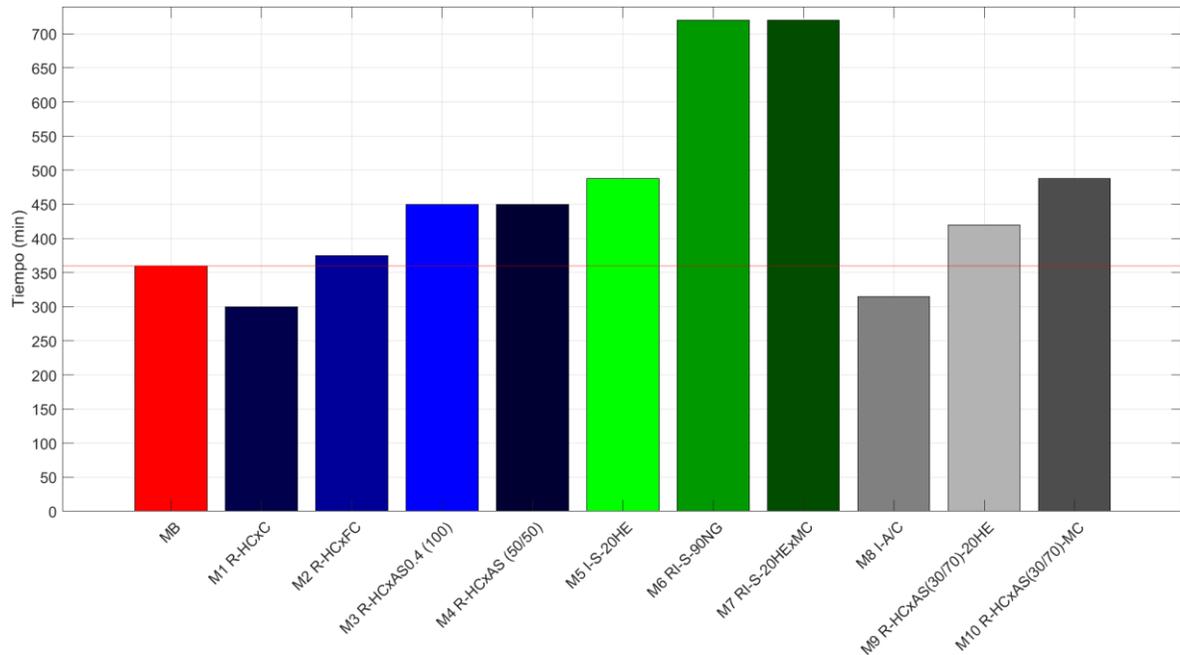


Figura 54. Tiempo de fin de fraguado.

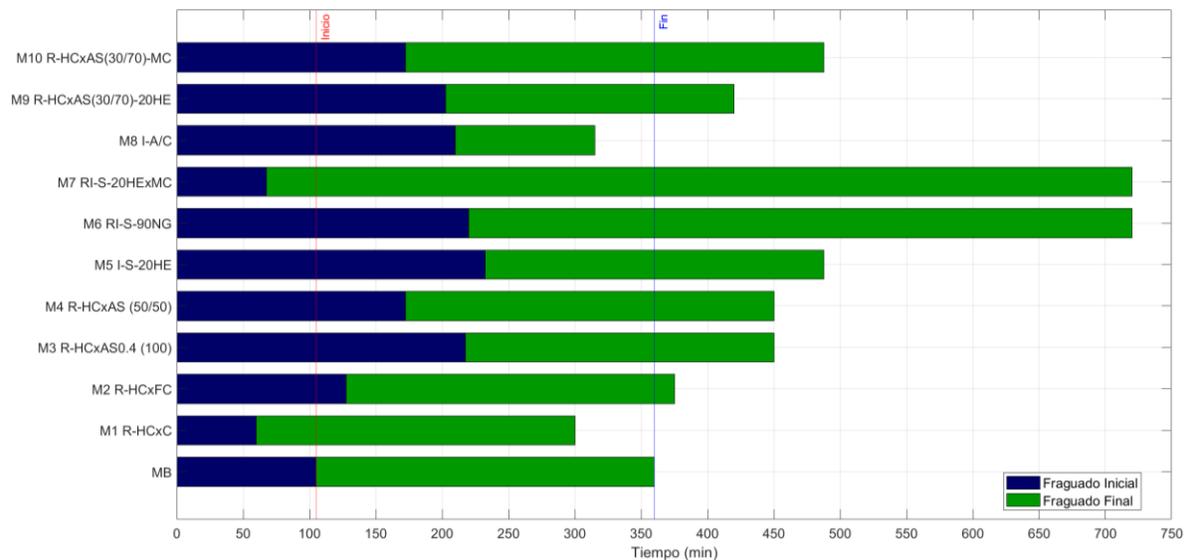


Figura 55. Tiempo de iniciales y finales de fraguado consolidados.

Sin embargo, las muestras M6 RI-S-90NG y M7 RI-S-20HExMC, que tienen contenido de Visocrete 90NG y MC POWERFLOW 3095 respectivamente, arrojaron resultados desfavorables durante las pruebas. En varias ocasiones, se registraron tiempos de fraguado falsos, y, al extraer las muestras de las probetas, se observó que el interior seguía en estado de plasticidad como se puede ver en la Figura 55.



Figura 56. Muestras con falso fraguado. Izq. M6 RI-S-90NG – M6 – Der. M7 RI-S-20HExMC.

La Figura 57 facilita la identificación del tiempo total de fraguado de cada muestra, el cual se obtiene calculando la diferencia entre los tiempos finales de fraguado y los iniciales.

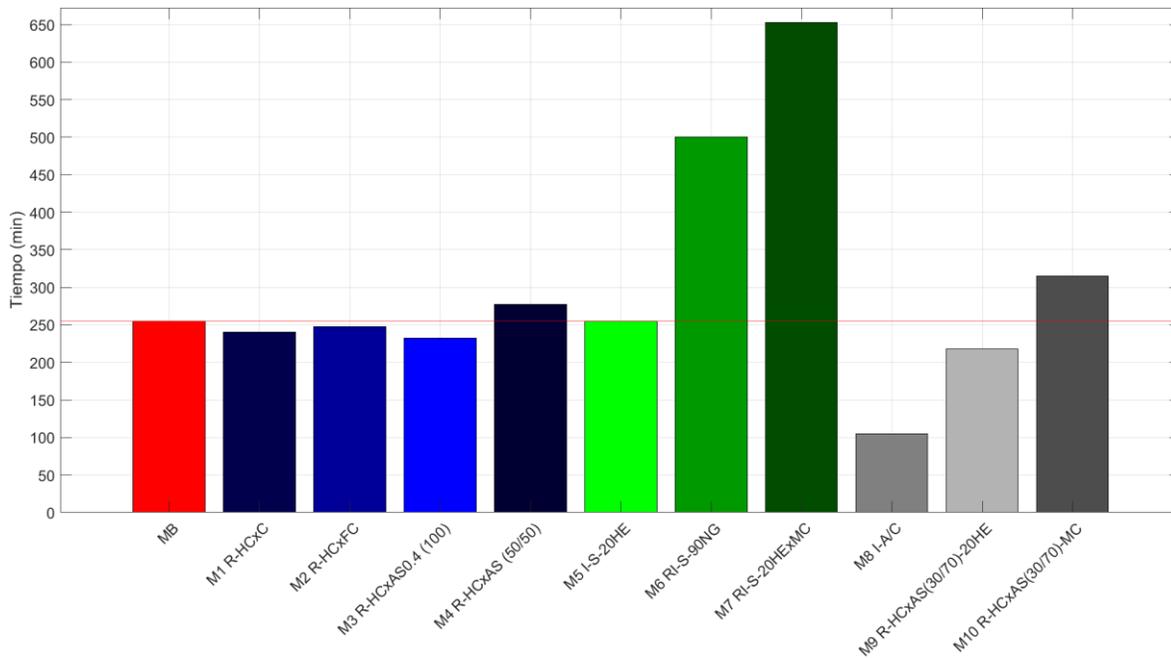


Figura 57. Tiempo total de fraguado.

Al totalizar los tiempos, las muestras exhiben tiempos muy similares a la muestra base. Esto indica que, aunque se han aumentado los tiempos de trabajabilidad y, en consecuencia, los tiempos de inicio de fraguado, no se han desviado significativamente del tiempo total requerido entre el inicio y el fin del fraguado que se tiene por referencia. Es evidente que la muestra M8 I-A/C con 105 minutos es la que requiere menos tiempo para fraguar, con un total inferior a 2 horas. Esto sugiere que un mayor contenido de agua favorece la hidratación y contribuye al proceso de fraguado.

Seguido de esta muestra se encuentra M9 R-HCxAS (30/70)-20HE con 217 minutos de tiempo total de fraguado.

Por otro lado, las muestras M6 RI-S-90NG y M7 RI-S-20HEXMC presentan tiempos de fraguado notablemente más largos, superando las 10 horas. Sin embargo, es importante mencionar que estas muestras pierden fluidez y trabajabilidad rápidamente. Con un amasado continuo, alcanzan tiempos de 105 minutos, y con un amasado único se observa que la muestra disminuye de 16 cm a 12 cm de diámetro en 60 minutos. Esto indica que estas muestras alcanzan un estado de plasticidad de manera rápida (Figura 55), y el proceso de adquirir resistencia es notablemente más lento. Es relevante subrayar que se generan varios falsos fraguados durante el proceso de adquisición de resistencia.

Finalmente, se ratifica que los tiempos de fraguado son superiores a los tiempos de fraguado de hormigones convencionales con cemento Portland (ver Figura 10). Esto se debe en gran medida a los componentes finos que tiene el material, pues este tiempo también se ve afectado por la finura de los componentes, su relación agua-cemento y los aditivos empleados, y, como se puede ver, en el caso de los UHPC las adiciones y aditivos son significativamente mayores, lo que contribuye a estos tiempos prolongados de fraguado.

4.3 Evolución de propiedades mecánicas

4.3.1 Ensayo de resistencia a la compresión

Se presentan los resultados de los ensayos a compresión y flexo-tracción, los cuales se realizaron a los 7 y 28 días, de conformidad con la norma.

Al analizar los resultados, se destaca que la muestra M1 R-HCxC, con un contenido de cemento significativamente elevado, logra la mayor resistencia tanto a los siete días, con un valor de 112 MPa, como a los 28 días, donde alcanza 131 MPa. Estos resultados evidencian la capacidad de esta muestra para mantener su resistencia a largo plazo, superando considerablemente a la muestra base (MB).

De manera similar, la muestra M9 R-HCxAS (30/70)-20HE presenta resistencias superiores a MB a los 28 días, alcanzando los 124 MPa, pero resistencias más bajas a corto plazo, con 88 MPa a los siete días.

Por otro lado, la muestra M2 R-QFxFC logra resistencias tempranas superiores a 100 MPa y, a los 28 días, alcanza resistencias del orden de 120 MPa.

Finalmente, las demás muestras obtienen resistencias a compresión que oscilan entre 100 MPa y 120 MPa a los 28 días. Además, la mayoría de las muestras registran valores por debajo de 100 MPa a los 7 días, a excepción de la muestra M3 R-HCxAS0.4 (100) que alcanza 101.03 MPa.

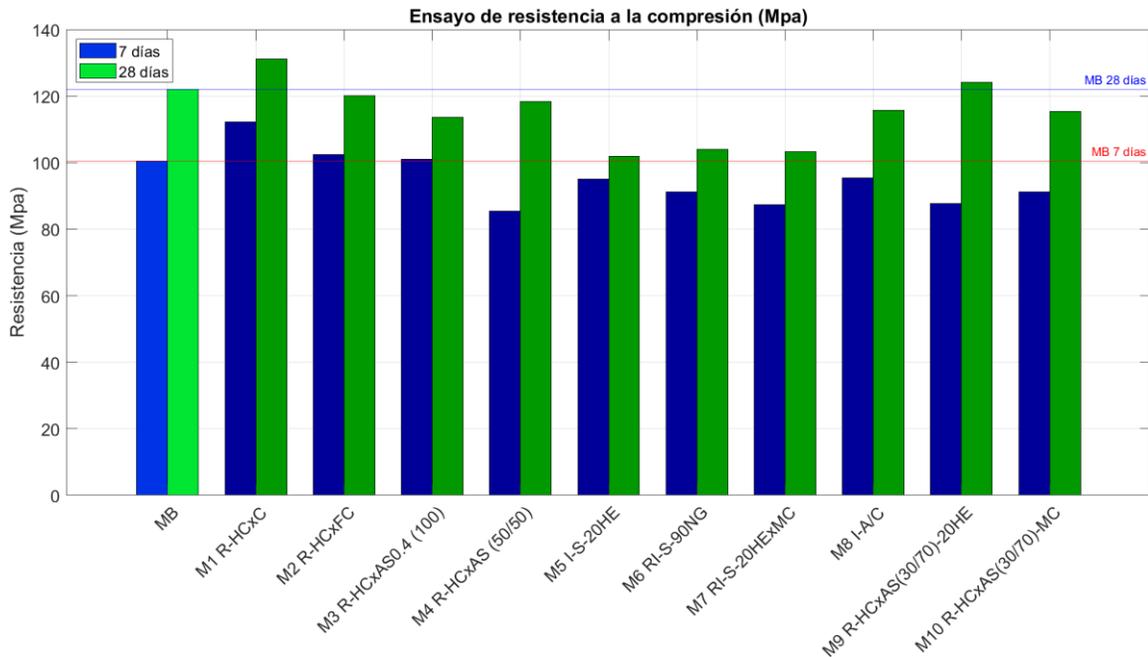


Figura 58. Resistencia media a compresión (Mpa).

4.3.2 Ensayo de resistencia a la flexo-tracción

En cuanto a la resistencia a la flexo-tracción, todas las muestras, a los siete días, registraron valores por debajo de los 12 MPa, que es la resistencia de la muestra base (MB). Sin embargo, a los 28 días, las muestras M1 R-HCxC y M8 I-A/C exhibieron valores significativamente superiores a los de la muestra base, mientras que M2 R-QFxFC y M7 RI-S-20HEXMC mostraron resistencias muy similares a MB.

Es interesante notar que todas las muestras que experimentaron una disminución de finos y su reemplazo por arenas de sílice alcanzaron resistencias de alrededor de 13 MPa a los 28 días. Aunque estas cifras son inferiores a los 16 MPa de la muestra base, superan las resistencias típicas de los hormigones convencionales, que generalmente oscilan entre el 8 % y el 15 % de la resistencia a la compresión. Para ponerlo en contexto, un hormigón de 35 MPa podría tener entre 3 MPa y 5 MPa de resistencia a la flexo-tracción.

Es importante destacar que las muestras que experimentaron la reducción de finos y el reemplazo por arena de sílice mostraron mejoras en la trabajabilidad, pero a costa de la resistencia a la flexo-tracción. Esto evidencia que la ausencia de materiales finos en la matriz densificada disminuye las características relacionadas con esta propiedad.

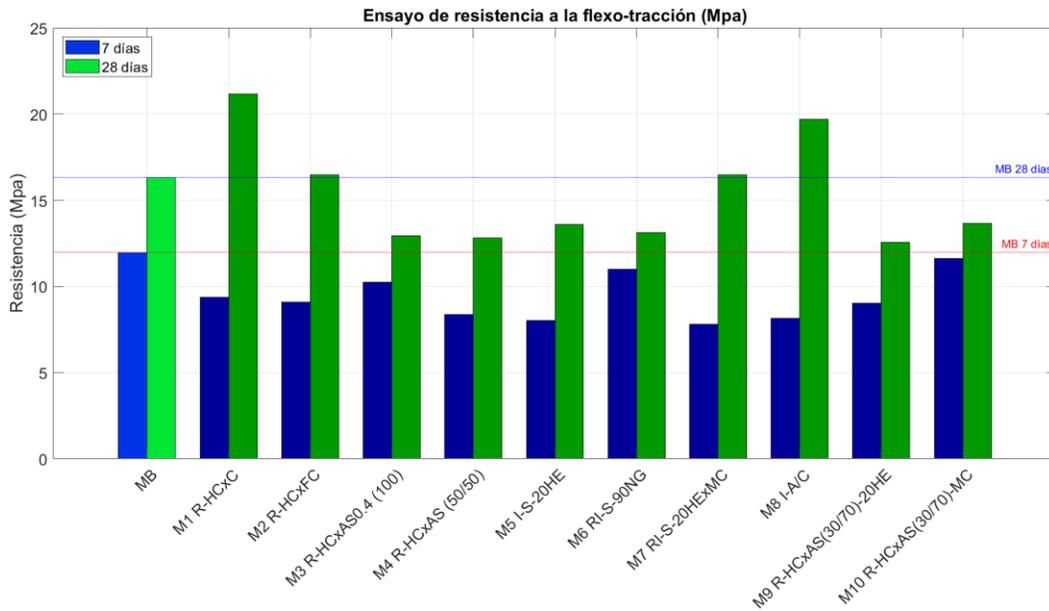


Figura 59. Resistencia a flexo-tracción (Mpa).

Finalmente, es relevante abordar la situación particular relacionada con el superplastificante VP-MC-Perma-71 en forma líquida, que se incluyó en el conjunto de materiales para este estudio. Después de realizar diversas pruebas y muestras, se constató que este aditivo no reaccionó de manera adecuada, lo que resultó en una disminución de la trabajabilidad y la imposibilidad de medir tiempos de fraguado y verificar propiedades mecánicas.

La incorporación de este aditivo condujo a la producción de un material poco homogéneo y pastoso que carecía de fluidez (ver Figura 55) y, como consecuencia, la interrupción de los ensayos. Es importante destacar que se debe considerar un estudio más exhaustivo para determinar las causas de este comportamiento y su posible aplicación en futuras investigaciones. En este estudio se emplearon aditivos superplastificantes en una proporción de entre el 3 % y el 5 % del peso total de cemento, y el VP-MC-Perma-71 no produjo resultados satisfactorios. Es posible que, en concentraciones menores, este producto genere resultados más favorables.



Figura 60. Muestras elaboradas con superplastificante VP-MC-Perma-71 (forma líquida).

5. Conclusiones

Este estudio se realiza buscando identificar el comportamiento de los componentes de un UHPC en la dosificación y cómo esto pueden aumentar o disminuir la trabajabilidad y los tiempos de fraguado. Tras realizar el estudio, contemplando los desarrollos que se han propuesto hasta la fecha en materia de hormigones especiales de altas prestaciones, se concluye lo siguiente:

- Considerando los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, se puede concluir que la muestra M9 R-HCxAS(30/70)-20HE, que involucra la reducción total de la harina de cuarzo por una combinación del 30 % de arena de sílice de 1,2 mm y el 70 % de arena de sílice de 0,8 mm, junto con una reducción en la cantidad de aditivo a 25 g/l, demuestra un comportamiento positivo en comparación con las otras muestras sometidas a análisis. Esta muestra se distingue por ofrecer consistentemente resultados sobresalientes en las pruebas reológicas y mecánicas. Cabe resaltar que presentó resultados bajos con respecto a la muestra base en la prueba de flexo-tracción, donde no alcanzó los 13 MPa. No obstante, es importante destacar que estos valores están significativamente por encima de los obtenidos con hormigones convencionales. Un aspecto relevante es que la disminución sustancial en la cantidad de harina de cuarzo es una ventaja adicional para esta dosificación. Por lo tanto, se propone que esta muestra sea considerada en futuros estudios relacionados con este material.
- Se destaca el planteamiento realizado para abordar dos condiciones representativas del mercado mediante el uso de los ensayos de trabajabilidad. El enfoque metodológico propuesto logra una representación aproximada del mercado, al considerar tanto el amasado único como el amasado continuo en combinación con los ensayos de Mini Slump y mesa de sacudidas. Esto permite tener una visión sobre el comportamiento del hormigón durante la producción de hormigón premezclado y la fabricación in situ. Es importante señalar que ambos ensayos se llevaron a cabo de acuerdo con las normativas correspondientes.
- A medida que se incrementa la proporción de materiales cementantes en las mezclas de hormigón, la trabajabilidad disminuye, lo que, a su vez, puede resultar en un aumento de la resistencia del hormigón. Sin embargo, para mantener una mezcla homogénea y de alta calidad con una adecuada trabajabilidad, suele ser necesario recurrir a una mayor dosificación de aditivos superplastificantes.
- Un aumento moderado en la cantidad de agua puede ayudar a preservar las propiedades reológicas del hormigón de ultra alta resistencia (UHPC), aunque con una ligera disminución en la resistencia a la compresión a temprana edad. Sin embargo, este ajuste en la mezcla conlleva un notable aumento en la resistencia a la flexo-compresión y mejora considerablemente la trabajabilidad del material. Es importante subrayar que dicho incremento del contenido de agua no debe ser excesivo y debe estar destinado a mejorar el proceso de hidratación, en lugar de utilizarse para alterar la trabajabilidad o la resistencia del UHPC.
- Al modificar la proporción de finos, y sustituirlos por arena de sílice en tamaños apropiados, se puede conseguir una mayor duración de la trabajabilidad del UHPC. Este enfoque resulta

efectivo ya que la arena de sílice contribuye a mejorar la granulometría de la muestra, permitiendo que las partículas del cemento estén mejor hidratadas y, por tanto, se facilite el proceso de mezclado.

- Se pudo determinar que entre los superplastificantes propuestos para el estudio, uno de ellos demostró mejores resultados al contribuir significativamente en la fluidez de la muestra, presentando tiempos de reacción cortos y, al mismo tiempo, manteniendo las propiedades mecánicas del UHPC. Por lo que se identifica que el uso adecuado de superplastificantes puede contribuir significativamente a mejorar la trabajabilidad y las propiedades mecánicas.
- Los resultados destacan la influencia de los componentes de los UHPC, incluyendo la cantidad de cemento, agua, aditivos y sustitutos de finos, en los tiempos de fraguado. Con los ensayos realizados y en las condiciones en que fueron ejecutados, se puede decir que las muestras propuestas pueden conservar tiempos similares que las de los materiales que se encuentran en el mercado. Este estudio abre la posibilidad de encontrar nuevas combinaciones de materiales, evaluando el equilibrio entre trabajabilidad y fraguado. Es importante también resaltar que se ratifica que los UHPC tienen tiempos de fraguado notoriamente más largos que los hormigones convencionales debido a su composición y uso de aditivos y sustitutos de finos.
- Los resultados obtenidos indican que la agitación constante del UHPC, ya sea mediante amasado continuo o con el uso de mesas de sacudida, contribuye significativamente a la prolongación de los tiempos de trabajabilidad y fluidez. Esto se debe a que la agitación contribuye a la homogeneización de los componentes de la mezcla y a la activación de los procesos de hidratación. En otras palabras, la implementación de técnicas de agitación en el proceso de elaboración del UHPC puede ser de gran utilidad para optimizar la trabajabilidad y fluidez de la mezcla, lo que a su vez puede contribuir a mejorar la calidad y desempeño del hormigón en distintas aplicaciones.
- Este trabajo no abarca la evaluación del costo de los materiales utilizados en la fabricación de los hormigones de ultra altas prestaciones, sin embargo, es relevante tener en cuenta que la fabricación de este tipo de hormigones conlleva un costo de producción superior al de los hormigones convencionales.
- Finalmente, se reitera lo que plantea el artículo “Evolución, desarrollo y uso de UHPC en la construcción: una revisión” (Bajaber & Hakeem, 2021), donde los autores indican que es necesario desarrollar nuevos estándares que provean resultados de prueba significativos para una gama completa de propiedades de materiales UHPC. Estos estándares son necesarios para categorizar los diferentes UHPC y dar propiedades de materiales confiables y reproducibles para usar por los ingenieros estructurales en el diseño de estructuras de UHPC.

6. Futuras investigaciones

Este trabajo pretende ser la continuación de investigaciones previas relacionadas con el UHPC, integrando recursos de diversos estudios para enriquecer tanto el marco teórico como el contenido en general. En esta línea, se plantea una ampliación de la investigación en varios aspectos clave, centrándose en la trabajabilidad, los tiempos de fraguado y las propiedades mecánicas, con un enfoque particular en la reología de las dosificaciones, destacando la muestra M9 R-HCxAS(30/70)-20HE con reducción de la cantidad de harina de cuarzo.

Se propone empezar a realizar estudios con fibras en la muestra indicada, lo que podría contribuir a fortalecer específicamente la propiedad de flexo-tracción que arrojó resultados más bajos en este estudio.

Adicionalmente, se sugiere encaminar esfuerzos hacia la creación de normativas que estandaricen los ensayos, las metodologías de producción y los procedimientos de prueba, con el propósito de facilitar futuros estudios y fomentar la industrialización de este tipo de material. En caso de no ser viable, se recomienda que los futuros trabajos detallen el proceso de fabricación, paso a paso, lo que facilitaría la replicabilidad y la consistencia en los estudios.

Entre las posibles investigaciones futuras, es fundamental abordar el control de la capa superior (costra) que se forma en las muestras y desarrollar métodos de medición de tiempos de fraguado que sean aún más precisos y adecuados a las necesidades. Una estrategia inicial podría ser la implementación del enfoque propuesto en este estudio, que involucra la protección de la parte superior de las muestras con tela húmeda.

Otro aspecto para estudiar es la validación de lo encontrado respecto a la agitación de los UHPC y cómo esto contribuye a la conservación de la fluidez y trabajabilidad. Sin embargo, se deben estudiar las posibles implicaciones en las propiedades del exceso de agitación o movimiento que no sean uniformes en las mezclas. Esto abriría una nueva línea de investigación que permita comprender mejor las propiedades del material a lo largo del tiempo después de la agitación.

Finalmente, se propone que se dé continuidad a investigaciones que permitan que el material UHPC sea cada vez más amigable con el medio ambiente.

Referencias

- Aarup, B. (2011). CRC – Precast Applications of Fibre Reinforced Ultra High Performance Concrete. En F. Toutlemonde & J. Resplendino (Eds.), *Designing and Building with UHPFRC*. (pp. 319-330). ISTE Ltd; John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118557839.fmatter>
- ACI Committee 201. (2008). *Guide to Durable Concrete (ACI 201.2R-08)*. American Concrete Institute.
- ACI Committee 238. (2008). *Report on Measurements of Workability and Rheology of Fresh Concrete Copyright American (ACI 238.1R-08)*. American Concrete Institute. https://www.concrete.org/Portals/0/Files/PDF/Previews/238108_bkstore.pdf
- ACI Committee 363. (2011). *Guide to Quality Control and Assurance of High-Strength Concrete (ACI 363.2R-11)*. American Concrete Institute. <https://www.concrete.org/Portals/0/Files/PDF/Previews/363.2R-11web.pdf>
- ACI Committee 239. (2018). *Ultra-High-Performance Concrete: An Emerging Technology Report (ACI 239R-18)*. American Concrete Institute. https://www.concrete.org/Portals/0/Files/PDF/Previews/239R-18_preview.pdf
- ACI Committee 544. (2018). *Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete (ACI 544.4R-18)*. American Concrete Institute.
- Adam, J.P. (2005). *Roman Building. Materials and Techniques*. Routledge.
- Aïtcin, P.C. (2000). Cements of yesterday and today Concrete of tomorrow. *Cement and Concrete Research*, 30(2000), 1349-1359. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00365-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00365-3)
- Aïtcin, P.C. (2004). *High-Performance Concrete*. Routledge.
- Amat, R. C., Ibrahim, N. M., Rahim, N. L., Ismail, K. N., Abdul Hamid, A. S., & Boboc, M. (2022). Influence of Cement Paste Containing Municipal Solid Waste Bottom Ash on the Strength Behavior of Concrete. En N. Mohamed Noor et al. (eds.), *Proceedings of the 3rd International Conference on Green Environmental Engineering and Technology, Lecture Notes in Civil Engineering*, 214, 281-289. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7920-9_33
- American Society for Testing and Materials (2003). Especificaciones normalizadas para el hormigón premezclado (C94/C94M-03a). *ASTM International*. <https://tupunatron.com/media/NM-C94-ASTM.pdf>
- American Society for Testing and Materials (2017). *Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete (C1856/C1856M-17)*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C1856_C1856M-17
- American Society for Testing and Materials (2020). *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete (C494/C494M-19^{e1})*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0494_C0494M-19E01

- American Society for Testing and Materials (2021). *Standard Specification for Blended Hydraulic Cements* (C595/C595M-21). ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0595_C0595M-21
- American Society for Testing and Materials (2022a). *Standard Specification for Portland Cement* (C150/C150M-22). ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-22
- American Society for Testing and Materials (2022b). *Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete* (C1602/C1602M-22). ASTM International. https://doi.org/10.1520/C1602_C1602M-22
- American Society for Testing and Materials – ASTM. (2023). *Standard Specification for Masonry Cement* (C91/C91M-23). ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0091_C0091M-23
- Amran, M., Huang, S.-S., Onaizi, A. M., Makul, N., Abdelgader, H. S., & Ozbakkaloglu, T. (2022). Recent trends in ultra-high performance concrete (UHPC): Current status, challenges, and future prospects. *Construction and Building Materials*, 352, 129029. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129029>
- Asociación Española de Normalización y Certificación – AENOR. (2000). *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería*. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la Mesa de Sacudidas) (UNE-EN 1015-3). AENOR. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=norma-une-en-1015-3-2000-a2-2007-n0039470>
- Asociación Española de Normalización y Certificación – AENOR. (2007). *Admixtures for concrete, mortar and grout. Test methods*. Part 2: Determination of setting time (UNE-EN 480-2). AENOR. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0038697>
- Asociación Española de Normalización y Certificación – AENOR. (2009). *Aggregates for concrete* (UNE-EN 12620:2003+A1). AENOR. <https://tienda.aenor.com/norma-une-en-12620-2003-a1-2009-n0043155>
- Asociación Española de Normalización y Certificación – AENOR. (2012). *Cement*. Part 1: Composition, specifications and conformity criterio for common cements (UNE-EN 197-1). AENOR. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0048623>
- Asociación Española de Normalización y Certificación – AENOR. (2017). *Métodos de ensayo de cementos*. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad del volumen (UNE-EN 196-3:2017). AENOR. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/norma?c=N0058078>
- Asociación Española de Normalización y Certificación – AENOR. (2018). *Métodos de ensayo de cementos*. Parte 1: Determinación de resistencias (UNE-EN 196-1). AENOR. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0060675>
- Asociación Española de Normalización y Certificación – AENOR. (2020). *Ensayos de hormigón fresco*. Parte 5: Ensayo de la Mesa de Sacudidas (UNE-EN 12350-5). AENOR. <https://tienda.aenor.com/norma-une-en-12350-5-2020-n0063381>

- Bache, H.H. (1993). *Compact Reinforced Composite* (European patent No. EP0269715B1). European Patent Office. <https://patents.google.com/patent/EP0269715B1/en>
- Bajaber, M.A., & Hakeem, I.Y. (2021). UHPC evolution, development, and utilization in construction: a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 10, 1058-1074. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.051>
- Camacho Torregrosa, E. (2013). *Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties* [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Valencia].
- Cheyrezy, M., Maret, V., & Frouin, L. (1995). Microstructural Analysis of RPC (Reactive Powder Concrete). *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1491-1500. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00143-Z](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00143-Z)
- Cordero Morrobel, H.M. (2015). *Aplicación de hormigón de ultra alta resistencia con fibras de vidrio. Caracterización de hormigón de ultra alta resistencia con fibras de vidrio* [Tesis de maestría]. Universidad Politécnica de Valencia.
- Delatte, N.J. (2001). Lessons from Roman Cement and Concrete. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 127(3), 109-115. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1052-3928\(2001\)127:3\(109\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1052-3928(2001)127:3(109))
- Dunuweera, S.P., & Rajapakse R. M. G. (2018). CementTypes, Composition, UsesandAdvantages of Nanocement, Environmental Impact on Cement Production, and Possible Solutions. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/4158682>
- Fehling, E., Schmidt, M., Walraven, J., Leutbecher, T., & Fröhlich, S. (2014). *Ultra-High Performance Concrete UHPC. Fundamentals, Design, Examples*. Wilhelm Ernst & Sohn.
- Ge, W., Wang, A., Zhang, Z., Ge, Y., Chen, Y., Li, W., Jiang, H., Shuai, H., Sun, C., Yao, S., & Qiu, L. (2023). Study on the workability, mechanical property and water absorption of reactive powder concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01777. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01777>
- Giraldo, M.A., & Tobón, J.I. (2006). Evolución mineralógica del cemento Portland durante el proceso de hidratación. *Dyna*, 73(148), 69-82. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/794/1245>
- Gjørv, O.E. (2008). High-strength concrete. En S. Mindess (Ed.), *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete* (2nd ed., pp. 153-170). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102616-8.00007-1>
- Green, B.H., Moser, R.D., Scott, D.A., & Long, W. R. (2015). Ultra-High Performance Concrete History and Usage by the Corps of Engineers. *Advances in Civil Engineering Materials*, 4(2), 132-143. <https://doi.org/10.1520/ACEM20140031>
- Hajar, Z., Lecointre, D., Petitjean, J., Resplendino, J., & Simon, A. (2004, 26-28 de abril). Ultra-High-Performance Concretes: First recommendations and examples of application. *Concrete*

- Structures: the Challenge of Creativity* [Simposio]. 5th fib Symposium Proceeding, Avignon, France.
- Hasan, T.M., Gilbert, L., Allena, S., Owusu-Danquah, J., & Torres, A. (2022). Development of Non-Proprietary Ultra-High Performance Concrete Mixtures. *Buildings*, 12(11), 1865. <https://doi.org/10.3390/buildings12111865>
- Hung, C.C., El-Tawil, S., & Chao, S.H. (2021). A Review of Developments and Challenges for UHPC in Structural Engineering: Behavior, Analysis, and Design. *Journal of Structural Engineering*, 147(9). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0003073](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003073)
- Ibrahim, N. M., Rahim, N. L., Amat, R. C., Rahim, M. A., Woo, C. K., Zakarya, I. A., & Moncea, A. (2022). Workability and Density of Concrete Containing Coconut Fiber. En N. Mohamed Noor et al. (eds.), Proceedings of the 3rd International Conference on Green Environmental Engineering and Technology, *Lecture Notes in Civil Engineering*, 214, 347-352. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7920-9_33
- Imam, A., Sharma, K.K., Kumar, V., & Singh, N. (2021). A review study on sustainable development of ultra high-performance concrete. *AIMS Materials Science*, 9(1), 9-35. DOI: 10.3934/matserci.2022002
- Jaramillo Murcia, D.C. (2020). *Propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos de ultra altas prestaciones (UHPC), con diferentes materiales cementantes suplementarios* [Tesis de maestría]. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W.C., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Portland Cement Association.
- LafargeHolcim. (s.f.). *Cemento portland resistente a los sulfatos*. <https://www.holcim.es/cemento-sulforresistente>.
- Larrard, F. de, & Sedran, T. (1994). Optimization of uLTRA-high-performance concrete by the use of a packing model. *Cement and Concrete Research*, 24(6), 997-1009. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90022-1)
- Li, Zongjin. (2011). *Advanced Concrete Technology*. John Wiley & Sons, Inc.
- Mazanec, O., Lowke, D., & Schießl, P. (2010). Mixing of high performance concrete: effect of concrete composition and mixing intensity on mixing time. *Materials and Structures*, 43(3), 357-365. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9494-y>
- MC-Bauchemie. (s.f.a). *MC-PowerFlow 3095. Superplastificante de alta concentración de nueva generación*. https://www.mc-bauchemie.es/assets/downloads/products/es-ES/datos_tecnicos/MC-PowerFlow%203095.pdf
- MC-Bauchemie (s.f.b). *MC-PowerFlow Perma. Slump-Keeper-Superplasticizer based on the newest MC-Polymer-Technology*. https://www.mc-bauchemie.com/assets/downloads/products/en/technical_datasheet/MC-PowerFlow_Perma_EN_EN_TDS.pdf

- Mishra, O., & Singh, P. (2019). An overview of microstructural and material properties of ultra-high-performance concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 8(2), 97-143. <https://doi.org/10.1080/21650373.2018.1564398>
- More, F.M.D.S., & Subramanian S.S. (2022). Impact of Fibres on the Mechanical and Durable Behaviour of Fibre-Reinforced Concrete. *Buildings*, 12(9), 1436. <https://doi.org/10.3390/buildings12091436>
- Nkinamubanzi, P.C., Mantellato, S., Flatt, R.J. (2016). Superplasticizers in practice. En P.C. Aïtcin & R. J. Flatt (Eds.), *Science and Technology of Concrete Admixtures* (pp. 353-377). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00016-3>
- Okamuro, H., & Ouchi, M. (2003). Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete technology*, 1(1), 5-15. <http://dx.doi.org/10.3151/jact.1.5>
- Pagán-Ortiz, J. (2013). *Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community*. U.S. Department of Transportation.
- PennState College of Engineering. (s.f.). *Composition of cement*. <https://www.engr.psu.edu/ce/courses/ce584/concrete/library/construction/curing/Composition%20of%20cement.htm>
- Pimienta, P., & Chanvillard, G. (2005, 17-20 de abril). Durability of UHPFRC specimens kept in various aggressive environments. En *10DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components* [Conferencia]. Lyon, France.
- Real Decreto 470. (2021, 29 de junio). *Por el que se aprueba el Código Estructural*. Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2021-13681
- Rong, X., Liu, H., & Li, C. (2022). A proposed method and monitoring system for evaluating workability of Portland cement concrete during mixing. *Heliyon*, 8, e11355. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11355>
- Sika. (s.f.a). *Hoja de datos del producto Sika® ViscoCrete®-20 HE. Superplastificante de alto rendimiento*. https://esp.sika.com/content/dam/dms/es01/2/sika_viscocrete_-20he.pdf
- Sika. (s.f.b). *Hoja de datos del producto Sika® ViscoCrete®-90 NG. Superplastificante de altas prestaciones*. <https://esp.sika.com/dms/getdocument.get/5b0550e0-3619-3a9c-9cfe-7de8c037d87d/sika-viscocrete-90-ng-datos.pdf>
- Silva, D.A., Wenk, H.R., & Monteiro, P.J.M. (2005). Comparative investigation of mortars from Roman Colosseum and cistern. *Thermochimica Acta*, 438(1-2), 35-40. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2005.03.003>
- Sumiati, Mahmuda, Andi Herius, & Agus Subrianto (2020). The Effect of Polycarboxylate Addition Towards the Workability and High Strength Concrete. *Journal of Physics: Conference Series*, 1500, 012068. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1500/1/012068>

- Tobón, J. I., & López, F. (2006). Replanteamiento de las ecuaciones de Bogué en el cálculo mineralógico del clínker para una cementera colombiana. *Dyna*, 74(153), 53-60.
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/941/11632>
- 360 En Concreto. (s.f.). ¿Cómo se produce el proceso de hidratación del cemento? *360 En Concreto*.
<https://360enconcreto.com/blog/detalle/proceso-hidratacion-del-cemento/>
- Vitruvio, M. (1787). *De Architecture*. Book II Opus in Libris Decem. En Madrid en la Imprenta Real.