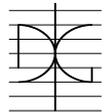


**ANÁLISIS Y EVOLUCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS  
MECÁNICAS, REOLÓGICAS DE LOS HORMIGONES  
AUTOCOMPACTANTES A EDADES TEMPRANAS.**

Por:  
Elvis Alberto Flores Galán

Febrero 2015.

Autor / Author: Elvis Alberto Flores Galán		Fecha / Date: Febrero 2015	
Título / Title <b>ANÁLISIS Y EVOLUCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS, REOLÓGICAS DE LOS HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES A EDADES TEMPRANAS.</b>			
Directores del trabajo / Supervisores: Dr. Pedro Serna Ros		Código / Code: CST/MIH	Nº páginas / Pages: 82
Departamento / Departament: INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL			
Universidad / University: UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA			
Palabras clave / Keywords: Hormigón autocompactante, Edades tempranas del hormigón, Retracción Self-compacting concrete, Early age concrete, Shrinkage			
Código Unesco: 3305.05 Ciencias tecnológicas / Tecnología de la construcción / Tecnología del Hormigón			



## **Dedicatoria**

A las dos personas más importantes en mi vida, mi madre Salustina Galán, por ser mi motor de inspiración y mi principal orientadora en los momentos buenos y malos de mi vida. TE AMO. Y a mi querido padre José Oberto Flores a pesar de que no estés físicamente en este mundo, fuiste mi mayor inspiración en esta vida, gracias por tus consejos y enseñarme junto a mi madre que nada en esta vida es inalcanzable y que toda meta es posible de alcanzar. TE AMO donde quiera que estés.

A mi dulce abuela que Dios todo poderoso te tenga en su santa gloria, te dedico este trabajo, lamento no haber estado en tus últimos momentos de tu vida.

## **Agradecimientos**

En primer lugar le agradezco Dios por todas las oportunidades positivas que me ha permitido vivir y por esta experiencia única que he cursado en este lapso de tiempo.

A mi madre y mi hermana, por siempre motivarme y apoyarme cada día que he pasado lejos de su presencia, por ustedes lucho y son mi razón de seguir luchando cada día. Todos mis familiares que siempre han estado ahí para apoyarme, siempre les agradeceré su apoyo incondicional. A una persona la cual ha irradiado mi vida con amor y cariño, le agradezco inmensamente por siempre apoyarme y ser mi soporte a pesar de la distancia, te amo mi querida doctora.

A mi Director el Profesor Doctor D. Pedro Serna Ros y al Profesor D. Luis García Ballester, por orientarme y ayudarme en este Proyecto Final de Master gracias por su colaboración desinteresada. Al Departamento de Construcciones Arquitectónicas por permitirme desarrollar la experimentación en su Laboratorio de Materiales de la ETSIE y al personal de éste por brindarme su apoyo incondicional en la realización de este proyecto. A todos mis profesores por ser pieza esencial en mi preparación académica. También quisiera agradecer a las empresas SIKA España, CEMENTVAL SL Materiales de Construcción, Áridos Carasoles, Cales La Plana CAPLANSA-Hormigón, por haber suministrado de forma desinteresada los materiales que han permitido fabricar los hormigones de esta tesina.

Compañeros y amigos de master, por permitirme compartir una de las experiencias más agradables de toda mi vida, gracia por su apoyo.

A mis amigos, amigas y hermanos durante esta estancia en España, gracias a ustedes por acompañarme en los momentos buenos y malos durante este año y medio fuera de casa, por ayudarme a disipar la falta de mis seres queridos, y brindarme su ayuda cada vez que la necesitaba. A ustedes les agradezco mucho: Gabriel, Geo, Henry, Santiago, Mao, Martha, Alfredo, Edu, Arismendy, Angely, Andreina, Roxanna, Angie, Pamela, Jorge, Franklin y muchos más. Gracias.

## RESUMEN

El hormigón autocompactante (HAC) en la actualidad es uno de los materiales más utilizados para la construcción a nivel mundial. Sus propiedades y características le permiten adecuarse a las situaciones más precarias de la elaboración de cualquier elemento estructural.

Su uso en el área de la prefabricación es muy extenso, debido a esto es importante estudiar sus características mecánicas, reológicas y procesos de retracción, ya que propiedades como estas si no se controlan de manera correcta, pueden afectar tanto la ejecución, estabilidad y resistencia de cualquier elemento estructural a corto o largo plazo.

Analizar las propiedades mecánicas a edades tempranas es un reto para la comparación de datos existentes sobre este tema, lo cual abre el camino a una nueva vertiente sobre cómo se comporta el HAC a edades muy tempranas. Un factor importante en la adquisición de resistencias a edades tempranas es la utilización de aditivos especiales, estos confieren al hormigón las resistencias necesarias para alcanzar las propiedades solicitadas a corto plazo.

El propósito de este proyecto fin de master es evaluar las propiedades mecánicas de los hormigones autocompactantes a edades iniciales de 8, 10, 12, 24 y 48 horas, propiedades en estado fresco y retracción (autógena y por secado), para esto se consideran dos variables, la utilización de dos tipos de hormigones (autocompactante y convencional) y el uso de dos tipos de aditivos utilizados en el área de la prefabricación. Estos se compararan y se evaluarán los resultados obtenidos respecto a lo que disponen las normativas existentes.

## **ABSTRACT**

Self-compacting concrete (SCC) is currently one of the most widely used building materials worldwide. Its properties and features allow it to adapt to the most precarious situations for the elaboration of any structural element.

Its use in the area of prefabrication is very broad, this is why is so important to study its mechanical characteristics, rheology's and shrinking processes, because if properties like this aren't done properly they can affect the performance, stability and resistance of any structural element in short or long term.

To analyze the mechanical properties at early ages is a challenge for the comparison of existing data in this subject, which opens the way to a new dimension on how SCC behaves at very early ages. An important acquisition of resistance in early age factor is the use of special additives; this gives the necessary resistance to the concrete to achieve short-term requested properties.

The purpose of this final master project is to evaluate the mechanical properties of self-compacting concretes at early ages of 8, 10, 12, 24 and 48 hours, fresh estate properties and shrinkage (autogenous and drying), for this are considered two variables, the use of two types of concrete (self-compacting and conventional) and the use of two types of additives used in the field of prefabrication. These were compared and the results obtained were evaluated based on the existing regulations.

# ÍNDICE

1- INTRODUCCIÓN .....	11
1.1 Justificación .....	11
1.2 Objetivos .....	13
1.2.1 Objetivo general.....	13
1.2.2 Objetivos específicos .....	13
1.3 Estructura del documento.....	14
2- ESTADO DEL ARTE .....	15
2.1 Hormigones autocompactantes (HAC).....	15
2.2 Propiedades reológicas del hormigón en estado fresco.....	16
2.3 Ensayos para el hormigón en estado fresco .....	19
2.3.1 Ensayo de escurrimiento. UNE EN 12350-8.....	19
2.3.2 Ensayo del embudo en V, Determinación del tiempo de flujo. UNE EN 12350-9.....	20
2.3.3 Ensayo caja en L. UNE EN 12350-10.....	20
2.3.4 Ensayo de escurrimiento con el anillo japonés. UNE EN 12350-12 .....	21
2.3.5 Ensayo con el Reómetro .....	21
2.4 Propiedades del Hormigón en Estado Endurecido .....	22
2.4.1 Resistencias Mecánicas.....	22
2.4.3 Retracción en el hormigón .....	25
2.5 Evolución de las propiedades del hormigón a corto plazo.....	27
2.5.1 Resistencia a compresión .....	28
2.5.2 Resistencia a tracción.....	31
2.5.3 Módulo de deformación.....	32
2.6.4 Planteamiento de las normas respecto a edades tempranas en el hormigón .....	34
3- PROGRAMA EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA .....	38
3.1 Programa general. ....	38
3.2 Plan de Trabajo.....	39
3.2.1 Procedimiento de trabajo.....	41
3.3 Metodología .....	44
3.3.1 Materiales utilizados. ....	44
3.3.2 Dosificaciones realizadas. ....	45
3.3.3 Procedimiento de los ensayos. ....	47

3.3.4 Equipos de laboratorio.....	56
4- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	58
4.1 Caracterización de los ensayos del hormigón en estado fresco.....	58
4.2 Resultados del tiempo de fraguado del hormigón.....	59
4.3 Resultados de ensayos mecánicos.....	60
4.3.1 Resultados de ensayos de rotura a compresión.....	61
4.3.2 Resistencia a tracción indirecta.....	67
4.3.3 Módulo de deformación.....	70
4.4 Resultados de ensayos de retracción.....	72
4.4.1 Resultados de retracción autógena a edades tempranas.....	72
4.4.1 Resultados de retracción por secado (por pérdida de peso).....	73
4.4.2 Retracción autógena y por secado a partir de 48 horas.....	74
5- CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	78
6- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Curvas de flujos correspondientes a los de modelos de Bingham y Newton.</i>	17
Figura 2. <i>Curvas de flujo (ACHE 08).</i>	17
Figura 3. <i>Mecanismo de bloqueo (Benito, 2014).</i>	18
Figura 4. <i>Ensayo de extensión de flujo o de escurrimiento (UNE EN 12350-8.)</i>	19
Figura 5. <i>Determinación del tiempo de flujo. Ensayo embudo en V. (UNE EN 12350-9).</i>	20
Figura 6. <i>Esquema de la caja en L, y determinación de alturas H1-H2 (UNE EN 12350-10).</i>	20
Figura 7. <i>Ensayo de escurrimiento con anillo japonés (UNE EN 12350-12), (Tomado de Cuenca Asencio, E. 2008).</i>	21
Figura 8. <i>Dispositivo 4C-Rheometer del CSA de la UPV.</i>	22
Figura 9. <i>Curva característica esfuerzo - deformación para el concreto. (Neville, 1981).</i>	25
Figura 10. <i>Diagrama de etapas de retracción, tipos.</i>	26
Figura 11. <i>Comparación de HAC y HCV en función resistencia y diferentes relaciones a/c. (Parra et al 2007).</i>	29
Figura 12. <i>Comparación de HAC y HCV con el mismo diseño para resistencia de 40 MPa. (Assie et al. 2003).</i>	30
Figura 13. <i>Comparación entre la relación a/c de HAC y HCV, y la resistencia a compresión. (Agranati, G. 2008).</i>	30
Figura 14. <i>Tendencia de crecimiento de los diferentes tipos de HAC a diferentes edades, con inclusión de ceniza volante. (Sukumar et al. 2008),</i>	31
Figura 15. <i>Resistencia a la tracción en función a la resistencia a la compresión HAC y HCV (7 días) (Parra et al 2011).</i>	32
Figura 16. <i>Resistencia a la tracción en función a la resistencia a la compresión HAC y HCV (28 y 90 días) (Parra et al 2011).</i>	32
Figura 17. <i>Módulo de deformación del HAC en función a la resistencia a compresión y comparado con el CEB-FIB 90 (Klug y Holschmacher 2003).</i>	33
Figura 18. <i>Módulo de deformación en función a la resistencia a la compresión HAC y HCV (7 días) (Parra et al 2011).</i>	34
Figura 19. <i>Tendencia de resistencia a compresión y relación módulo de deformación según por las norma citadas.</i>	36
Figura 20. <i>Curva granulométrica de los áridos.</i>	44
Figura 21. <i>Dosificación en peso seco del material. HCV.</i>	46
Figura 22. <i>Dosificación en peso seco del material. HAC.</i>	46
Figura 23. <i>Escurrimiento hormigón autocompactante.</i>	48
Figura 24. <i>Ensayo de asentamiento cono de Abrams.</i>	49
Figura 25. <i>Ensayo del embudo en V.</i>	49
Figura 26. <i>Reómetro.</i>	50
Figura 27. <i>Procedimiento de aplicación para determinar la reología del HAC.</i>	50
Figura 28. <i>Ensayo del aire ocluido.</i>	51
Figura 29. <i>Aparato de carga, agujas y varillas. Muestras de la prueba de tiempo de fraguado del hormigón.</i>	51
Figura 30. <i>Ensayo a compresión y módulo de deformación.</i>	53

Figura 31. <i>Ensayo tracción indirecta</i> .....	54
Figura 32. <i>Ensayo de retracción autógena a edad temprana, con GL220</i> .....	55
Figura 33. <i>Pesado de probetas, cámara humedad, probetas con relojes compradores</i> .....	56
Figura 34. <i>Amasadora planetaria de eje vertical</i> .....	56
Figura 35. <i>Cámara de curado, cámara húmeda, CTS utilizada para retracción por secado</i> .....	57
Figura 36. <i>Prensa Ibertest modelo MEH 1500. Y máquina de refrentado Ibertest</i> .....	57
Figura 37. <i>Comportamiento del HAC. D.T. Institute (2010) (Benito, F. (2014))</i> .....	59
Figura 38. <i>Gráfica obtenida para el tiempo y final de fraguado del hormigón</i> .....	60
Figura 39. <i>Evolución resistencia proyectada a los 28 días</i> .....	62
Figura 40. <i>Evolución de resistencia a edades iniciales</i> .....	63
Figura 41. <i>Histograma de la evolución de resistencia a compresión</i> .....	64
Figura 42. <i>Evolución de resistencia de los diseños (HAC 20HE y HAC 3425) realizados respecto a la resistencia experimental obtenida</i> .....	64
Figura 43. <i>Evolución de resistencia de los diseños (HCV 20HE y HCV 3425) realizados respecto a la resistencia experimental obtenida</i> .....	65
Figura 44. <i>Evolución de los HAC 20HE y HAC 3425 a edades menores de 72 horas</i> .....	65
Figura 45. <i>Evolución de los HCV 20HE y HCV 3425 a edades menores de 72 horas</i> .....	66
Figura 46. <i>Resistencia del hormigón en función al tiempo</i> .....	66
Figura 47. <i>Evolución de resistencias a tracción indirecta</i> .....	67
Figura 48. <i>Resistencia a tracción indirecta en función a la resistencia a compresión</i> ..	68
Figura 49. <i>Relación resistencia tracción - compresión respecto a la edad vs EHE-08</i> .....	68
Figura 50. <i>Tendencia por cada tipo de hormigón respecto a la EHE-08</i> .....	69
Figura 51. <i>Comparación de cada tipo de aditivo de acuerdo a la relación tracción-compresión</i> .....	69
Figura 52. <i>Módulo de deformación en función a la resistencia a compresión</i> .....	70
Figura 53. <i>Detalle de la relación módulo-deformación respecto a las normas y tendencia por cada edad de ensayo</i> .....	71
Figura 54. <i>Comparación del HAC con aditivos distintos</i> .....	72
Figura 55. <i>Determinación de retracción por secado (pérdida de peso)</i> .....	73
Figura 56. <i>Retracción total-autógena de las muestras tomadas a cada diseño de hormigón</i> .....	74
Figura 57. <i>Media de retracción total</i> .....	75
Figura 58. <i>Media por retracción autógena</i> .....	75
Figura 59. <i>Retracción total-autógena a partir de 48 horas</i> .....	76
Figura 60. <i>Diferencias entre muestras selladas y no selladas a partir de 48 horas</i> .....	77
Figura 61. <i>Retracción total y autógena por tipo de aditivo</i> .....	77

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Proyección de edad respecto al cemento a utilizar. (PrNE 83160) (EHE-08).	35
Tabla 2. Formulas respecto a las normas (EHE-08, EC-2, MC-10, ACI 209.2R 08) en base a las propiedades mecánicas en función al tiempo. ....	36
Tabla 3. Propiedades determinadas y ensayos realizados .....	38
Tabla 4. Dosificaciones.....	39
Tabla 5. Detalle de ensayos y $\text{m}^3$ utilizados. (No se incluye el desperdicio).....	39
Tabla 6. Materiales utilizados.....	44
Tabla 7. Resultados de diseño.....	45
Tabla 8. Detalles de amasadas para compresión / modulo de deformación (150mm*300mm).....	52
Tabla 9. Detalles de amasadas para tracción indirecta (150mm*300mm).....	53
Tabla 10. Detalle de probetas por diseño para ensayo de retracción (100mm*100mm*400mm).....	56
Tabla 11. Resultados ensayos del hormigón en estado fresco. ....	58
Tabla 12. Datos dispuestos por el reómetro.....	58
Tabla 13. Datos finales del principio y final de fraguado .....	59
Tabla 14. Media y relación de evolución de los datos obtenidos en los ensayos de rotura a compresión .....	60
Tabla 15. Media de datos obtenidos por resistencia a tracción indirecta y relación según su evolución. ....	61
Tabla 16. Media de resultados a compresión y módulo de deformación. ....	61

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Justificación

Los hormigones autocompactantes (HAC) se diseñan con los mismos componentes que los hormigones convencionales (HCV) siendo la variación más importante lo que se refiere a la composición granulométrica del árido total ya que en aquéllos la cantidad de finos a menores de 125  $\mu\text{m}$  es mucho mayor que la que se admite y utiliza en los segundos. Este hecho lleva a que la estructura interna del HAC sea diferente de la del HCV, por tal razón analizar las propiedades de estos hormigones a edades tempranas despierta interés para evaluar y comparar dichas características con los estipulados sobre los hormigones convencionales.

El estudio respecto al comportamiento a edades tempranas que presentan los hormigones convencionales ha sido estudiado por varios investigadores planteando sus diferentes condicionantes de diseño y aplicaciones para evaluar dicho comportamiento. En el año 1981 la *COMMISSION 42-CEA* de RILEM (International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures) publicó el primer State-of-the-Art sobre este tema y en él se recogían los conocimientos que hasta la fecha existían y de este modo tener base de referencia que ayudara a estudios más específicos sobre el tema. Posteriormente se han realizado estudios sobre el tema pero siempre referidos al HCV. (RILEM 1981). No fue hasta el 1986 cuando surge el hormigón autocompactante de las manos del profesor Okamura, el mismo con propiedades distintas al convencional, cuyas cualidades en ese entonces aun eran una incógnita en el área de la investigación. Se han realizado ciertas aportaciones recientemente sobre el tema, de acuerdo a la revisión crítica de diferentes investigaciones sobre los mecanismos que afectan a las propiedades del hormigón y su desempeño a edad temprana, aportando información útil y concisa sobre el comportamiento del hormigón convencional a edades tempranas.

Así como plantea el prNE 83160 (AENOR 2014), la determinación de la resistencia del hormigón a edades tempranas tiene una influencia creciente en la planificación y desarrollo de obras, tanto en la fase de proyecto como en la de ejecución. Es de interés analizar el comportamiento de este elemento como material, con amplias y varias virtudes en el área de la construcción.

Otra característica que avala la necesidad de estudiar el tema propuesto es la utilización de los aditivos superplastificantes que forman parte esencial en este tipo de hormigón, ya que modifican de forma importante el comportamiento reológico del hormigón fresco y que al facilitar la autocompactación podrían influir sobre las resistencias a edades tempranas, de utilidad para diferentes áreas de la construcción.

De acuerdo con lo anterior es importante estudiar las características mecánicas y reológicas de los HAC en especial en el campo de los prefabricados, ya que casos como el desencofrado a edades tempranas son un requisito de la industria de

prefabricación, por tal razón se determinara las características a edades cortas tanto por necesidades de ejecución como para su influencia a mediano y largo plazo.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general

El principal objetivo de este trabajo consiste en evaluar y analizar el comportamiento de las características de los hormigones autocompactantes (HAC) a edades tempranas, observando cómo se comportan ante el uso de diferentes aditivos, con resistencias entre 35 a 40 MPa y comparando con un hormigón convencional (HCV).

Para esto se realizarán dos tipos de hormigón; autocompactante y convencional, estos con el mismo tipo de árido y dos tipos de aditivos, uno especialmente adecuado para la confección de hormigones de altas resistencias iniciales y el otro con propiedades para mejorar la fluidez y la viscosidad en el hormigón en estado fresco. De acuerdo a estas especificaciones se procederá a realizar cuatro tipos de diseños de hormigón.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Estos objetivos se han establecido producto de la necesidad de evaluar las diferentes características de los hormigones autocompactantes a edades tempranas, estos objetivos son:

- Conocer de los diferentes casos plasmados por los diferentes investigadores y comparaciones entre el HAC y HCV.
- Análisis del comportamiento del HAC a edades tempranas.
  - Caracterización del hormigón en estado fresco.
  - Determinación de las características reológicas a partir de las propiedades del hormigón fresco.
  - Evaluación de las propiedades del hormigón endurecido en las primeras cuarenta y ocho horas con la determinación de:
    - Resistencia a compresión.
    - Módulo de deformación.
    - Resistencia a tracción.
    - Retracción autógena.
    - Retracción por secado en el periodo de 28 días con determinación de los parámetros necesarios.
- Comparar las propiedades de del HAC y del HCV.
- Observar de las diferentes condicionantes que inciden en las propiedades mecánicas del hormigón.

### **1.3 Estructura del documento**

- Capítulo 1. Contiene la introducción de este presente trabajo, los objetivos generales y específicos de esta investigación.
- Capítulo 2. Comprende el estado actual del conocimiento, iniciamos con las propiedades del hormigón autocompactante (HAC), en estado fresco y endurecido, especificamos normativas y culminando dicho capítulo concluimos con las diferentes ideas respecto al HAC a edades temprana, comparándola con el hormigón convencional (HCV).
- Capítulo 3. Se especifica el programa experimental y metodología de trabajo a seguir, condiciones de investigación, procedimientos operativos y detalles de estos ensayos.
- Capítulo 4. Planteamiento y análisis de los resultados obtenidos, mediante la Figura de gráficas y datos pertinentes.
- Capítulo 5. Conclusiones fruto de los datos obtenidos, de acuerdo al análisis previo determinado en la discusión de los resultados, posibles recomendaciones y futuras líneas de investigación

## 2- ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se aborda el estado actual del conocimiento, como producto de las principales ideas de los hormigones autocompactantes, tratando de generalizar sus respectivos conceptos respecto a las dichas propiedades que distinguen a este hormigón. Se presentaran cierta información planteada por diferentes investigadores, evaluando y comparando el HAC con el HCV.

Se mostraran estudios como punto de partida del tema, buscando orientar respecto a lo conocido y abundar sobre lo que han realizado diferentes autores, y más específicamente sobre el hormigón a edades tempranas.

### 2.1 Hormigones autocompactantes (HAC)

La instrucción EHE-08 (Fomento 2008) define el hormigón autocompactante como: Hormigón que es capaz de fluir y compactarse por su propio peso y rellenar completamente los encofrados o moldes, aun con densidades muy altas de armado, sin la necesidad de ningún tipo de vibrado y manteniendo la homogeneidad.

Las tres propiedades básicas del hormigón autocompactante (HAC) son:

- La capacidad de relleno o fluidez no limitada, que se refiere a la capacidad del de fluir y rellenar completamente todos los espacios del encofrado, por su propio peso sin vibración.
- La capacidad de paso, que es la posibilidad del HAC de fluir a través del armado sin segregación o bloqueos.
- La resistencia a segregación o estabilidad, es la capacidad del HAC para mantener homogénea su composición, durante el transporte y la puesta en obra.

Este hormigón se define como, la mayor revolución en el desarrollo de hormigón en las últimas décadas. Originalmente se desarrolló para compensar la creciente escasez en mano de obra especializada. Posteriormente ha demostrado ser rentable económicamente por diferentes aspectos, como:

- Reducción de los tiempos de puesta en obra
- Reducción de mano de obra
- Mejores acabados superficiales
- Fácil colocación
- Durabilidad mejorada
- Altas resistencias
- Entre otros.

Los primeros desarrollos sobre este tipo de hormigón fueron realizados por el profesor Okamura en el 1986, y renombrado como hormigón autocompactante en el 1988. Fue

planteado como solución para aumentar la durabilidad de las estructuras de hormigón y para racionalizar los sistemas constructivos.

## 2.2 Propiedades reológicas del hormigón en estado fresco

- **Reología**

La reología es la ciencia que estudia la deformación y flujo de los materiales vinculando las relaciones entre esfuerzo aplicado, deformaciones y tiempo. Para definir el comportamiento reológico de un fluido se recurre a un diagrama denominado curva de flujo, que representa en sus ejes el esfuerzo aplicado ( $\tau$ , tensión de corte) y el gradiente de velocidades de deformación  $\dot{\gamma}$  (Zerbino, 2006).

Desde hace años se han construido diferentes viscosímetros para estudiar al hormigón fresco, que posibilitaron un mayor conocimiento del material y de los factores que lo modifican. Los estudios de reología han permitido interpretar el comportamiento del hormigón bombeado, el hormigón de alto rendimiento y, más recientemente, la caracterización y diseño del HAC.

Según el modelo de Bingham, dos parámetros caracterizan la movilidad del material son; la tensión umbral y la viscosidad plástica (Figura 1). Este modelo es el más usado para la caracterización reológica del hormigón. La viscosidad está relacionada con la estabilidad y la resistencia a segregarse del hormigón. Igualmente el flujo del material empieza sólo cuando la tensión de cortante supera la resistencia inicial, también llamada tensión de inicio de flujo. Desde este punto de vista la velocidad de deformación transversal del material aumenta de forma lineal con la tensión aplicada. El factor que más influye sobre el valor del límite elástico es la fricción que se genera entre las partículas sólidas.

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma}$$

$\tau$	Tensión de flujo.
$\tau_0$	Tensión umbral.
$\mu$	Viscosidad plástica.
$\dot{\gamma}$	Velocidad de deformación transversal.

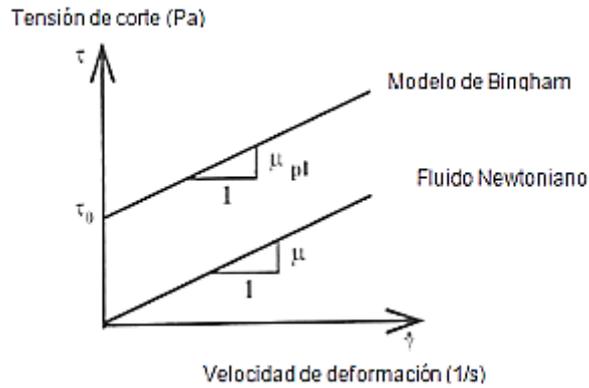


Figura 1. Curvas de flujos correspondientes a los de modelos de Bingham y Newton.

Los estudios reológicos han permitido comprender el comportamiento del HAC y de ese modo han contribuido a un diseño más racional de este nuevo hormigón. En la (Figura 2) se comparan en forma esquemática curvas de flujo de un HAC, un hormigón convencional (HCV) y un hormigón fluido de alta resistencia (HAR). Un HAR posee habitualmente mayor viscosidad plástica que un HCV, en gran parte debido a su menor relación a/c. Por su parte un HAC posee tensión umbral casi nulo y una viscosidad suficiente para garantizar el transporte, llenado y consolidación del hormigón sin que segregue.

Es importante una adecuada combinación de ambos parámetros para lograr la movilidad deseada evitando la segregación; en mezclas con alta viscosidad es conveniente una tensión umbral extremadamente baja, mientras que en HAC con menor viscosidad es deseable que aumente la tensión umbral. (Zerbino, 2006).

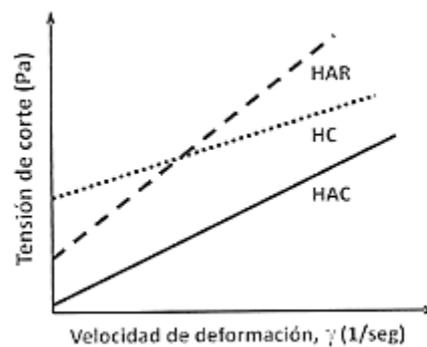


Figura 2. Curvas de flujo (ACHE 08).

- **Capacidad de relleno y paso**

La capacidad de relleno está relacionada con la movilidad y fluidez del hormigón. El HAC, en algunas ocasiones, debe fluir a través de pequeñas aberturas en el encofrado o a través de una gran congestión de armaduras, debiendo garantizar la resistencia al bloqueo. En cercanías de la abertura se puede producir una agrupamiento entre las

partículas de los árido, que puede provocar lo que se denomina el “efecto arco”, bloqueando el paso del resto de las partículas. Figura 3

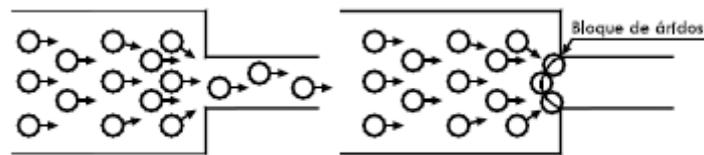


Figura 3. Mecanismo de bloqueo (Benito, 2014).

La capacidad paso es la capacidad que debe tener el hormigón a pasar por sitios estrechos sin que el árido entre en contacto a causa del posible bloqueo de la mezcla, fluir y rellenar totalmente el encofrado sin ayuda externa. Estas características se pueden generar aumentando la fluidez de la pasta con la implementación de aditivos, reducción del volumen del diámetro del árido y ajustando el mismo en función al espacio por donde ha de pasar el hormigón.

- **Resistencia a la segregación**

Es la capacidad que debe tener el hormigón a mantener la mezcla homogénea durante y tras el proceso de hormigonado sin que ocurra separación de los áridos o exudación. La estabilidad de la mezcla en general, se busca por medio de inclusión de filler o por la utilización de agentes de viscosidad. Cualquiera de las dos aplicaciones anteriores aumenta la viscosidad de la pasta impidiendo que se produzca segregación.

- **Aire ocluido**

Según la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08). La cantidad total de aire ocluido no excederá del 6% en volumen. Cuando un hormigón esté sometido a una clase de exposición F o H, se deberá introducir un contenido mínimo de aire ocluido del 4,5%.

Por igual (Borralleras, P. 2012), planteo que el HAC mejora su trabajabilidad, pero puede acarrear problemas de trabajabilidad con valores inferiores al 2%, siendo entre el 2 y 4% un valor óptimo.

- **Tiempo de fraguado del hormigón**

Periodo en el cual mediante reacciones químicas del cemento y el agua conducen a un proceso, que mediante diferentes procesos de reacción, generan calor y dan origen a nuevos compuestos, estos genera que el hormigón endurezca, adquiriendo de este modo cierta resistencia.

Durante el fraguado el hormigón pasa de un estado plástico, donde se deforma indefinidamente por la aplicación de carga, a un estado en donde se comporta de manera elástica ante la acción de la misma. Los cambios que se pueden observar en el hormigón durante este proceso son los tiempos de fraguado inicial y final de

fraguado. (Aguilar Beltrán, O. 2009). Las especificaciones requeridas para la obtención y realización de este ensayo, se puede encontrar en la ASTM C403/403M.

## 2.3 Ensayos para el hormigón en estado fresco

Los ensayos de caracterización del HAC han sido objeto de numerosos estudios, existiendo en la actualidad, unas normas específicas para establecer y valorar las propiedades del HAC.

Los ensayos que han sido normalizados están:

- Ecurrimiento: capacidad de fluir del hormigón.
  - Ecurrimiento con anillo japonés.
  - Embudo en V.
  - Caja en L.
- } Capacidad de paso.

Sin embargo, la determinación de los parámetros reológicos en estado fresco sigue siendo en la actualidad, objeto de estudio con diferentes tipos de reómetros. Entre los diversos equipos existentes, se ha diseñado según lo establecido por el Danish Technological Institute, un reómetro que permite determinar las propiedades reológicas.

### 2.3.1 Ensayo de escurrimiento. UNE EN 12350-8

Este es el método más utilizado para evaluar la capacidad de fluir del HAC, debido a su facilidad de ejecución.

El objetivo del ensayo es evaluar la capacidad de fluir del hormigón sin la presencia de algún impedimento. Este permite observar si existe alguna presencia de segregación y de exudación. Con este ensayo se obtiene tiempo que le toma al hormigón alcanzar un diámetro de 500 mm ( $T_{50}$ ), y el diámetro final que alcanza dicho hormigón. Vea Figura 4.



Figura 4. Ensayo de extensión de flujo o de escurrimiento (UNE EN 12350-8.)

### 2.3.2 Ensayo del embudo en V, Determinación del tiempo de flujo. UNE EN 12350-9

Evalúa la fluidez o capacidad de relleno del hormigón autocompactante y su capacidad de paso por aberturas estrechas. Para lograr esto se debe obtener el tiempo que tarda el volumen total del hormigón en salir ( $T_v$ ). Figura 5



Figura 5. Determinación del tiempo de flujo. Ensayo embudo en V. (UNE EN 12350-9).

### 2.3.3 Ensayo caja en L. UNE EN 12350-10

Determinación de la capacidad de paso del hormigón autocompactante, usado para evaluar su comportamiento en espacios confinados (Figura 6). Se logra obteniendo el tiempo transcurrido del ensayo y las diferencias de altura entre lados opuestos, alcanzado esto, adquirimos el coeficiente de paso del hormigón ( $C_{bL}$ ).

$$C_{bL} = 100 * (H2/H1)$$



Figura 6. Esquema de la caja en L, y determinación de alturas H1-H2 (UNE EN 12350-10).

### 2.3.4 Ensayo de escurrimiento con el anillo japonés. UNE EN 12350-12

Evalúa el escurrimiento del hormigón con impedimento previsto y determina la capacidad de paso obtenida mediante la relación de alturas desde el centro, al diámetro máximo alcanzado por el hormigón. Figura 7



Figura 7. Ensayo de escurrimiento con anillo japonés (UNE EN 12350-12), (Tomado de Cuenca Asencio, E. 2008).

### 2.3.5 Ensayo con el Reómetro

Los reómetros miden la resistencia a fluir de un hormigón al variar las fuerzas tangenciales aplicadas sobre él y en ensayos dinámicos. Éste estima la fluidez y características del fluido a través de dos parámetros: la tensión umbral de corte y la viscosidad plástica, utilizados ambos en los modelos teóricos de Bingham.

A pesar de que no es un ensayo normalizado, facilita información importante respecto a las propiedades reológicas del hormigón.

Existen números reómetros dependiendo de su finalidad y del fabricante. De los dispositivos digitales el 4CRheometer, utilizado, entre otros organismos, por Sika, Aidico, Danish Technological Institute, 2010 y el CSA de la UPV (Benito, F. 2014). (Figura 8).

Este equipo permite, a diferencia de otros reómetros, determinar los parámetros  $\mu$  y  $\tau$ , a partir de los resultados de realizar el ensayo de escurrimiento mecánicamente, evitando de esta forma la influencia del operador.



Figura 8. *Dispositivo 4C-Rheometer del CSA de la UPV*

## 2.4 Propiedades del Hormigón en Estado Endurecido

### 2.4.1 Resistencias Mecánicas

Las disposiciones obtenidas en la fabricación de los hormigones autocompactantes, con los datos disponibles hasta el momento, permiten establecer que su producción puede ser semejante a los hormigones convencionales con una fabricación cuidadosa, y por lo tanto son aplicables todas las fórmulas de paso que relacionan la resistencia característica. (EHE-08), (ACI 237R-07).

- **Resistencia a compresión:**

La resistencia a compresión del concreto, es la propiedad que frecuentemente se toma como medida de su endurecimiento y como índice de sus propiedades mecánica general.

El ensayo universalmente conocido para determinar la resistencia a la compresión, son ensayos con probetas cilíndricas y cúbicas, elaboradas en moldes especiales que tienen dimensiones según la norma prevista, por ejemplo la UNE EN 12390 -1.

Es de vital importancia que se cumpla con todos los requerimientos presentes en las normas mencionadas, debido a que la resistencia del hormigón se encuentra influenciada por muchas variables tanto internas como externas, por tanto es indispensable que los procedimientos de elaboración de los cilindros y ensayo de los mismos sean estándares para evitar incluir otra variable más a los resultados de resistencia.

Según UNE EN 12390-3:

La resistencia a compresión viene dada por la ecuación:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

Dónde:

$f_c$  Resistencia a compresión, en MPa (N/mm<sup>2</sup>).

$F$  Carga máxima de rotura, en N

$A_c$  Área transversal de la probeta sobre la que actúan la fuerza de compresión, calculada a partir de las dimensiones normalizadas de la probeta (véase en la Norma EN 12390-1).

- **Resistencia a tracción:**

Por lo general no se requiere que el hormigón resista fuerzas directas de tracción, sin embargo, esta resistencia es importante con respecto al agrietamiento, debido a la limitación de las contracciones. La formación y propagación de las grietas, en el lado de tracción de elementos de hormigón armado sometidos a flexión, dependen principalmente de la resistencia a la tracción. También ocurren esfuerzos de tracción en el hormigón como resultado de cortante, torsión y otras acciones, y en la mayoría de los casos el comportamiento del elemento cambia después de ocurrido el agrietamiento.

Existen tres formas de obtener la resistencia a la tracción: por flexión (módulo de rotura), por hendimiento (tracción indirecta) y por tracción axial (tracción directa). En este proyecto trabajaremos con la tracción indirecta.

Las fórmulas para obtener la resistencia tracción indirecta según la norma UNE EN 12390-6. Viene dada por la ecuación siguiente:

$$f_{ct} = \frac{2 * F}{\pi * L * d}$$

Dónde:

$f_{ct}$  Es la resistencia indirecta, en megapáscales (MPa) o (N/mm<sup>2</sup>).

$F$  Carga máxima, en Newton (N).

$L$  Longitud de la línea de contacto de la probeta, en milímetros (mm).

$d$  Dimensión de la sección transversal, en milímetros (mm).

- **Módulo de deformación**

El módulo de deformación del hormigón es un parámetro básico para determinar las deformaciones. Generalmente, todas las formulas relacionan el módulo de deformación con la resistencia a compresión, con algunas correcciones que pueden depender de la densidad del hormigón y del tipo de árido utilizado.

Debido a que los hormigones autocompactantes contienen un mayor volumen de pasta que el hormigón de compactación convencional, y teniendo en cuenta que el Módulo de deformación de la pasta es menor que el de los áridos, se podría prever un módulo de deformación ligeramente menor (entre un 7% y un 15%) para el caso del hormigón autocompactante. (Anejo 17, EHE-08).

En el hormigón se pueden clasificar las deformaciones como deformación por retracción, deformación por aplicación de carga instantánea, deformación por carga mantenida (fluencia) y deformaciones por acciones térmicas. La deformación instantánea, también llamada elástica, es la que ocurre cuando la carga es aplicada por primera vez. La retracción está asociada con la pérdida de humedad, y la fluencia es la deformación diferida que ocurre con la aplicación prolongada y mantenida la carga.

Las magnitudes de la retracción y la fluencia son del mismo orden que la deformación elástica bajo el rango normal de esfuerzos, de tal suerte que siempre es necesario tomar en cuenta los diversos tipos de deformación. (Neville, 1981).

La deformación total del hormigón es una suma de los distintos tipos de deformaciones. Se puede utilizar la siguiente expresión para definir la deformación total,  $\varepsilon_c(t)$  en el instante  $t$ , de un hormigón sometido a carga en el instante  $t_0$ , bajo una tensión constante  $\sigma_c(t_0)$  es: (Calavera, 2002).

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{ci}(t_0) + \varepsilon_{cc}(t) + \varepsilon_{cs}(t) + \varepsilon_{c,T}$$

Dónde:

$\varepsilon_c(t_0)$	Deformación instantánea bajo carga.
$\varepsilon_{cc}(t)$	Deformación por fluencia.
$\varepsilon_{cs}(t)$	Deformación por retracción.
$\varepsilon_{c,T}$	Deformación debida a la variación térmica.

El Módulo de deformación de un material es la relación entre el esfuerzo al que está sometido el material y su deformación unitaria. Representa la rigidez del material ante una carga impuesta sobre el mismo.

El hormigón no es un material verdaderamente elástico, pero el hormigón que ha endurecido por completo y se ha cargado en forma moderada tiene una carga de esfuerzo de compresión - deformación que, en esencia, es una recta dentro del rango de los esfuerzos usuales de trabajo.

La magnitud de las deformaciones observadas y la curvatura de la relación esfuerzo-deformación (Figura 9), dependen por lo menos en parte, de la velocidad de aplicación de los esfuerzos. (Neville, 1981).

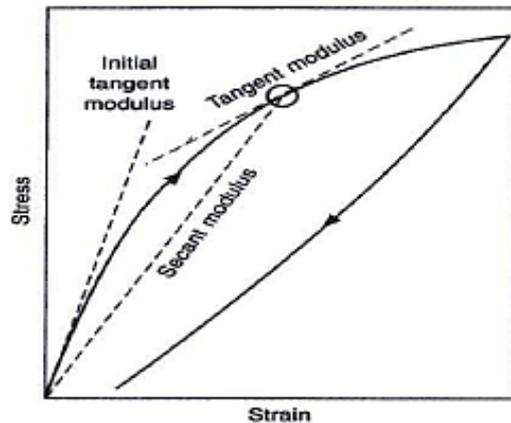


Figura 9. Curva característica esfuerzo - deformación para el concreto. (Neville, 1981).

### 2.4.3 Retracción en el hormigón

Las deformaciones por retracción en el hormigón, tanto en estado fresco como endurecido, pueden clasificarse por su efecto, causa u origen en varios tipos, pero en este documento solo trataremos dos; la retracción autógena y retracción por secado.

Valcuende et al. (2012) plantea que la pasta de cemento es el principal componente del hormigón responsable de los cambios volumétricos, cuanto mayor es el contenido de pasta mayor es la retracción.

Los resultados han demostrado que tanto la retracción por secado y la autógena pueden ser importantes en ciertos escenarios a edad temprana. Los factores ambientales afectan en gran medida la retracción por secado, mientras que las propiedades del material afectan la retracción autógena. La retracción a edad temprana es una preocupación, ya que es durante las primeras horas, el hormigón tiene la capacidad de deformación más baja y es más sensible a las tensiones internas. (Holt & Leivo 2004).

Los resultados muestran que la retracción autógena y retracción por secado son fenómenos dependientes (Soliman & Nehdi 2010).

Dentro de cada una de estas dos etapas de retracción, también hay varios tipos de cambio lineal que se puede medir físicamente en un espécimen, secado y autógenas principalmente. Ambos tipos pueden ocurrir durante cualquiera de las etapas de retracción. Además de secado y retracción autógena, el hormigón también se somete a la reducción de volumen debido a los cambios térmicos y reacciones de carbonatación. Los tipos de retracción se muestran en la siguiente. Figura 10.

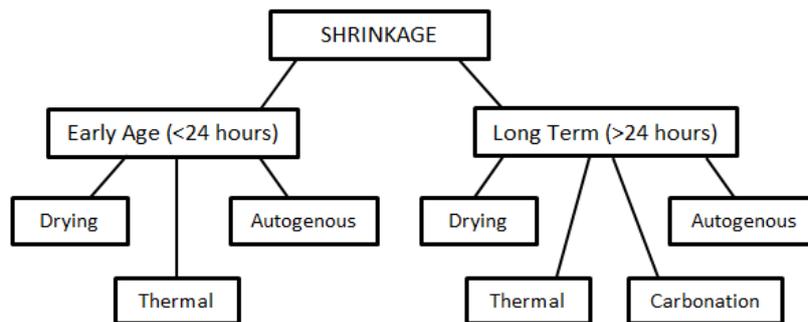


Figura 10. Diagrama de etapas de retracción, tipos.

- **Retracción autógena**

Esta disminución de volumen es debida al consumo del agua durante la hidratación del cemento. Se da en las primeras edades del hormigón y se prolonga mientras se desarrollen los procesos de hidratación que consumen agua.

En un hormigón de baja relación a/c puede ocurrir que no haya suficiente agua para completar el proceso de hidratación, agotando el agua libre que se encuentra en los poros capilares. Este fenómeno de consumo interno de agua también llamado auto secado es la causa, en parte, de la retracción autógena del hormigón.

La retracción autógena tiende a incrementarse con temperaturas elevadas, alto contenido de cemento, cementos más finos, y con cementos que tienen alto contenido de C3A y C4AF. Todos estos factores también aceleran el proceso de hidratación. La utilización de adiciones, como la ceniza volante, tiende a disminuir la retracción autógena. (Figueroa, T. 2011).

Según Holt & Leivo (2004), la retracción autógena no se puede prevenir mediante la práctica de la construcción, sino que debe ser abordado en el momento de la selección y dosificación de materiales. Plateo ciertas recomendaciones que pueden ayudar a reducir la retracción autógena a edad temprana:

- Utilizar cementos de lenta hidratación (es decir, finos más gruesos) que tienen menor contracción química.
- Utilizar cemento que tengan menor  $C_3A$  y  $C_3S$  en contenido, ya que éstos contribuyen más a la contracción química.
- Maximizar el contenido de agregado, ya que proporciona la sujeción a la contracción.
- No demorar el tiempo de fraguado.

El aumento de la retracción autógena se debe principalmente a la baja relación agua / aglutinante. Sin embargo, también la adición de polvos finos como el humo de sílice y cenizas volantes pueden tener un papel importante. (Jensen & Hansen 1995).

Cuando el endurecimiento se lleva a cabo al aire libre, la retracción autógena en HAC es menor que en los hormigones normalmente vibrado (Valcuende et al. 2012).

En el estudio de Vieira y Bettencourt (2003) se utilizaron hormigones con resistencia de aproximadamente 45 MPa y adiciones de ceniza volante y caliza. Esto demostró que la retracción autógena de ambos tipos de hormigones es similar, con valor de aproximadamente 100  $\mu\text{m}/\text{m}$ , después de seis meses.

- **Retracción por secado**

La retracción que el hormigón sufre debida al secado consiste básicamente en una deformación volumétrica de contracción, como consecuencia del movimiento de humedad dentro del material cuando existe un gradiente de humedad relativa entre el medio ambiente y la estructura.

La magnitud de la contracción por secado depende de diversos factores, algunos de ellos vinculados con la composición del hormigón, otros con las condiciones ambientales de exposición, fundamentalmente humedad y temperaturas ambientes, pero también con aspectos vinculados a las dimensiones y forma de la estructura y la cantidad y distribución de las armaduras.

Por lo tanto, a edad temprana la retracción por secado se puede evitar mediante la práctica de la construcción adecuada, mientras que la retracción autógena es sólo un factor de diseño de mezcla de concreto. Cada estructura de hormigón, tanto desde el material y los puntos de diseño estructural, tiene que ser evaluado de forma independiente a fin de estimar la magnitud de la contracción total y el riesgo de formación de grietas. (Holt & Leivo 2004).

La retracción de secado en los HAC, por lo general, es mayor que en los HCV, en parte, por su mayor contenido de finos y pasta, salvo en el caso de HAC fabricados con AMV y sin finos adicionales. (Benito, F. 2014). En la investigación realizada por Valcuende et al., (2012) se observó que la utilización de un AMV como sustitutivo del filler calizo permite obtener HAC con menor retracción de secado (un 33% menor).

## **2.5 Evolución de las propiedades del hormigón a corto plazo**

El proceso evolutivo del hormigón, ha sido un proceso arraigado por varias investigaciones que buscan en concreto analizar y comprender las propiedades, que el hormigón como material nos puede brindar.

EL seguimiento de la evolución a edad temprana va de la mano mediante un conjunto de parámetros que en concreto son necesarios para predecir el comportamiento de la edad temprana de las estructuras (Boulay et al. 2013).

El comportamiento del HAC a edades tempranas, podría presentar algunas variaciones en propiedades como la retracción, alteraciones en el tiempo de fraguado y retraso en la ganancia de la resistencia inicial, por, en general, dosis mayores de finos y aditivos. (Cuenca Asencio, E. 2008).

Según resultados obtenidos por Parra et al (2008), muestran que la evolución con la edad de la resistencia a compresión y del Módulo de deformación de los HAC y HCV es similar. Sin embargo, se aprecia que la evolución de la resistencia a tracción cuando se emplean elevados contenidos de finos difiere entre ambos hormigones.

Como se explicaba en la parte introductoria es de vital importancia entender el comportamiento del HAC a edades tempranas, debido a ciertas necesidades que han surgido al pasar el tiempo. El crecimiento y las aportaciones que se ha logrado en combinación con los diferentes usos que adopta el hormigón, han abierto una vertiente que permite entender cómo se comporta las diferentes propiedades de dicho hormigón a edades tempranas.

Este apartado se encargara de presentar las diferentes opiniones y términos que ciertos investigadores del área plasman respecto a este material mundialmente utilizado.

### **2.5.1 Resistencia a compresión**

El desarrollo de la resistencia a la compresión es probablemente uno de los parámetros estudiados más intensamente del hormigón. Esto es debido al hecho de que este parámetro, junto con el módulo de deformación, es la más importante en el análisis estructural (Østergaard, L. 2003).

Por igual la edad temprana y la evolución de las propiedades mecánicas tienen un impacto directo sobre la factibilidad de construcción y diseño estructural de elementos prefabricados (Panesar & Shindman 2011).

Dentro de las características principales el hormigón, la resistencia a la compresión a edad temprana es una propiedad importante (Panesar & Shindman, 2011) para evaluar y abordar cuestiones como el período mínimo para retirar el encofrado, la adecuación de las condiciones de curado, y la estabilidad del hormigón fresco.

El crecimiento de la resistencia a la compresión depende principalmente de la relación a/c, tipo de cemento, aditivos, puzolana y las condiciones de curado (temperatura y humedad). (Østergaard, L. 2003). Por igual una alta temperatura de curado inicial acelera las reacciones de hidratación y la formación de la estructura de la pasta de cemento hidratado a edad temprana. Por lo tanto, aumenta la edad temprana resistencia a la compresión del hormigón. (Soliman & Nehdi 2011).

Para que el desarrollo de la resistencia a edad temprana se mantenga, es claro que la temperatura de curado del hormigón es un factor importante, ya que el progreso de la hidratación del cemento es sensible a la temperatura (Sofi et al. 2012).

El análisis y el estudio de los HAC se han orientado en el uso de adiciones como la ceniza volante, tratando de buscar mejores viabilidades en el uso del HAC. Sukumar et al. (2008), planteo la utilización de altos contenidos de ceniza volante, supuesto a que estos son esenciales para estudiar el desarrollo de la fuerza a edades tempranas de 12 horas a 28 días, lo cual puede llegar a ser un factor significativo para la eliminación

del encofrado, reduciendo el porcentaje del cemento, evaluando las resistencias a compresión, tracción y comparados con un convencional.

Por lo visto son tales los factores que priorizan el desarrollo de la resistencia compresión, aspecto esencial en el fundamento del hormigón.

Además los HAC debido a su fluidez y composición presentan mejores cualidades que los HCV ya que estos necesitan de una compactación externa para propiciarles una estructura interna factible.

Son muchas las cuestiones de varios investigadores sobre cual tiene mejores propiedades mecánicas a compresión si HAC o HCV. Según Skarendahl & Petersson (1999), y Anagnostopoulos et al. (2009), las mezclas de HAC con equivalente relación agua/cemento tienen una resistencia a compresión mayor que las de HCV. Esto es debido a varios factores, como por ejemplo, una microestructura más densa, la utilización de adiciones de origen puzolánico, baja relación agua/finos, y tamaño máximo de árido menor.

De la misma manera, Parra et al (2007), plantea que la resistencia a compresión es semejante para HAC y HCV con la misma relación agua/cemento, y el mismo tipo de cemento entre el 10%. Dependiendo de la cantidad de filler calizo utilizado. Véase en la Figura 11

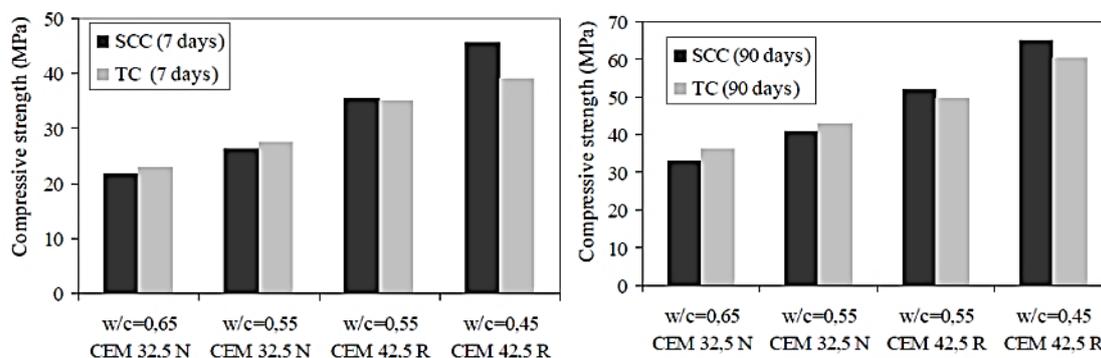


Figura 11. Comparación de HAC y HCV en función resistencia y diferentes relaciones a/c. (Parra et al 2007).

En la gráfica planteada por Parra et al (2007), proyecta que el diseño con alta relación a/c, contenido de cemento moderado y donde era necesario usar una cantidad de finos más elevada con el fin de aumentar la viscosidad, se observó que el HAC tiene menos resistencia a compresión que el HCV. Pero por otro lado, cuando se redujo el contenido de finos y el contenido de cemento aumenta, la tendencia se invierte.

En la Figura 12 se observa el crecimiento de la resistencia de un HAC y HCV, con el mismo diseño para una resistencia de 40 MPa, donde se observa que el HAC tiene cierta ventaja respecto al HCV. (Assie et al 2003).

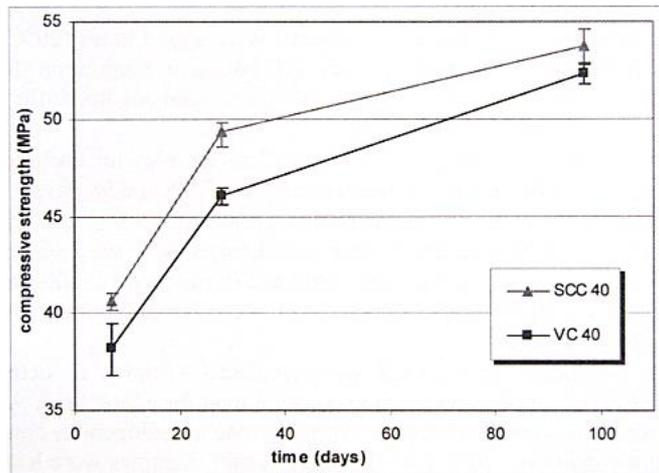


Figura 12. Comparación de HAC y HCV con el mismo diseño para resistencia de 40 MPa. (Assie et al. 2003).

Agranati, G (2008), concluyo que al analizar la relación agua/cemento y la resistencia a compresión, observo que en el caso del HAC la tendencia general de esta relación se desplaza hacia la derecha, esto significa que para hormigones con la misma relación agua/cemento, la resistencia del HAC es mayor. Véase en la Figura 13.

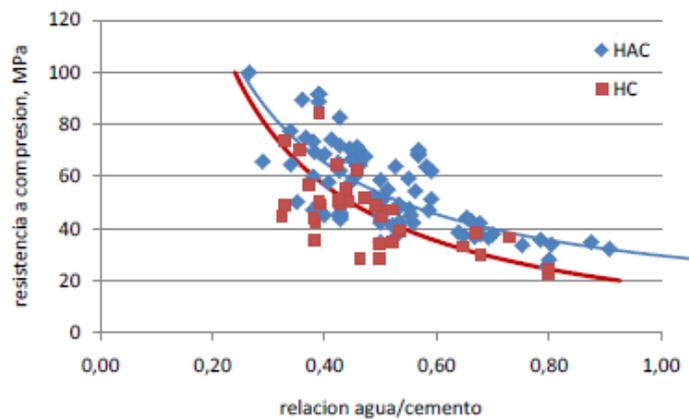


Figura 13. Comparación entre la relación a/c de HAC y HCV, y la resistencia a compresión. (Agranati, G. 2008).

Entre los resultados obtenidos por Sukumar et al. (2008), concluye que la tasa de aumento de la resistencias de los diferentes tipos de HAC es ligeramente superior a la resistencia presentada por el HCV. Ver Figura 14.

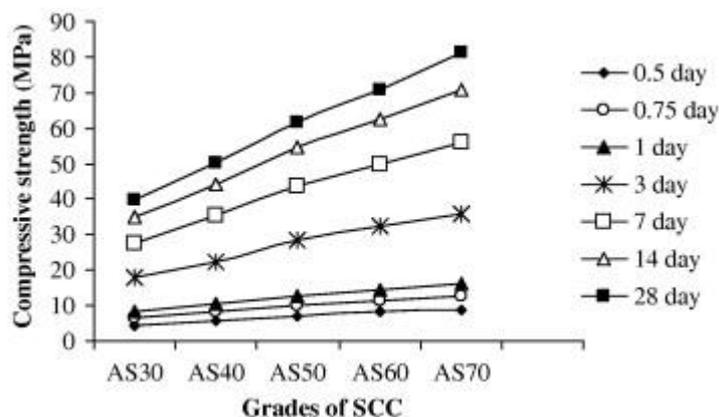


Figura 14. Tendencia de crecimiento de los diferentes tipos de HAC a diferentes edades, con inclusión de ceniza volante. (Sukumar et al. 2008),

Como se puede notar la gran versatilidad de información respecto a que los HAC dependiendo de ciertas variantes en el diseño, estos poseen resistencias ligeramente mayores que los HCV.

### 2.5.2 Resistencia a tracción

Resistencia a la tracción es una de las propiedades fundamentales más importantes del hormigón. Una predicción exacta de resistencia a la tracción del hormigón ayudará a mitigar los problemas de agrietamiento, mejorar la predicción resistencia al corte y minimizar el aplastamiento del hormigón en tensión, debido a los métodos inadecuados de predicción de resistencia a la tracción (Sukumar et al. 2008).

El desarrollo de resistencia a la tracción y a la compresión es generalmente afectado por factores similares. Por lo tanto, la resistencia a la tracción del hormigón puede estar relacionada con su resistencia a la compresión. Esta relación está influenciada por la edad, la clasificación, el tipo y densidad de agregados, las condiciones de curado, y el método de evaluación de la resistencia. (Soliman & Nehdi 2011).

Para una resistencia a compresión dada, las resistencias a tracción son semejantes a las que se obtendrían para un hormigón convencional del mismo tamaño máximo del árido. (ACHE, 2008).

La resistencia a la tracción a edad temprana, tiende a aumentar más rápidamente que la resistencia a la compresión (Schutter & Taerwe 1996). Por el contrario, algunas investigaciones han encontrado que la resistencia a la tracción aumenta a un ritmo menor que el de la resistencia a la compresión (Swaddiwudhipong et al., 2003).

Según Klug y Holschmacher (2003) la resistencia a tracción del HAC es ligeramente mayor que la del HCV.

Parra et al. (2011) concluye, que el HAC hechos con filler calizo, eran un 15 % menor que los HCV. A los 7 días, la diferencia entre los dos hormigones es pequeña, e incluso tiene una tendencia a desaparecer cuando el contenido de finos usado en el

HAC es alto. A edades más altas, 28 y 90 días, las diferencias aumentan, siendo el promedio de 15,5%. Esto se puede apreciar en la Figura 15.

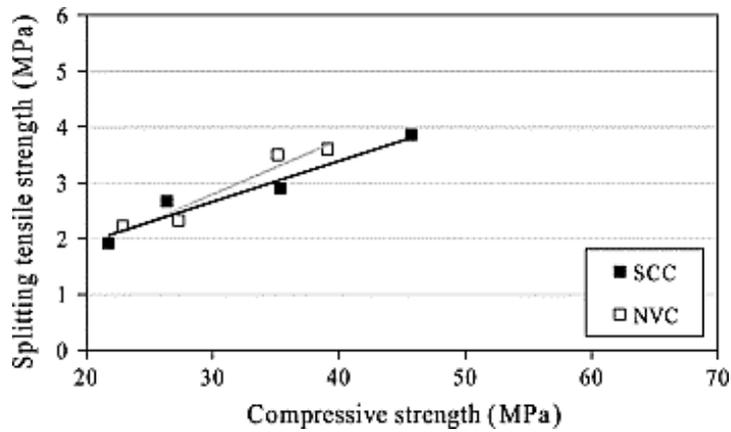


Figura 15. Resistencia a la tracción en función a la resistencia a la compresión HAC y HCV (7 días) (Parra et al 2011).

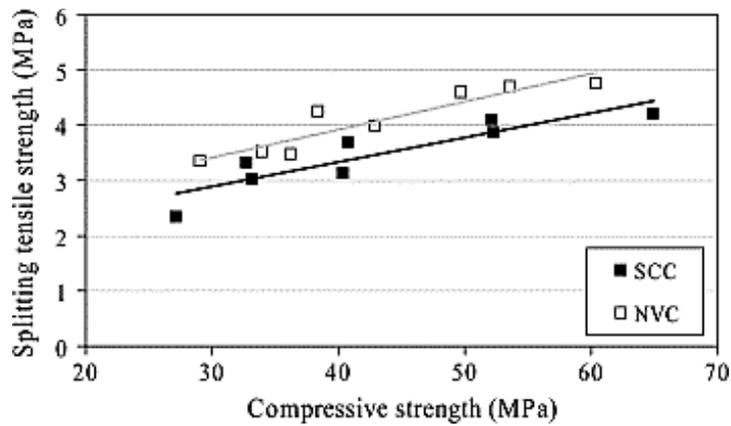


Figura 16. Resistencia a la tracción en función a la resistencia a la compresión HAC y HCV (28 y 90 días) (Parra et al 2011).

### 2.5.3 Módulo de deformación

Según Panesar & Shindman (2011), el módulo de deformación es una propiedad importante del hormigón utilizado para el diseño, el análisis de la fuerza y la facilidad de mantenimiento de estructuras de hormigón.

Sin embargo, el cambio en el módulo elástico del hormigón con respecto a su resistencia a la compresión a edades tempranas se ve afectado por varios parámetros, incluyendo la relación a/c, temperatura, tipo de cemento, las propiedades de los agregados, y las condiciones de curado (Neville, 1996).

Según Agranati, G (2008), Los factores que tienen cierta influencia en el módulo de deformación son:

- La porosidad, que depende directamente de la relación a/c.
- El aumento del contenido de pasta en la mezcla de HAC, disminuye el módulo de deformación del hormigón.

- La disminución de proporción de árido en la mezcla contribuye a la disminución Módulo de Deformación / módulo de elasticidad.
- La zona de transición entre el árido y la pasta es la zona más débil del hormigón, por las existencias de huecos capilares influenciando sobre el comportamiento mecánico del hormigón.

La disminución de la relación a/c aumenta el módulo de elasticidad como resultado del desarrollo de una microestructura más densa (Østergaard, 2003).

El Módulo de deformación del hormigón depende de sus componentes y sus relativos volúmenes, por lo cual, es de esperar que el Módulo de deformación del hormigón disminuya con el aumento del volumen de pasta y la disminución del volumen del árido. Los resultados de esta investigación muestran que el Módulo de deformación del HAC es menor que el del hormigón convencional, aunque sus valores aún están dentro del límite indicado por el CEB-FIB 90 (Klug y Holschmacher, 2003). Esto se puede apreciar en la Figura 17.

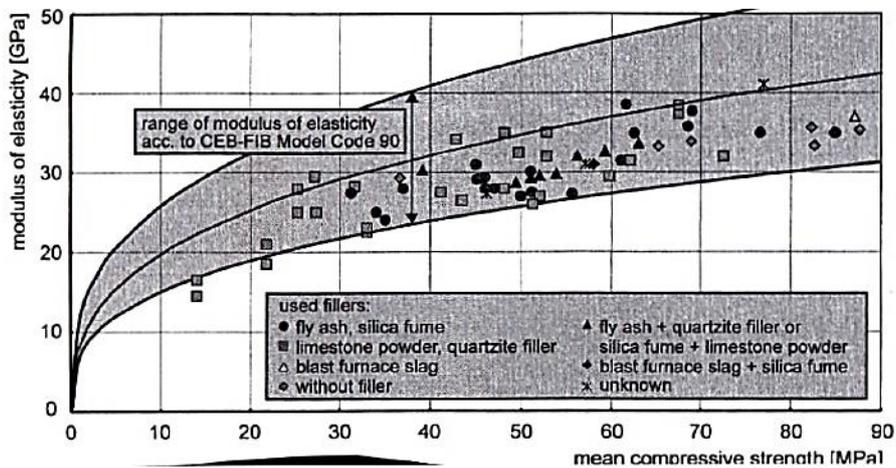


Figura 17. Módulo de deformación del HAC en función a la resistencia a compresión y comparado con el CEB-FIB 90 (Klug y Holschmacher 2003).

Vieira y Bettercourt (2003), en su investigación utilizaron hormigones con resistencia a compresión de, aproximadamente 45 MPa con adiciones de ceniza volante y filler calizo. Estos realizaron pruebas en tres edades: 3, 28 y 180 días. A la edad de 3 días, en el HCV el módulo de deformación es mayor que el del HAC debido a que el contenido de árido es mayor en el HCV, obteniendo resultados de: 28 y 33 GPa, para el HAC y HCV, respectivamente. A edad temprana el contenido de árido es más importante porque la resistencia de la pasta es aún baja. A los 28 días el módulo del HAC está por encima del HCV por la mínima (36 y 34 GPa, para el HAC y HCV). A los 180 días, el módulo del HAC aumenta, y supera al del HCV (37 y 34 GPa, para el HAC y HCV). Esto se debe a que en el HAC hay menos pérdida de agua, lo que permite mayor grado de hidratación.

En la investigación de Assie et al. (2003), consideraron un diseño de HAC y un HCV con la misma resistencia a compresión de 40 MPa, los mismos componentes y la misma relación de grava / arena. Los resultados del módulo de deformación de cada

hormigón fueron muy parecidos donde el HAC obtuvo un módulo de 40830 MPa, y el HCV de 40270 MPa.

Según investigaciones el módulo de deformación, es mayor en los HAC, porque la adición de finos de filler calizo, crea menor porosidad y una microestructura más fina. A pesar de esto, el módulo de deformación del hormigón tiende a ser alrededor de 2% menos en los HAC como resultado de la mayor cantidad de pasta de cemento en los HAC ( Parra et al. 2011). Obsérvese en la Figura 18.

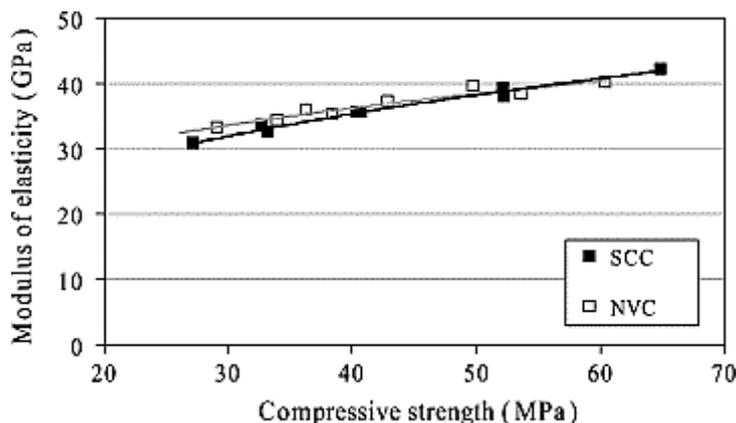


Figura 18. Módulo de deformación en función a la resistencia a la compresión HAC y HCV (7 días) (Parra et al 2011).

#### 2.6.4 Planteamiento de las normas respecto a edades tempranas en el hormigón

La evolución de la resistencia del hormigón en la obra es diferente a la del mismo hormigón en laboratorio, ya que su humedad y temperatura dependen de múltiples factores, tales como ambiente en el que está situado, volumen del hormigón, entre otros. (prNE 83160).

Según la prNE 83160 parte 1, se entiende que edad temprana, para cada hormigón corresponde al período de tiempo que comprende desde el final de su fraguado hasta que alcanza el 50% de su resistencia a 28 días.

Esta norma se fundamenta en el análisis y evaluación del crecimiento de la resistencia por método de madurez.

Para poder estimar un orden de magnitud de a qué edad se alcanza ese valor, se puede utilizar la fórmula que aparece en la EHE-08, resultando de su aplicación los valores indicados en la Tabla 2.

En el apartado 31.3 de la EHE-08, nos permite estimar la resistencia a distintas edades. De acuerdo con la ecuación indicada se puede considerar que la resistencia al final de la edad temprana (prNE 83160) es la mitad de la resistencia media a 28 días. Se obtiene que respecto al tipo de cemento a utilizar y de acuerdo a una

proporción relación a/c, se consiga una proyección de edades de acuerdo a ciertas condiciones solicitadas. Ver Tabla 1.

Tabla 1. *Proyección de edad respecto al cemento a utilizar. (PrNE 83160) (EHE-08).*

Condición del hormigón	Cemento	Relación (a/c)	Edad a la que $f_{ci}=0.50 f_{c28}$	
			horas	días
Endurecimiento rápido	CEM 42,5R CEM 52,5 CEM 52,5R	$\leq 0,60$	36	1,5
	CEM 32,5R CEM 42,5	$\leq 0,50$	48	2
Endurecimiento normal	CEM 32,5 CEM 42,5	$\geq 0,50$	84	3,5

Evidentemente, los aditivos y adiciones que retardan o aceleran las resistencias del hormigón hacen variar los plazos anteriores. (prNE 83160).

Según el eurocódigo 2 en la UNE EN 1992-1-1:2010 (AENOR, 2010), para casos que se necesite especificar la resistencia del hormigón a compresión, a una edad (t), se estipulara que:

$$f_{ck}(t) = f_{cm}(t) - 8 \text{ (MPa)} \quad \text{para } 3 < t < 28 \text{ días.}$$

$$f_{ck}(t) = f_{ck} \quad \text{para } t \geq 28 \text{ días}$$

Para casos más precisos se debería fundamentar en ensayos, especialmente para  $t \leq 3$  días.

El informe ACI237R-07 recomienda que los ensayos para determinar las características endurecidas del HAC se efectúen después de 91 días, para permitir el Desarrollo de las propiedades del hormigón, debido al contenido adicional de material cementante.

Una crítica que se puede hacer a esta especificación es que a esas edades es inviable tomar decisiones sobre el hormigón autocompactante sin que, en su caso, el coste sea excesivo. Esta especificación además, presupone que todas las adiciones tienen la misma influencia sobre el endurecimiento del hormigón, lo que en principio no parece ser cierto.

La falta de información respecto a este tema es notable, debido a esto es de importancia conocer las características que preceden a los HAC, no obstante el aporte a dicha información será prevista como parte ideal y fundamental, para el desarrollo del conocimiento del hormigón como material.

Para la determinación de las respectivas resistencias medias (compresión, tracción) y módulo de deformación en base al tiempo, las normas de referencias, EHE-08, EC-2, MC-10, ACI 209. 2R 08, establecen las siguientes formulaciones:

Tabla 2. Formulas respecto a las normas (EHE-08, EC-2, MC-10, ACI 209.2R 08) en base a las propiedades mecánicas en función al tiempo.

Normas	Ecuación para obtener:		
	Resistencia a compresión	Módulo de deformación	Tracción indirecta
EHE-08	$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm}$	$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{c,m}}\right)^{0.3} E_{cm}$	$f_{ct,m}(t) = \beta_{cc}(t)^\alpha f_{ct,m}$
EC-2			
MC-10		$E_{cm}(t) = \beta_E(t) E_{cm}$	-
ACI 209.2R 08	$f_{cmt} = \left[\frac{1}{a + b(t)}\right] f_{cm28}$	$E_{cmo}(t) = 0.043 \gamma_c^{1.5} \sqrt{f_{cmo}}$	-

Coficiente que depende de la edad del hormigón ( $\beta_{cc}(t)$ ):

Coficiente que depende de la edad del hormigón, t en días ( $\beta_{cc}(t)$ ):

$$\beta_{cc}(t) = \exp\{s * [1 - (20/t)^{0.5}]\}$$

$$\beta_E(t) = [\beta_{cc}(t)]^{0.5}$$

En la Figura 19 se muestra la tendencia de evolución respecto a la relación de resistencia media a compresión respecto al tiempo planteada por la norma, y la tendencia del módulo de deformación respecto a la resistencia a compresión.

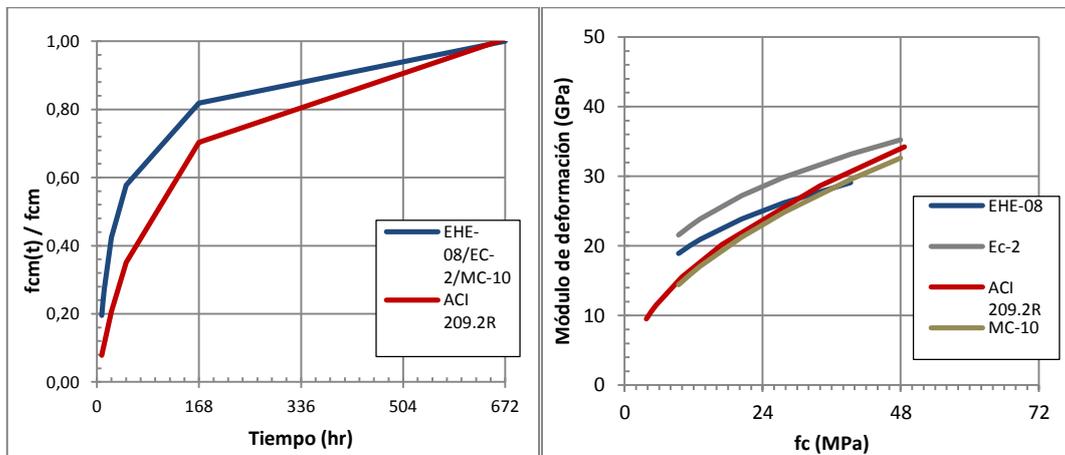


Figura 19. Tendencia de resistencia a compresión y relación módulo de deformación según por las norma citadas.

Desde el punto de vista de la resistencia a compresión todas las normas adoptan básicamente el mismo criterio, es decir, consideran que la resistencia a una edad determinada es una función del tipo y/o clase resistente del cemento. Sin embargo, en el caso del módulo de elasticidad que en la normativa internacional es en función del módulo a la edad a los 28 días y en la norma ACI que es en función de la resistencia media a la edad de estudio.

Podemos presenciar que existen normas que evalúan las propiedades mecánicas a corto plazo, pero desde un punto vista, todas difieren respecto a su método. Por tal razón la necesidad de una norma en concreto, en base a este criterio de investigación es de vital importancia para futuras investigaciones. No obstante la evaluación y comparación de los datos experimentales obtenidos en este proyecto de investigación fueron comparadas con estas respectivas formulaciones.

### 3- PROGRAMA EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA

#### 3.1 Programa general.

En este capítulo se describe el programa experimental de laboratorio que abarca esta investigación.

De acuerdo con los objetivos establecidos se ha diseñado el siguiente plan experimental:

1. Realizar dos hormigones autocompactantes (HAC) con un escurrimiento de 700 mm y un nivel de resistencia de 40 MPa.
2. Fabricar dos hormigones convencionales vibrados (HCV) con una consistencia blanda-fluida y un nivel de resistencia de 40 MPa.
3. Determinar las propiedades de cada hormigón y llevar a cabo los ensayos indicados en la Tabla 3.

Tabla 3. *Propiedades determinadas y Ensayos realizados*

Estado del hormigón	Propiedad	Tipo de hormigón			
		Hormigón autocompactante		Hormigón convencional vibrado	
		Característica	Ensayo	Característica	Ensayo
Hormigón fresco	Reológicas	Fluidez	Escurrimiento	Trabajabilidad	Asiento
		Capacidad de paso	Anillo Japonés		
			Embudo V		
		Tensión de corte	Reómetro		
	Viscosidad plástica				
	Físicas	Fraguado	Principio y Fin	Fraguado	Principio y Fin
Aire Ocluido		Contenido	Aire Ocluido	Contenido	
Hormigón endurecido	Mecánicas	Compresión	Compresión	Compresión	Compresión
		Tracción	Indirecta	Tracción	Indirecta
	Reológicas	Deformación	Módulo de deformación	Deformación	Módulo de deformación
		Retracción	Autógena	Retracción	Autógena
			Por secado		Por secado

Los ensayos se llevan a cabo a edades muy tempranas (8, 10 y 12 horas), tempranas (24, 48 horas) y convencionales (7 y 28 días) para cada tipo de hormigón.

También se han utilizado dos tipos de aditivos superplastificantes que son:

- Sika Viscocrete 20HE.
- Sika Viscocrete 3425.

Policarboxilato modificado en base acuosa

De acuerdo con el planteamiento descrito se diseñan las siguientes dosificaciones:

Tabla 4. *Dosificaciones.*

Tipo de hormigón	Propiedades de referencia			Tipo de aditivo	Dosificación
	Escurecimiento (mm)	Asiento (mm)	Resistencia (MPa)		
Hormigón Autocompactante	700	N/A*	40	Viscocrete 20HE	1
				Viscocrete 3425	1
Hormigón Convencional Vibrado	N/A*	10	40	Viscocrete 20HE	1
				Viscocrete 3425	1
TOTAL					4

\*N/A-no aplica

En este estudio se ha realizado un total de 382 probetas ensayadas sin incluir los ensayos de acompañamiento (prueba en estado fresco y tiempo de fraguado del hormigón), cerca de 2 metros cúbicos de hormigón, los cuales se detallan en la tabla siguiente.

Tabla 5. *Detalle de ensayos y M<sup>3</sup> utilizados. (No se incluye el desperdicio)*

Cantidad de ensayos realizados				
Ensayos	Probetas por etapas	Datos por ensayo	Volumen (L)	volumen cada probeta (L)
Compresión	24	187	5.3	991
Módulo	12	93		-
Tracción indirecta	24	70		371
Retracción	8	32	4	128
TOTAL		<b>382</b>		<b>1490</b>

Nota: no se suman los litros aportados por los ensayos del módulo debido a que se encuentran incluidos en los de compresión, de las 24 probetas a compresión, a 12 se les realizaba el módulo de deformación.

### 3.2 Plan de Trabajo.

Se estableció un plan de trabajo con las cuatro fases siguientes:

- Fase 1: Caracterización de los materiales componentes.
- Fase 2: Fabricación del hormigón.
- Fase 3: Ensayos sobre el hormigón fresco.
- Fase 4: Ensayos sobre el hormigón en fase de endurecimiento.

- **Fase 1:**

De los productos de origen industrial se obtuvo la información técnica del producto. En el caso de los áridos y filler se procedió a determinar la granulometría el contenido de finos y las densidades.

- **Fase 2:**

Teniendo en cuenta los condicionantes del laboratorio: capacidad de la amasadora, disponibilidad de las herramientas del laboratorio, y la coordinación de horas de trabajo para cada ensayo se dividió en:

Fase 2.1. Realización de las amasadas para caracterización hormigón fresco.

Fase 2.2. Fabricación de 4 amasadas de 12 probetas cilíndricas cada una.

Fase 2.3. Fabricación de 2 amasadas de 12 probetas cilíndricas cada una.

Fase 2.4. Fabricación de 1 amasada de 8 probetas prismáticas.

A continuación de cada una de estas fases se procedió a la realización de los correspondientes ensayos de la fase 3.

- **Fase 3:**

Para la realización de los ensayos de propiedades mecánicas y módulo de deformación se mantuvieron las probetas enmoldadas durante 24 h en condiciones ambientales de  $22'5 \pm 2'5$  °C para una vez desenmoldadas mantener en cámara de curado húmedo a esa misma temperatura y humedad del  $90 \pm 5$  % de humedad.

**Fase 3.1. Características del hormigón fresco:**

- Ensayo de Ecurrimento. UNE EN 12350-8.
- Ensayo del embudo en V. UNE EN-12350-9.
- Aire ocluido. UNE EN-12350-7.
- Ensayo con Reómetro.
- Tiempo de fraguado del hormigón por penetración. ASTM C403.

**Fase 3.2. Resistencia a compresión y módulo de deformación:**

- Ensayo de resistencia a compresión. UNE EN 12390-3.
- Ensayo del Módulo de deformación. ASTM C 469-14.

Condiciones:

- Capacidad de amasadora: 67 litros por amasado.
- Moldes disponibles: 24 moldes cilíndricos (150mm  $\varnothing$  \* 300mm).
- Equipo de realización de ensayo: 1equipo (IBERTEST).
- Cámara de curado con 100 % H.R. y 20 °C.

**Fase 3.3. Resistencia a tracción indirecta**

- Tracción indirecta. UNE EN 12390-6.

Condiciones:

- Capacidad de amasadora: 67 litros por amasado.
- Moldes disponibles: 24 moldes cilíndricos (150mm  $\varnothing$  \* 300mm).
- Equipo de realización de ensayo: 1 equipo (IBERTEST).
- Molde para ensayo tracción indirecta (método brasileño).
- Cámara de curado con 100 % H.R. y 20 °C.

- **Fase 4: Retracción.**

Para la realización de los ensayos de retracción se mantuvieron las probetas enmoldadas en cámara de curado húmedo a  $22'5 \pm 2'5$  °C de temperatura y humedad del  $90 \pm 5$  % de humedad hasta el momento de realización de los ensayos

- Retracción Autógena
- Retracción por secado (perdida: por volumen y peso )

Condiciones:

- Capacidad de amasadora: 67 litros por amasado.
- Moldes disponibles: 8 moldes prismáticos (40\*100\*100 mm).
- Cámara de curado con 100 % H.R. y 20 °C.
- 2 cámaras húmedas para la retracción 50% H.R. y 20 °C.
- Retracción autógena: 4 sensores de desplazamiento y aparato de medición GL 220.

### 3.2.1 Procedimiento de trabajo.

Para tener un mejor control del trabajo realizado se dispuso a realizar un cronograma de actividad de trabajo. Los cuales se describen a continuación.

- **Fases 2.1 y 3.1**

Día	Elaboración	Procedimiento
Día 1	Pre amasado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Introducir árido ha área de trabajo.</li> <li>- Humedecer los áridos.</li> <li>- Cubrir los áridos con un plástico, para el día siguiente.</li> </ul>
Día 2	Ensayo en estado fresco	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Determinar la humedad de los áridos y corregir el agua.</li> <li>- Realizar amasada para ensayos previos en estado fresco.</li> <li>- Realización de ensayo de escurrimiento, reómetro, y embudo en V.</li> <li>- Segunda amasada para realizar el ensayo de tiempo de fraguado del hormigón.</li> <li>- Separación del árido grueso por tamizado del hormigón obteniendo el mortero y realizando el ensayo según la ASTM C403.</li> </ul>

Nota: Procedimiento de pruebas de estado fresco y principio y final de fraguado del hormigón se realizó para ambos diseño del HAC

- **Fases 2.2, 2.3, 3.2 y 3.3.**

<b>Día</b>	<b>Elaboración</b>	<b>Procedimiento</b>
Día 1	Pre-amasado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Introducir árido ha área de trabajo.</li> <li>- Humedecer los áridos.</li> <li>- Cubrir los áridos con un plástico, para el día siguiente.</li> <li>- Colocar desencofrarte a moldes (150 mm Ø * 300mm).</li> </ul>
Día 2	Amasado y ensayo a edad temprana	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sacar la humedad de los áridos y corregir el agua.</li> <li>- Realizar hormigón.</li> <li>- Realización de prueba de consistencia. (Cono de Abrams HCV y escurrimiento HAC.</li> <li>- Vertido y colocación de hormigón en molde.</li> <li>- Procedimiento de compactación manual con varilla para HCV</li> <li>- Almacenamiento de probetas en habitación con 20 – 25°C de temperatura.</li> <li>- Desencofrado a 7 horas de su colocación en molde.</li> <li>- Refrentado de las probetas, solo a las que se les hará compresión y módulo deformación.</li> <li>- Iniciación de ensayos a compresión, módulo de deformación y tracción indirecta a 8, 10 y 12 horas.</li> </ul>
Día 3	Ensayo a 24 horas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Desencofrado de probeta 2 h antes del ensayo.</li> <li>- Colocar todas las probetas que no se van a ensayar en cámara de curado.</li> <li>- Pulido de probetas a ensayar solo las que se ensayaran a compresión y módulo deformación.</li> <li>- Realización de ensayo a compresión y módulo de deformación, tracción indirecta.</li> </ul>
Día 4	Ensayo a 48 horas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pulido de probetas 1 hora antes de realización de ensayo, solo las que se ensayaran a compresión y módulo deformación.</li> <li>- Realización de ensayos a compresión, módulo de deformación y tracción indirecta.</li> </ul>
Día 5	Ensayo a 7 días	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pulido de probetas 1 hora antes de realización de ensayo, solo las que se ensayaran a compresión y módulo deformación.</li> <li>- Realización de ensayo a compresión y módulo de deformación, tracción indirecta.</li> </ul>
Día 6	Ensayo a 28 días	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pulido de probetas 1 hora antes de realización de ensayo, solo las que se ensayaran a compresión y módulo deformación.</li> <li>- Realización de ensayo a compresión y módulo de deformación, tracción indirecta.</li> </ul>

Nota: Repetir proceso con los cuatro tipos de diseños de hormigón.

- **Fase 4**

<b>Día</b>	<b>Elaboración</b>	<b>Procedimiento</b>
Día 1	Pre-amasado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Introducir árido ha área de trabajo.</li> <li>- Humedecer los áridos.</li> <li>- Cubrir los áridos con un plástico, para el día siguiente.</li> <li>- Colocar desencofrarte a moldes (40mm*100mm* 100mm).</li> </ul>
Día 2	Amasado y preparación ensayo retracción autógena	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sacar la humedad de los áridos y corregir el agua</li> <li>- Realizar hormigón.</li> <li>- Realización de prueba de consistencia. (Cono de Abrams HCV y escurrimiento HAC).</li> <li>- Preparación de moldes con lámina de poliestireno en la parte inferior del molde y capa de poliéster alrededor del molde. para que conserven la humedad.</li> <li>- Vertido y colocación de hormigón en molde.</li> <li>- Procedimiento de compactación manual con varilla para HCV.</li> <li>- Almacenamiento de probetas en cámara de curado 100 % H.R. y 20°C.</li> <li>- Desencofrado de 2 de 8 probetas prismáticas entre 6 - 8 horas</li> <li>- Preparación de esas 2 probetas para medir la retracción autógena a edad temprana.</li> </ul>
Día 3	Preparación ensayo retracción por secado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Desencofrado de las demás probetas prismáticas.</li> <li>- Parar el ensayo de retracción autógena, guardar datos.</li> <li>- Tomar probetas de retracción autógena y 4 probetas más para introducir en cámara de retracción por secado.</li> <li>- Desprender el plástico a 1 de las 2 probetas de retracción autógena y colocarle a una de las 4.</li> <li>- Preparar relojes de medida a cada probeta, he introducir a cámara de retracción.</li> <li>- Introducir las 2 probetas restantes a otra cámara climática.</li> </ul>
Día 4 y sucesivos	Ensayo de retracción	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Peso de las 2 probetas cámara climática</li> <li>- Lectura de las 6 probetas de la cámara de retracción</li> </ul>

Nota: en el proceso de ensayo de retracción por secado (por volumen y por secado), se tomaran medidas por 25 a 30 días aproximadamente. Repetir con los demás 4 diseños de hormigón.

### 3.3 Metodología.

#### 3.3.1 Materiales utilizados.

Los materiales utilizados en nuestro diseño se platican en la tabla siguiente. Integrada por: cemento, áridos, y aditivos, una de las razones fundamentales para evaluar el comportamiento del HAC y HCV.

Tabla 6. *Materiales Utilizados*

Materiales	Designación	Procedencia
Cemento	CEM I 52,5	Cementval S.L.
Áridos	Arena 0/2 (caliza, machacada)	Carasoles
	Arena 0/4 (caliza, machacada)	
	Grava 4/12,5 (caliza, machacada)	
Filler	Filler calizo	Caplansa
Aditivo	Sika ViscoCrete-3425	Sika
	Sika ViscoCrete-20 HE	

De acuerdo a la Norma UNE-EN 933-1:2012, se procedió a realizar el ensayo de granulometría de los áridos, obteniendo esta curva granulométrica de los áridos.

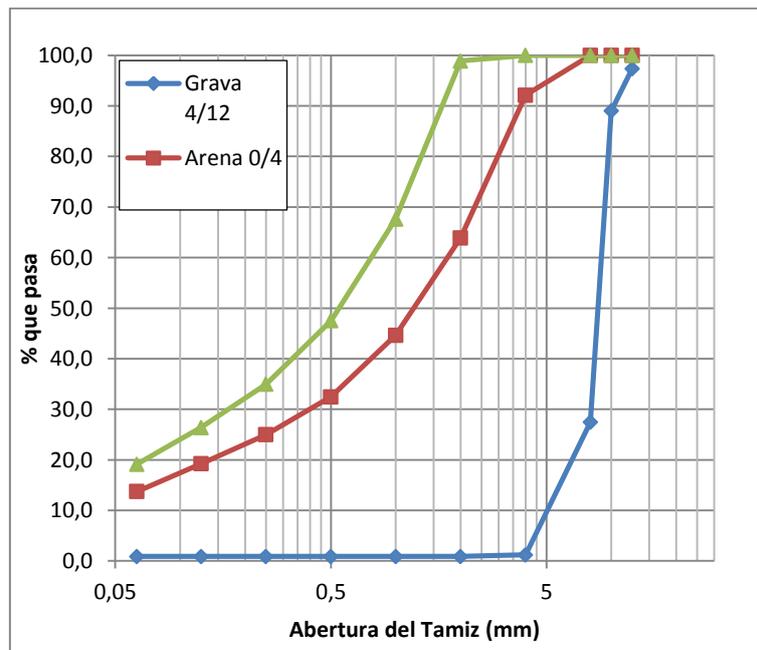


Figura 20. *Curva granulométrica de los áridos.*

En base a esto procedemos a realizar nuestras dosificaciones de lugar.

### 3.3.2 Dosificaciones realizadas.

Obtenido el análisis granulométrico procedemos a diseñar el hormigón. Los parámetros que se requieren son:

❖ Hormigón HAC de 40 MPa:

- $D_{max}$ : 12.5 mm.
- Ecurrimiento: 700 mm.
- Cemento ( CEM I 52.5 R): kg /  $mt^3$
- Relación a/c: 0.65
- Aditivo: Sika ViscoCrete 20HE, 3425.

❖ Hormigón HAC de 40 MPa:

- $D_{max}$ : 12.5 mm.
- Asiento con cono de Abrams: 8-11 cm.
- Cemento (CEM I 52.5 R): 325 kg /  $mt^3$
- Relación a/c: 0.65
- Aditivo: Sika ViscoCrete 20HE, 3425.

Para la determinación de la granulometría del árido total se utiliza la ecuación de Bolomey que tiene en cuenta el cemento como un árido más. Esto se debe a que en el HAC al añadirle filler este también debe de considerarse como árido. Dado que en la bibliografía se establece el valor del coeficiente “a” para los HCV, habría que establecer este valor para los HAC. De experiencias existentes se ha llegado a la conclusión de que este valor debe estar entre 22 y 24. Adecuando el filler a falta de ausencias de finos, adicionamos lo propuesto en las ilustraciones siguientes:

Tabla 7. Resultados de diseño.

Tipo de hormigón	HCV40		HAC40	
	HCV 20HE	HCV 3425	HAC 20HE	HAC 3425
Denominación				
Relación a/c	0,65	0,65	0,65	0,65
Coeficiente de bolomey (a)	12	12	22	22
Cemento (Kg)	325	325	325	325
Agua (Litros)	211,25	211,25	211,25	211,25
Grava 04/12 (Kg)	748,67	768,09	682,65	681,35
Arena 0/4 (Kg)	978,43	883,2	571,93	517,38
Arena 0/2 (Kg)	109,51	185,31	478,83	531,38
Filler (Kg)	0	0	100	100
% aditivo	0,30%	0,30%	0,80%	1,30%
Aditivo (Kg)	0,98	0,98	2,6	4,23
<b>Total (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2373.83</b>	<b>2373,83</b>	<b>2372,26</b>	<b>2370,58</b>

Para mejorar la trabajabilidad en el hormigón ajustamos un porcentaje de aditivo respecto al cemento para un 0.3, 0.8 y 1.3 %, de los aditivos Sika ViscoCrete 20HE Y 3425. De igual manera ajustamos nuestro diseño a la curva de Bolomey de acuerdo al coeficiente (a) que deseamos, para los diseños propuestos:

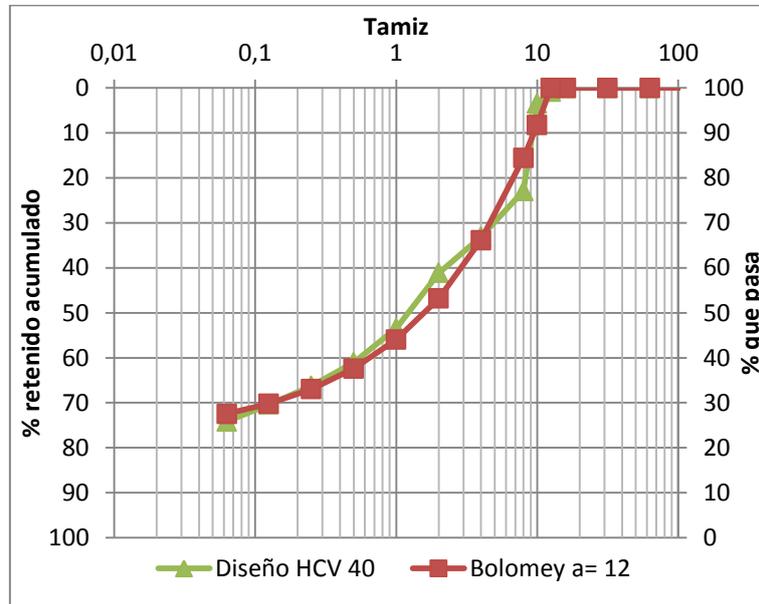


Figura 21. Dosificación en peso seco del material. HCV.

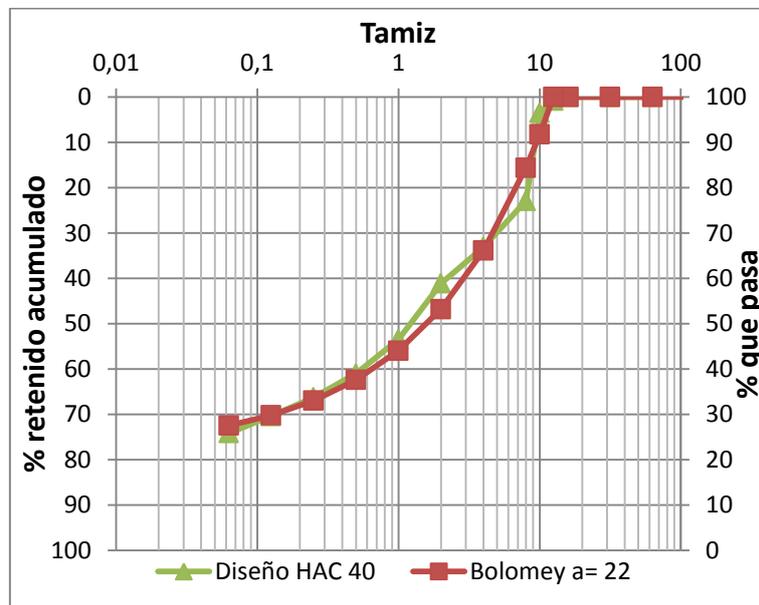


Figura 22. Dosificación en peso seco del material. HAC.

### 3.3.3 Procedimiento de los ensayos.

#### Amasado

Se ha estipulado un tiempo de amasado para cada diseño, considerando la capacidad y el tipo de la amasadora utilizada (planetaria de eje vertical). Teniendo todo en orden, con el diseño previsto y la corrección de agua de lugar, además de un control en la aplicación del aditivo, se ha de realizar dos tipos de amasadas, una para el hormigón autocompactante y otra para el hormigón convencional.

- **Ciclo de amasado de HAC:**

Minuto 0: adición grava, arena, filler. (Homogenización de los áridos).

Minuto 2: adición del cemento.

Minuto 6: adición de una 50% del agua total. (Vertido lento).

Minuto 7: adición de aditivo (20HE, 3425), disuelto en un 10% de agua. (Vertido lento).

Minuto 10: adición del resto del agua total.

Minuto 8 – 12: Fin del amasado. 8 minutos para el caso de utilización de aditivo 20HE y 12 minutos para el caso de utilización de aditivo 3425. (Se inspecciona la mezcla y se realiza prueba del escurrimiento).

- **Ciclo de amasado de HCV:**

Minuto 0: adición grava, arena. (Homogenización de los áridos).

Minuto 2: adición del cemento.

Minuto 6: adición de una 50% del agua total. (Vertido lento).

Minuto 7: adición de aditivo (20HE, 3425), disuelto en un 10% de agua. (Vertido lento).

Minuto 10: adición del resto del agua.

Minuto 8 - 12: Fin del amasado. 8 minutos para el caso de utilización de aditivo 20HE y 12 minutos para el caso de utilización de aditivo 3425. (Se inspecciona la mezcla y se realiza prueba cono de Abrams).

#### Toma de muestra. UNE EN 12350-1

Según la norma UNE EN 12350-1, hemos procedido a realizar la respectiva toma de muestras para la ejecución de nuestros ensayos post amasado. Para nuestra investigación solo se utilizaran 2 tipos de recipientes o moldes (cilíndricos y prismáticos), para los casos de: compresión, módulo de deformación, tracción indirecta

y retracción). La elaboración de los ensayos de acompañamiento respectivos, se realizaran de acuerdo a sus respectivos códigos normalizados.

#### **Tipos de moldes:**

- **Molde cilíndrico (150 mm Ø \* 300 mm):** utilizado para la realización de los ensayos a compresión, módulo de deformación y tracción indirecta. Se deberá preparar y acondicionar cada molde para cada ensayo, tanto en la limpieza, aplicación de desmoldante y que el molde este bien cerrado. De acuerdo al tipo de hormigón si es convencional se aplicaran la compactación debida, según la norma UNE EN 12390-2.
- **Molde Prismático (100 \*100 \*400 mm):** utilizados por los ensayos de retracción. Se coloca el hormigón en tres fases: la primera en el centro de la probeta y las demás al extremo, se realizara una breve compactación con varilla y la mayor parte con leves golpes a los externos del molde.

#### **Ensayos en estado fresco.**

- **Ensayo de escurrimiento o extensión de flujo. UNE EN 12350-8.**

Cabe destacar que este tipo de ensayo aplicado para HAC, es una alternativa para evaluar la consistencia de estos tipos de hormigones. La utilización del cono de Abrams, una plancha o placa metálica y un recipiente (cubo), nos permite elaborar este ensayo, obteniendo el  $T_{50}$  y el diámetro de extensión del hormigón.



Figura 23. *Escurrecimiento hormigón autocompactante*

- **Ensayo del cono de Abrams. UNE EN 12350-2.**

La elaboración de este ensayo nos permite evaluar el asentamiento del hormigón convencional, mediante su preparación se procede a realizar en lugar plano sin ningún tipo de desnivel, luego se vibra con varilla en 3 capas, cada capa con un total de 25 golpe, se enrasa y se procede a levantar el cono y se determina el asentamiento del mismo.



Figura 24. : Ensayo de asentamiento cono de Abrams

- **Ensayo del embudo en V, Determinación del tiempo de flujo. UNE EN 12350-9**

En este ensayo tratamos de determinar el tiempo de flujo y la capacidad de paso de nuestro HAC, dicho ensayo avalado por la UNE EN 12350-9, cerrando la boquilla inferior, procedemos a llenar, luego de llenarlo enrasamos la parte superior, abrimos la boquilla inferior y tomamos el tiempo en que tarda el hormigón en salir ( $T_v$ ), consiguiendo esto obtenemos la velocidad de flujo.



Figura 25. Ensayo del embudo en V.

- **Ensayo con el reómetro. (Estudio reológico).**

Se ha utilizado el dispositivo reométrico 4C-Rheometer, diseñado por Danish Technological Institute. Éste estima la fluidez y características del fluido a través de dos parámetros: la tensión umbral de corte y la viscosidad plástica, utilizados ambos en los modelos teóricos de Bingham.

Esta prueba se realizó a los dos tipos de HAC con los que hemos trabajado, previo a su aceptación, se procedió a la realización de la prueba.

Los pasos a seguir con este dispositivo son los siguientes:

- Se llena el cono con el HAC.
- Iniciación del programa introduciendo la información requerida.
- Iniciar la grabación del video y se procede al levantamiento del cono.
- Se detiene la grabación y se archiva la información.
- Introducimos el valor de la densidad del hormigón en estado fresco y el programa calcula y proporciona los siguientes datos:  $T_{500}$ ,  $\phi_f$ , una relación de avance del hormigón con respecto al tiempo, la  $\mu$  y  $\tau$ .



Figura 26. Reómetro.

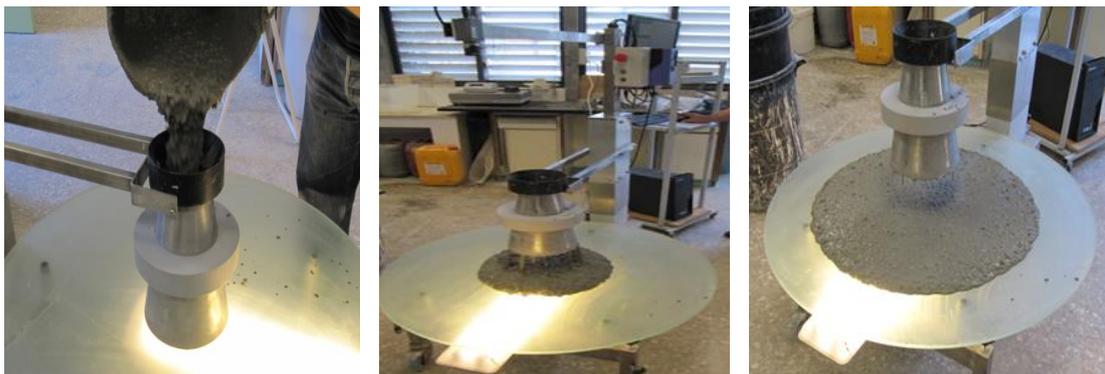


Figura 27. Procedimiento de aplicación para determinar la reología del HAC.

- **Ensayo aire ocluido. UNE EN 12350-7**

Ensayo realizado según UNE EN 12350-7, se realizó para los cuatro tipos de hormigones. La elaboración de este ensayo es un proceso que según las indicaciones,

se debe tener precaución a la hora de realizarlo y cumplir con los requisitos tal como especifica la norma.



Figura 28. *Ensayo del aire ocluido.*

- **Ensayo del tiempo de fraguado del hormigón. ASTM C403.**

Realización de dos muestras para ambos tipo de hormigón en este caso el HAC 3425 y HAC 20HE, para evaluar su comportamiento ante la penetración de aguja durante un periodo de tiempo requerido, logrando determinar el tiempo inicial y final de fraguado de este hormigón, tomando en cuenta las condiciones de lugar especificadas en la norma.



Figura 29. *Aparato de carga, agujas y varillas. Muestras de la prueba de tiempo de fraguado del hormigón.*

### **Ensayos Mecánicos.**

En este apartado se explicara con detalles los respectivos ensayos de rotura de compresión y módulo de deformación, y los instrumentos utilizados.

- **Ensayo a compresión y módulo de deformación.**

Estos ensayos abalados por la norma UNE EN 12390-3 (compresión) y ASTM C469-14 (módulo de deformación), son realizados con unos equipos especiales que se adaptan a las sollicitaciones de nuestros ensayos.

Para la ejecución de los ensayos, la prensa utilizada es de la casa comercial Ibertest de MEH 1500 kN. La gestión del ensayo se realiza a través del programa Wintest 32 integrado en el equipo, lo que permite un control mecánico del ensayo, así como escoger la norma de ensayo a aplicar, fijar el tipo y las dimensiones de las probetas y la velocidad de ensayo dentro del rango establecido en la norma. Con objeto de que la velocidad del ensayo no influyera sobre el resultado y dado que la resistencia a las primeras edades de ensayo se prevé ser muy baja, se ha adoptado una velocidad 0.4 MPa/s para evitar una entrada en carga demasiado rápida.

El refrentado de las probetas a edades tempranas se realizó con azufre puesto que el método de referencia de la norma, pulido, producía el desprendimiento de los áridos. El método utilizado para tomar como referencia la resistencia del hormigón para el módulo de deformación, fue la realización de 2 roturas a compresión, para luego utilizar la media de los resultados obtenido y realizar el módulo mediante ciclos de carga y descarga, y así sucesivamente para los demás casos. En la Tabla 8, podrá apreciar el detalle de cada ensayo por las respectivas horas ensayadas.

Tabla 8. *Detalles de amasadas para Compresión / Modulo de Deformación (150mm\*300mm).*

Detalle de amasadas *horas de ensayo (Compresión/Modulo de deformación)											
Tipo de Hormigón	D <sub>máx</sub>	a/c	Amasadas	Edad							Cant. Prob
				8h	10h	12h	24h	48h	7d	28d	
HAC 20HE	12,5	0,65	amasada 1	4	-	-	4	2	-	-	10
			amasada 2	-	4	3	-	2	-	-	9
			amasada 1	4	-	4	-	2	-	-	10
			amasada 2	-	4	-	4	2	-	-	10
			amasada 1	-	4	4	4	-	-	-	12
			amasada 2	-	-	-	-	4	4	4	12
HCV 20HE			amasada 1	3	4	4	-	-	-	-	11
			amasada 2	-	-	-	4	4	-	4	12
			amasada 1	-	4	4	-	-	-	-	8
			amasada 2	-	-	-	2	-	2	2	6
HAC 3425			amasada 1	4	4	3	-	-	-	-	11
			amasada 2	-	-	-	4	4	-	4	12
	amasada 1	-	4	4	4	-	-	-	12		
	amasada 2	-	-	-	-	-	4	4	8		
HCV 3425	amasada 1	4	4	4	-	-	-	-	12		
	amasada 2	-	-	-	4	4	-	4	12		
	amasada 1	-	4	4	4	-	-	-	12		
	amasada 2	-	-	-	-	-	4	4	8		
<b>Total</b>				<b>19</b>	<b>36</b>	<b>34</b>	<b>34</b>	<b>24</b>	<b>14</b>	<b>26</b>	<b>187</b>
<b>Total de m<sup>3</sup> utilizados</b>										<b>0.99</b>	



Figura 30. Ensayo a compresión y módulo de deformación.

- **Ensayo a tracción indirecta.**

Guiándonos de la norma UNE EN 12390-6, determinamos la resistencia a tracción indirecta, por el método brasileño.

Antes de realizar el ensayo se debe hacer una inspección de la probeta y librarla de cualquier elemento que pueda hacer contacto con la banda de apoyo. Se coloca dicha probeta de manera centrada y con mucho cuidado para evitar irregularidades en el ensayo.

El equipo utilizado es el Ibertest de 1500 kN, la velocidad de carga que se introduce en el equipo fue de 2.8 kN/s, según la norma citada.

En la tabla siguiente se puede apreciar el detalle de ensayos por hora ensayada.

Tabla 9. Detalles de amasadas para Tracción Indirecta (150mm\*300mm)

Detalle de amasadas por edad de ensayo (Tracción Indirecta)											
Tipo de Hormigón	D <sub>máx</sub>	a/c	Amasadas	Edad							Cant. Prob
				8h	10h	12h	24h	48h	7d	28d	
HAC 20HE	12,5	0,65	amasada 1	3	2	2	2	2	-	-	11
			amasada 2	-	2	2	1	2	2	2	11
HCV 20HE			amasada 1	2	2	2	2	2	-	-	10
			amasada 2	-	-	-	-	-	2	4	6
HAC 3425			amasada 1	2	2	2	2	2	-	2	12
HCV 3425			amasada 1	2	2	2	1	2	-	2	11
			amasada 2	2	2	1	2	-	-	2	9
<b>Total</b>				<b>11</b>	<b>12</b>	<b>11</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>4</b>	<b>12</b>	<b>70</b>
										<b>Total de m<sup>3</sup> utilizados</b>	<b>0,371</b>



Figura 31. *Ensayo tracción indirecta.*

### **Ensayo de retracción del hormigón.**

Para la realización de este ensayo se realizaron 8 probetas prismáticas, por diseño de hormigón de las cuales 2 eran utilizadas para la evaluación de retracción autógena a edades tempranas y las restantes para la retracción por secado.

Las probetas para la retracción autógena se fabricaban siguiendo el siguiente proceso, estas antes de la colocación del hormigón se montaba el molde con una lámina de poliestireno (cartón pluma) en la parte inferior y una lámina de polietileno que recubre a esta y al resto de paredes del molde, esta lámina permite recubrir la superficie libre de la muestra, de forma que quede sellada y conservar la humedad durante todo el ensayo. El desmolde de las probetas se realiza entre 6 - 8 horas una vez finalizado el fraguado.

A continuación, se procedía a colocarlas en un cuarto con la temperatura controlada, alejada de cualquier movimiento brusco que causara vibraciones y en la misma posición de fabricación, incluyendo la lámina de poliéster, con objeto de minimizar la coacción de la mesa de apoyo.

En sus extremos correspondientes se le colocaron dos transductores de desplazamiento, los cuales transmitían la información a un amplificador, que a su vez estaba conectado a un aparato de medición que registraba cada 10 minutos, el LOGGR GL220 de la marca GRAPHTEC. Ver Figura 31. El tiempo del ensayo era aproximadamente de 48 horas, de acuerdo con las recomendaciones del Comité Técnico de retracción autógena del hormigón, del Instituto de Concreto Japón.



Figura 32. Ensayo de retracción autógena a edad temprana, con GL220.

Las restantes probetas se mantenían en una cámara de curado durante 48 horas y se desmoldaban a continuación. De estas 6 probetas, 2 de estas eran introducidas a una cámara climática (modelo CTS), con un 50% de humedad y 20 °C, para evaluar la pérdida de peso de cada muestra, colocándolas de manera vertical y utilizando una balanza de precisión cada día para determinar su peso.

Con las dos probetas del ensayo de retracción autógena y las otras cuatro se procedía a realizar el ensayo de retracción por secado.

Una de las probetas de retracción autógena se mantiene sellada y la otra se desprendía la lámina de polietileno, para poder medir la retracción en ambos estados y comprobar la influencia del proceso de secado.

Con las restantes probetas, una se procedía a sellarla con una retracción de polietileno y las otras tres se mantenían sin sellar.

Las probetas se colocaban de manera vertical y se le ajustaba unos relojes comparadores en la parte superior, la introducimos en la cámara climática (modelo Dycometal CCK 480), en el proceso experimental se mantenía a una temperatura y humedad constante de 20 °C y 50%.

Para tomar las medidas diarias de los comparadores no era necesario abrir la cámara, se utilizaba una cámara de video que facilitara la lectura.

Nota: debido a las limitaciones de tiempo del trabajo el período máximo de ensayo fue de 30 hasta 40 días.



Figura 33. Pesado de probetas, cámara humedad, probetas con relojes compradores.

Tabla 10. Detalle de probetas por diseño para ensayo de Retracción (100mm\*100mm\*400mm)

Tipo de Hormigón	Dmax.	Relación a/c	Amasadas	Cantidad Probetas
HAC 20HE	12,5	0,65	amasada 1	8
HCV 20HE			amasada 1	8
HAC 3425			amasada 1	8
HCV 3425			amasada 1	8
			Total	32
			Total m3	<b>0,128</b>

### 3.3.4 Equipos de laboratorio.

Equipos utilizados en el transcurso del proyecto.

- **Amasadora de hormigón.**



Figura 34. Amasadora planetaria de eje vertical.

- **Cámara de curado y la cámara húmeda para ensayos de retracción por secado.**



Figura 35. Cámara de curado, cámara húmeda, CTS utilizada para retracción por secado.

- **Dispositivos de ensayos mecánicos y máquina para el refrentado de probetas.**



Figura 36. Prensa Ibertest modelo MEH 1500. Y máquina de refrentado Ibertest

## 4- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el siguiente capítulo observaremos los resultados obtenidos de acuerdo a los diferentes ensayos propuestos, para evaluar las propiedades mecánicas a edades tempranas de los dos tipos de hormigones planteados en los capítulos anteriores. De igual manera se dispondrán de los datos de las diferentes propiedades del hormigón en estado fresco, y las propiedades reológicas de cada HAC.

### 4.1 Caracterización de los ensayos del hormigón en estado fresco

#### 4.1.1 Resultados ensayos del hormigón en estado fresco

En la Tabla 11 y Tabla 12 se puede observar la media de los resultados obtenidos de los distintos ensayos para evaluar las propiedades reológicas del hormigón.

Tabla 11. Resultados ensayos del hormigón en estado fresco.

Ensayos		HAC 20HE	HCV 20HE	HAC 3425	HCV 3425
Escurecimiento	Manual (mm)	700	-	700	-
	Reómetro(mm)	769	-	700	-
	T <sub>50</sub> (seg.)	3	-	4	-
Embudo en V	T <sub>v</sub> (seg.)	16	-	17	-
Escurecimiento con anillo japonés	T <sub>J50</sub>	3,2	-	4	-
	dJf (mm)	660	-	690	-
Asiento	(cm)	-	9	-	10
% Aire ocluido	%	1,7	2,6	2,8	2,8
Resistencia media a 28 días	(MPa)	48,95	39,40	41,59	36,33
CV del hormigón	%	1.66	2.85	6.22	7.29

A cada resistencia media se determinó un coeficiente de variación (CV) respecto a la resistencia media a compresión de acuerdo a la cantidad de muestras ensayadas. Donde se observa que los porcentajes obtenidos están por debajo del 8%.

Tabla 12. Datos dispuestos por el reómetro

	Viscosidad $\mu$ (Pa*s)	T. Corte $\tau$ (Pa)	$\emptyset$ Escurecimiento. (mm)	T <sub>50</sub> (seg.)
HAC 20HE	9,5	11	769	3
HAC 3425	14,7	17	700	5,4

De los datos obtenidos en las tablas anteriores, comprobamos que los resultados por cada hormigón autocompactante están dentro de lo previsto por las especificaciones

técnicas. Según los parámetros obtenidos por el reómetro, estos entran en el rango de buen acabado superficial, evitando el riesgo de segregación, como se puede ver los puntos rojos en la Figura 37. El D.T. Institute (2010) delimito como zona de buena trabajabilidad a los HAC con viscosidades por debajo de 45 Pa\*s, no limitando la tensión de corte.

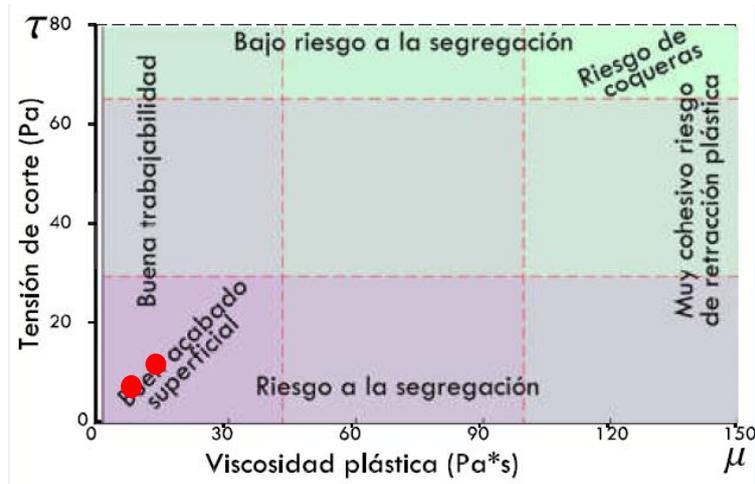


Figura 37. Comportamiento del HAC. D.T. Institute (2010) (Benito, F. (2014)

## 4.2 Resultados del tiempo de fraguado del hormigón

Para la determinación de este ensayo se propuso realizar la prueba con el hormigón autocompactante para el aditivo 3425 y el 20HE.

Determinado el ensayo de penetración para fijar los valores de resistencias en diferentes periodos de tiempo, se procede a graficar los datos, los cuales se someten a un análisis de regresión lineal entre las variables existentes para ajustar los tiempos precisos de principio y final del fraguado del hormigón. Véase en Tabla 13.

Tabla 13. Datos finales del principio y final de fraguado

	Principio y final de fraguado del HAC		
	Resistencia a la Penetración (MPa)	Tiempo Trascurrido (min.)	
		HAC 20HE	HAC 3425
<b>Inicio</b>	3,5	209	264
<b>Final</b>	27,6	322	353

En la Figura 38 mostraremos el proceso de fraguado respecto al tiempo y los datos finales del inicio y final del fraguado.

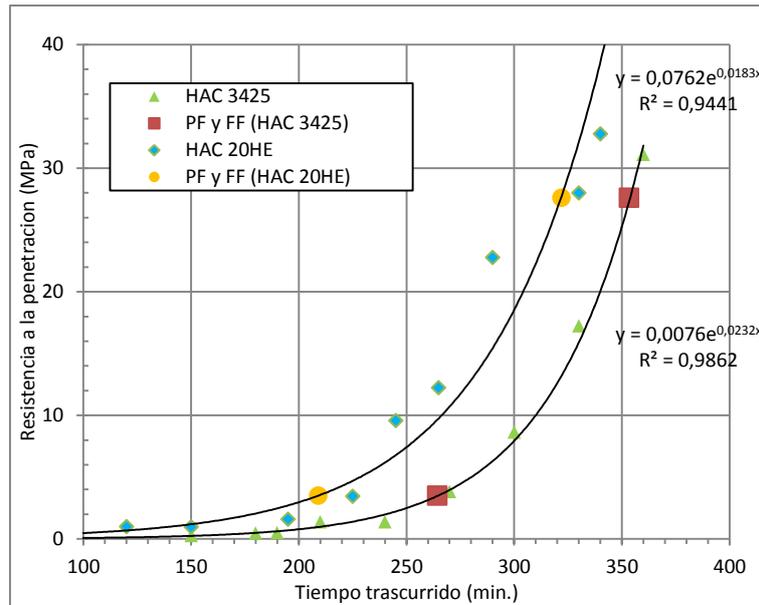


Figura 38. Gráfica obtenida para el tiempo y final de fraguado del hormigón.

Se muestra cómo se comporta el proceso del ensayo, hasta que sobrepasa la resistencia final estipulada por la norma. Además se plantea dónde inicia el principio y final del fraguado de cada hormigón, determinado por un análisis de regresión lineal los tiempos específicos donde se produce dicho acontecimientos, sosteniendo que los resultados alcanzados entran dentro de lo estipulado por las especificaciones técnicas.

### 4.3 Resultados de ensayos mecánicos

Se planteara la media de los datos obtenidos, tanto para resistencia a compresión, módulo de deformación y tracción indirecta, en base a los 4 diseños de hormigón ensayados. Véase en las tablas siguientes.

Tabla 14. Media y relación de evolución de los datos obtenidos en los ensayos de rotura a compresión

Edades	HAC 20HE		HCV 20HE		HAC 3425		HCV 20HE	
	Media fc (t)	Evolución						
8h	8,27	0,17	7,53	0,19	3,61	0,09	3,69	0,10
10h	11,70	0,24	9,20	0,23	6,36	0,15	5,03	0,14
12h	14,75	0,30	12,16	0,31	9,44	0,23	6,51	0,18
24h	27,98	0,57	21,26	0,54	20,96	0,50	18,28	0,50
48h	35,28	0,72	28,19	0,71	28,08	0,68	25,40	0,70
7d	43,52	0,89	33,85	0,86	39,49	0,95	28,67	0,79
28d	48,95	1,00	39,51	1,00	41,59	1,00	36,33	1,00

fc (t): resistencia experimental respecto al tiempo (MPa)

Tabla 15. Media de datos obtenidos por resistencia a tracción indirecta y relación según su evolución.

Edades	HAC 20HE		HCV 20HE		HAC 3425		HCV 3425	
	Media fctm	Evolución						
8h	1,28	0,35	0,75	0,27	0,83	0,23	0,50	0,21
10h	1,51	0,42	1,13	0,41	1,17	0,33	0,65	0,28
12h	1,75	0,48	1,48	0,54	1,47	0,41	0,98	0,41
24h	2,41	0,67	2,07	0,76	1,90	0,53	1,81	0,77
48h	2,97	0,82	2,77	1,01	2,79	0,78	2,03	0,86
7d	4,00	1,11	2,59	0,95	-	-	-	-
28d	3,61	1,00	2,73	1,00	3,58	1,00	2,36	1,00

fctm (t): Resistencia a tracción media respecto al tiempo

Tabla 16. Media de resultados a compresión y módulo de deformación.

Edades	HAC 20HE		HCV 20HE		HAC 3425		HCV 20HE	
	fc (t)	E (t)						
8h	8,82	17,42	7,93	14,04	3,75	9,62	3,97	9,63
10h	12,20	19,04	8,39	16,05	6,71	12,67	5,16	11,60
12h	15,19	19,95	10,71	17,41	9,49	15,62	6,51	13,28
24h	28,24	25,53	20,61	23,67	21,19	21,15	17,99	21,38
48h	36,09	28,06	28,42	25,82	28,34	23,86	25,22	25,39
7d	43,65	30,57	33,55	30,47	39,34	29,84	28,97	28,50
28d	49,29	32,29	40,04	31,38	40,64	30,21	36,33	29,59

fc: resistencia experimental respecto al tiempo (MPa)

E (t): módulo de deformación (GPa)

#### 4.3.1 Resultados de ensayos de rotura a compresión

En las Figura 39 y Figura 40 se representa la evolución de la resistencia a compresión a edades tempranas y de referencia a 28 días. Se realizara una ampliación más clara de las edades menores de 48 horas, para tener una mejor percepción de la evolución.

Estos datos se comparan con las respectivas relación de las resistencias medias a compresión en base al tiempo  $f_{cm}(t)$ , entre la resistencia media a compresión  $f_{cm}$ , de las diferentes normas antes planteadas en el capítulo 2, (EHE-08, EC-2, MC-10 y ACI 209.2R).

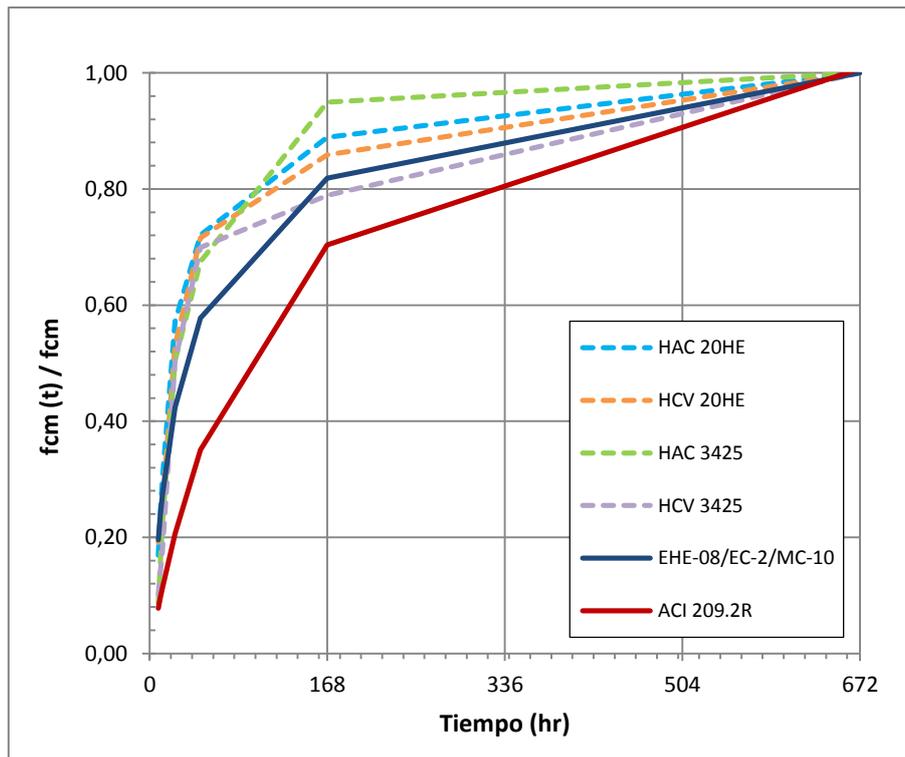


Figura 39. Evolución resistencia proyectada a los 28 días

En esta figura se observa la evolución de los diferentes tipos de diseños de acuerdo las normas citadas. Cabe destacar que la aplicación de los cálculos de las instrucciones a utilizar, se planteó un ( $f_{ck}$ ) de 40 MPa, para los valores teóricos.

De acuerdo con los resultados experimentales alcanzados el coeficiente de endurecimiento del cemento considerado en la EHE-08 es conservador, esta circunstancia se aprecia claramente a edades superiores de 24 horas, tomando en cuenta que los datos de los resultados obtenidos siguen el rango que proyecta las diferentes instrucciones, sin alejarse bastante de lo estipulado.

Unas de las diferencias entre el HAC y HCV, se puede apreciar que el HAC crece más rápido que el HCV debido a una evolución constante a partir de los primeros 7 días.

Aunque tengamos una visión del desarrollo de la evolución hasta 28 días, es necesario evaluar la evolución a tiempos cortos y así tener una perspectiva general de la evolución de resistencias. Ver Figura 40.

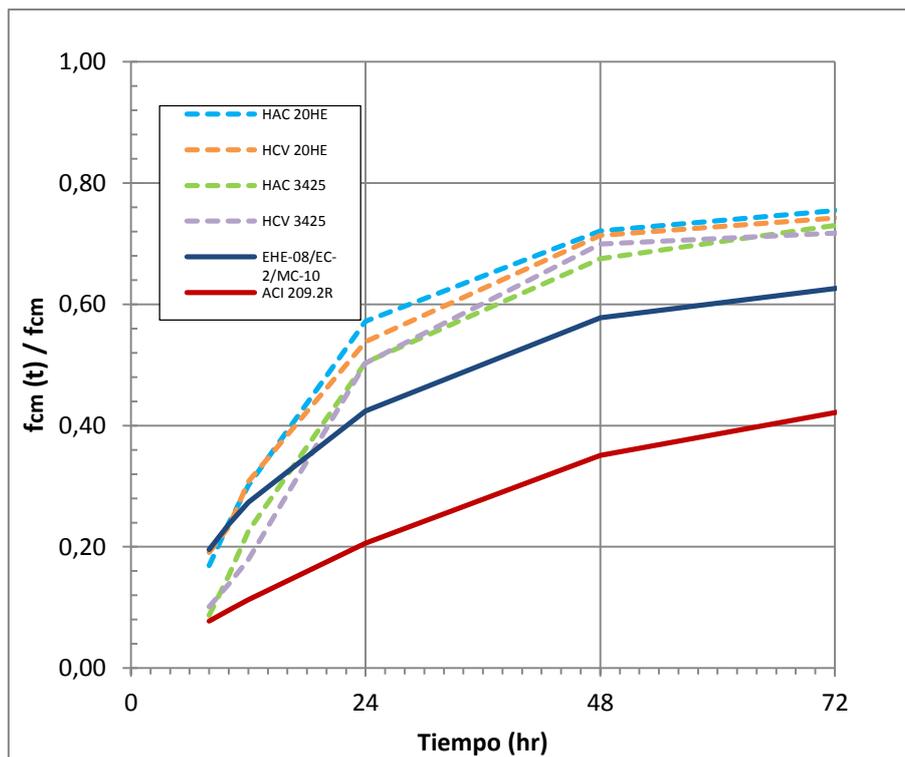


Figura 40. Evolución de resistencia a edades iniciales

Destacando lo ilustrado en la figura anterior podemos ver que existen diferencias de adquisición de resistencia a muy corto plazo a edades de 8,10 y 12 horas, entre los hormigones realizados con aditivo 20HE y 3425. Se puede observar que a edades de 24 horas existen pocas diferencias entre los tipos de hormigones realizados, aunque el HAC 20HE crece un poco más que los demás, en cambio entre edades de 48 y 72 horas no existen diferencias significativas entre diseños.

Se puede apreciar que el inicio del crecimiento de los respectivos hormigones se produce entre 12 a 20 horas relativamente, superando la tendencia estipulada por la norma, no obstante a edades menores de 12 horas se visualiza como las normativas subestiman la evolución de resistencia a edades cortas, a excepción del HCV 20HE que se ajusta al punto de tendencia planteado por la EHE-08, en cambio el ACI 209.2R es conservadora en cuanto a la evolución a muy corto y largo plazo.

Cuando se observa las velocidad de adquisición de resistencia que adquieren los valores experimentales, es debido por el tipo de cemento utilizado, en este caso el CEM I 52.5R es el de máxima categoría respecto a los estándares citados por la RC-08. Los tipos de cementos utilizados en Europa son cementos más rápidos en adquisición de resistencia. Es importante comprender que el tipo de cemento CEM I utilizado por EHE-08 y el cemento empleado en la ACI son diferentes.

Un detalle importante respecto a la aplicación del coeficiente a edad temprana aplicadas por las instrucciones, es la tendencia de inicio de resistencia del hormigón a edades tempranas, donde a causa de la proyección y la pendiente que destaca el trayecto las instrucciones, se nota que estas tienden a iniciar desde cero, sin embargo los datos experimentales figuran tener una tendencia diferente, a iniciar en un punto de

partida mayor que cero respecto al tiempo, relacionando esto con el principio y final de fraguado del hormigón.

En la Figura 41, se muestra una visión más detallada de la evolución de resistencia respecto al tiempo y en comparación con la normativa.

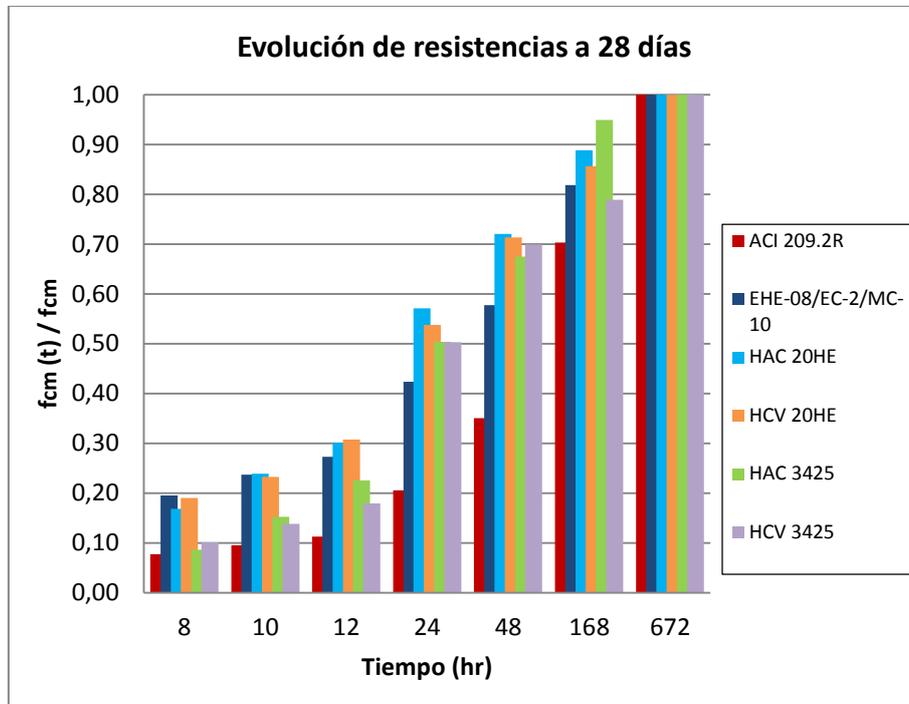


Figura 41. Histograma de la evolución de resistencia a compresión

En la Figura 43 y Figura 43 se mostrara la evolución de resistencia de los 4 tipos de hormigones en base a su propia resistencia a 28 días, ajustándolos al valor teórico, logrando así, presenciar su crecimiento en cuanto a lo que propone la norma de acuerdo a los resultados experimentales alcanzados y comparando la evolución.

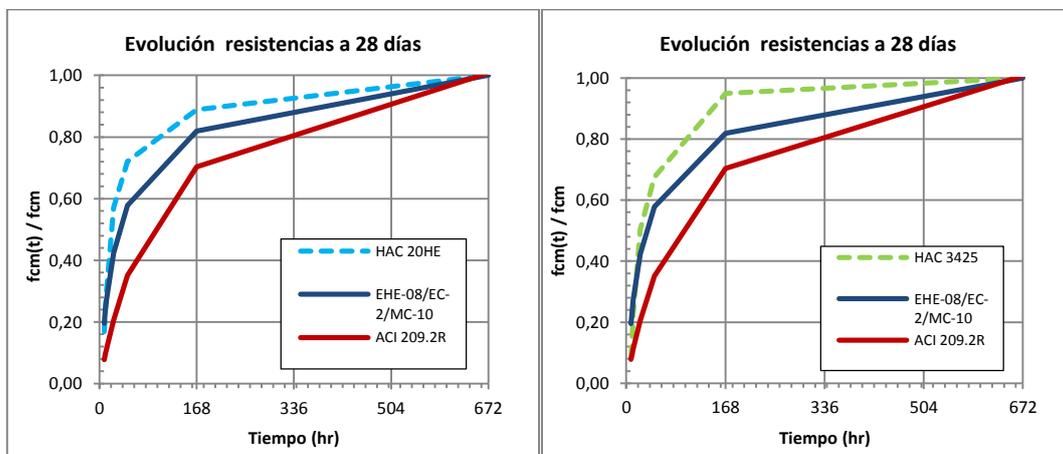


Figura 42. Evolución de resistencia de los diseños (HAC 20HE y HAC 3425) realizados respecto a la resistencia experimental obtenida.

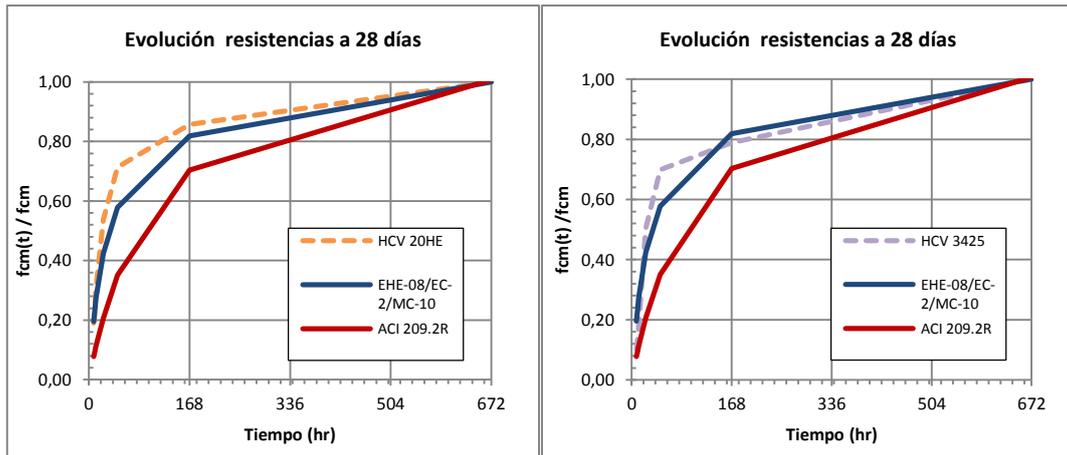


Figura 43. Evolución de resistencia de los diseños (HCV 20HE y HCV 3425) realizados respecto a la resistencia experimental obtenida.

Como se indicó en la Figura 39, los resultados obtenidos en esta figura, son similares, notándose el crecimiento de los datos experimentales desde edades tempranas hasta la edad de referencia, manteniendo el rango y la secuencia prevista por la norma a pesar de que esta se adecua a la realidad excepto a edades menores de 24 horas.

De acuerdo con los dos tipos de hormigones realizados se puede apreciar que el HAC posee una tendencia superior respecto al HCV, sin importar el tipo de aditivo utilizado.

En la Figura 44 y Figura 45, se distingue con más detalle la evolución del hormigón a edades menores a 72 horas.

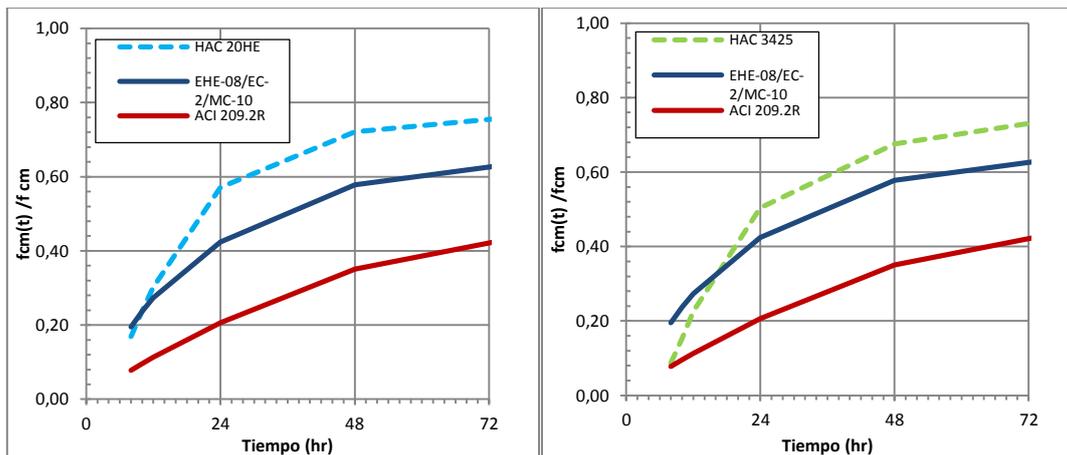


Figura 44. Evolución de los HAC 20HE y HAC 3425 a edades menores de 72 horas.

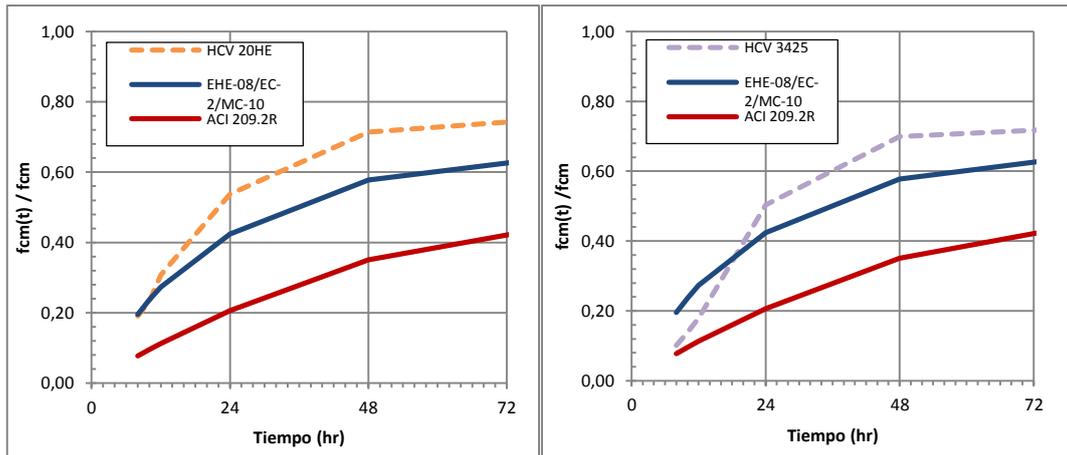


Figura 45. Evolución de los HCV 20HE y HCV 3425 a edades menores de 72 horas.

Los hormigones realizados con el aditivo 20HE tienden a ajustarse más a la línea prevista por la EHE-08, a edades menores de 10 horas, en cambio la pareja realizada con el aditivo 3425 entra dentro del rango cubierto por el ACI y la EHE-08, figurándose el mismo caso donde se subestima su evolución a tiempos cortos.

Sin duda alguna se debe representar cómo se comporta cada diseño de hormigón en base a su respectiva resistencia en función al tiempo, tanto para edades de 28 días y menores de 48 horas.

La Figura 46 indica que utilizando y comparando los dos tipos de aditivos en función a un HAC y HCV, se determina la misma tendencia estipulada en las discusiones anteriores, donde el HAC presenta resistencias más óptimas en comparación con el hormigón convencional.

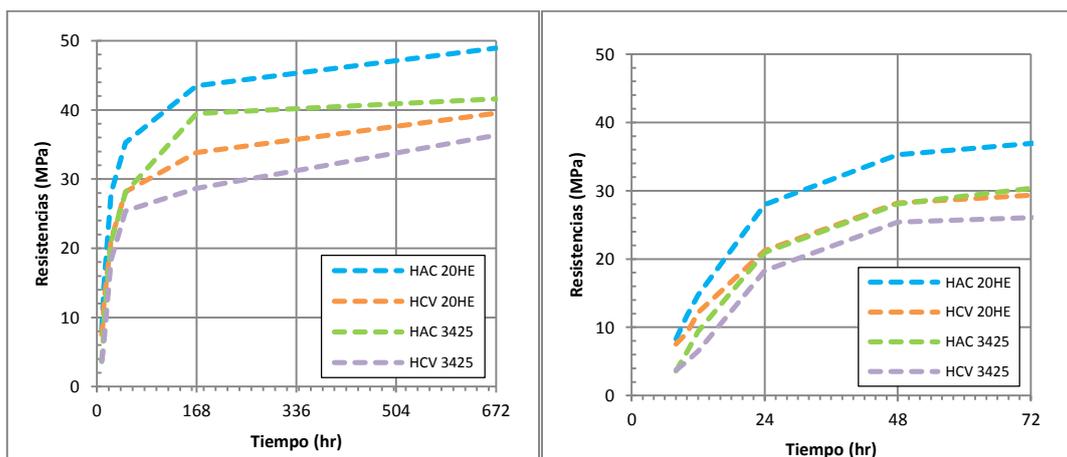


Figura 46. Resistencia del hormigón en función al tiempo

### 4.3.2 Resistencia a tracción indirecta.

A pesar de las dispersiones que surgen en este ensayo, se puede evaluar los diferentes tipos de diseños utilizados, para así comparar la evolución de los datos pertinentes con la EHE-08. Figura 47.

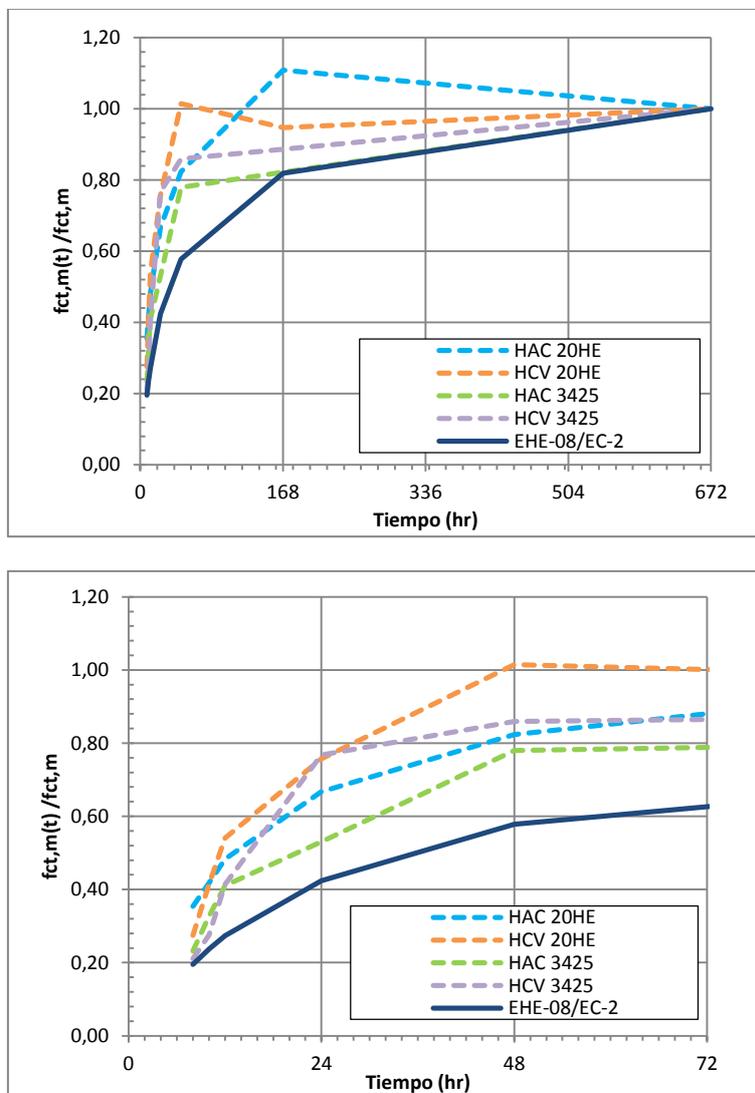


Figura 47. Evolución de resistencias a tracción indirecta

Se puede captar que la evolución de los datos experimentales se extiende por encima de la EHE-08. Este comportamiento prevalece desde edades iniciales hasta la edad de referencia como se muestra en la Figura 47. De igual manera podemos determinar que los hormigones realizados con el aditivo 20HE adquieren una evolución más progresiva que los realizados con el 3425 a partir de 7 días. No obstante a edades menores de 48 horas la adquisición de evolución es más rápida en los HCV.

En la Figura 48 se podrá observar la relación que existen entre la tracción en función a la compresión, comparando estos datos con la EHE-08.

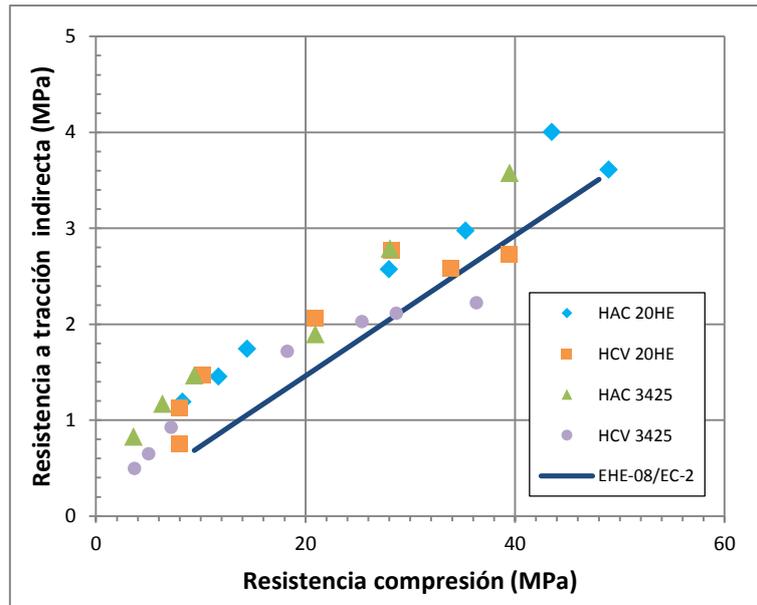


Figura 48. Resistencia a tracción indirecta en función a la resistencia a compresión

La recta representada por la EHE-08 y el EC-2, parecería subestimar la resistencia a tracción, a pesar de ciertas dispersiones existentes, se evalúa que el rango previsto no es muy amplio. Desde otro punto de vista, la tendencia de los datos experimentales tiende a tener sentido, garantizando la relación que existe entre la compresión y tracción en el hormigón.

Para observar la relación resistencia a tracción - compresión se plantea una tendencia que tiene como objetivo ver el comportamiento de la edad respecto a estas dos variables. Figura 49.

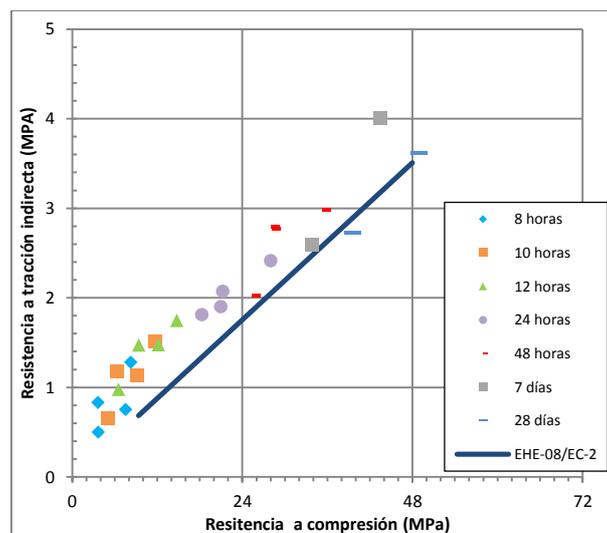


Figura 49. Relación resistencia tracción - compresión respecto a la edad vs EHE-08

En esta figura se puede distinguir los datos que corresponden a cada edad por tipo de diseño, así se identifica la relación de los valores obtenidos por las respectivas resistencias en las diferentes horas de ejecución. Se establece como las edades se entrelazan entre sí, a medida que aumenta la resistencia, además se comprueba la relación que existe entre la compresión y la tracción en el hormigón.

Aun así es de interés contemplar si los diferentes tipos de diseños siguen correctamente el recorrido planteado por los datos teóricos de la EHE-08, por tal razón se evalúa cada HAC de manera individual y cada HCV de igual manera. Figura 50.

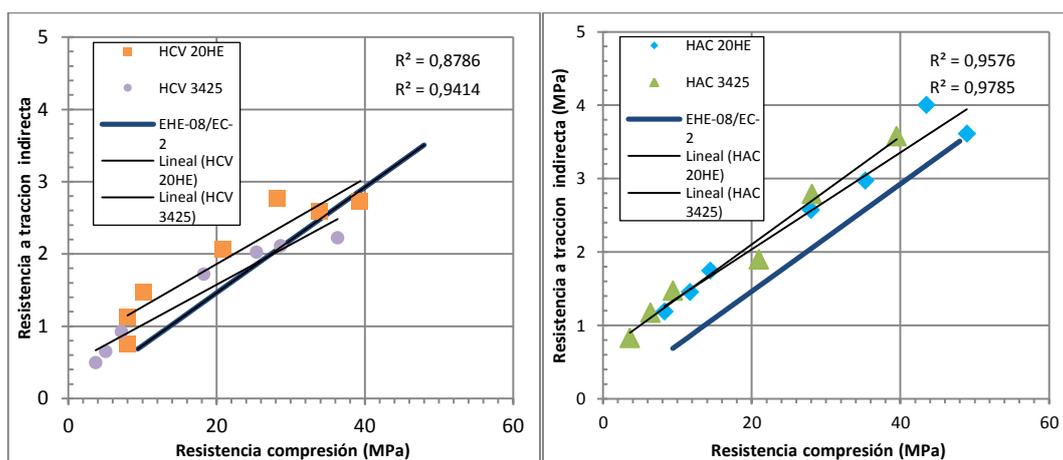


Figura 50. Tendencia por cada tipo de hormigón respecto a la EHE-08

Podemos presenciar que los diseños de HAC, poseen relativamente la misma pendiente que la indicada por la instrucción, algo que no se aprecia en el HCV que tiende a disminuir. Esto nos permite ver nuevamente que el valor teórico determinado por la norma subestima la resistencia a tracción.

Para analizar y comparar el HAC con HCV se dispone a presentar en la Figura 51, la misma imagen anterior pero con cada hormigón y su respectivo aditivo.

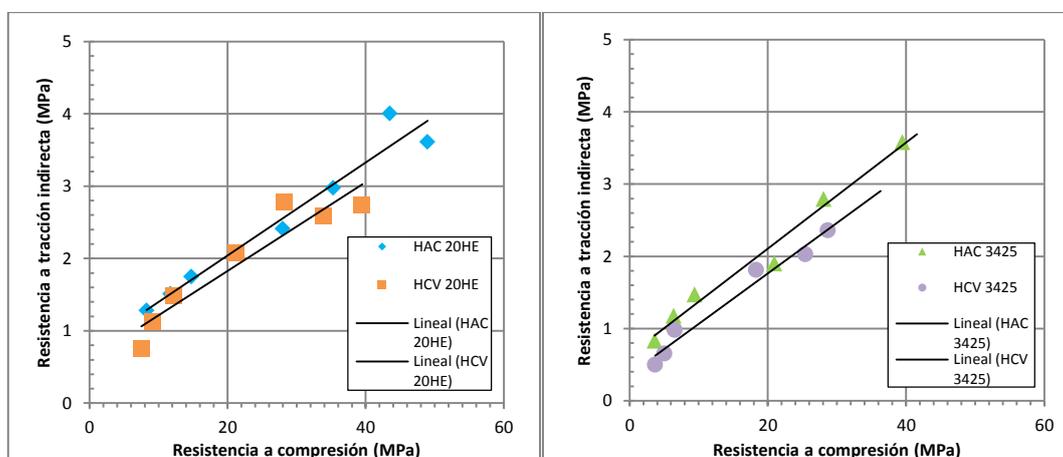


Figura 51. Comparación de cada tipo de aditivo de acuerdo a la relación tracción-compresión

Diseñados estos hormigones con aditivos distintos se puede valorar que entre la relación de la resistencia tracción indirecta en función a la compresión, el hormigón autocompactante difiere del convencional de manera progresiva respecto a aumento de resistencias, logrando tener una proyección superior que el HCV, de igual manera se observa una pendiente semejante entre tendencias, comprobando esto la normalidad de los datos.

### 4.3.3 Módulo de deformación

Se dispone a evaluar el módulo de deformación en función a la resistencia a compresión obtenida en los datos experimentales, comparando estas con los datos teóricos de las respectivas normas, los cuales se adquieren mediante las formulas citadas en el capítulo 2.

Se aprecia que hay cierta relación entre el módulo de deformación con la resistencia a compresión, los cuales no están en función al tiempo, notándose que existe una relación bastante coherente entre los datos experimentales y los teóricos. Figura 52.

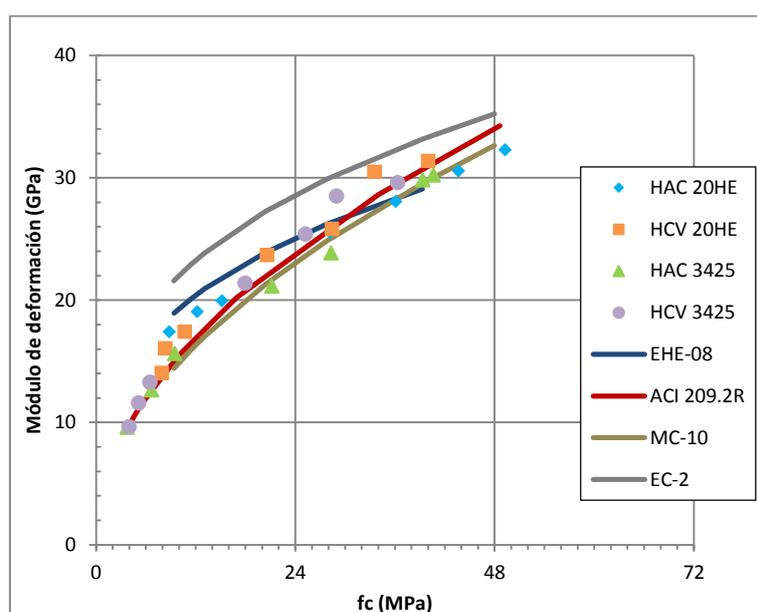


Figura 52. Módulo de deformación en función a la resistencia a compresión

Para evaluar como difieren los resultados de las normas, se ha dividido la Figura 52 en dos partes, en una se cita la EHE-08 y el EC-02, en la otro se toma el ACI 209.2R y el código modelo del 2010 como referencia, y así se contempla con más claridad el comportamiento y la tendencia que siguen los datos respecto a las normas indicadas. De igual manera se podrá observar la tendencia por cada edad de ensayo.

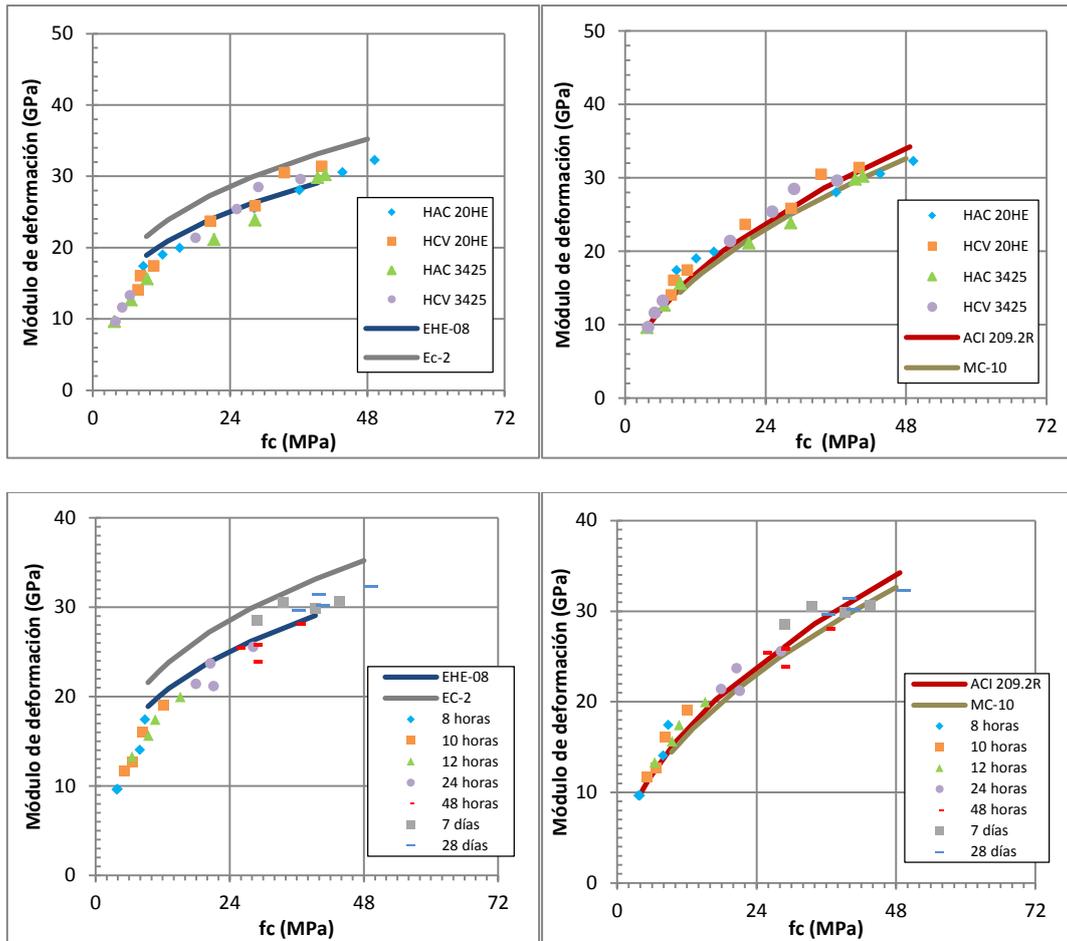


Figura 53. Detalle de la relación módulo-deformación respecto a las normas y tendencia por cada edad de ensayo

Se puede observar que el eurocódigo es muy optimista, además entre edades de 24 a 48 horas los datos tienden a ajustarse a la tendencia prevista por la EHE-08, en otro aspecto a edades de 8 y 10 horas estos son subestimados por dichas normas. En cambio el mejor ajuste es propuesto por la ACI 209.2R y el MC-10, desde edades iniciales hasta edad de referencia, siendo estos más conservadores.

Según la tendencia por cada edad de ensayo, se observa que existe cierta dispersión entre horas, no obstante estos se empalman entre sí como es normal, de igual manera se puede observar que los valores de menor edad son los que están menos propensos a alcanzar la tendencia planteada por la EHE-08 y EC-2.

Se comprueba que mientras menor sea los resultados del módulo de deformación, menor es su resistencia, lográndose apreciar más esta situación a edades tempranas, esto es debido a que el hormigón aun es joven y su composición interna aún no se ha desarrollado.

## 4.4 Resultados de ensayos de retracción

La distribución de los resultados de retracción se dividirá en 2 secciones, una comprendida por los resultados obtenidos de la retracción autógena a edades tempranas menores de 48 horas y la retracción por secado a partir de las 48 horas.

Según las especificaciones técnicas sobre los aditivos, la inclusión o el uso de los aditivos (20HE, 3425), proporcionan cierta disminución en la retracción en el hormigón, de tal manera se evaluara su comportamiento, según los resultados obtenidos por cada ensayo.

### 4.4.1 Resultados de retracción autógena a edades tempranas

Comparación de la pérdida de volumen por retracción autógena a edades muy tempranas entre los dos tipos de HAC pero con aditivos distintos. Figura 54.

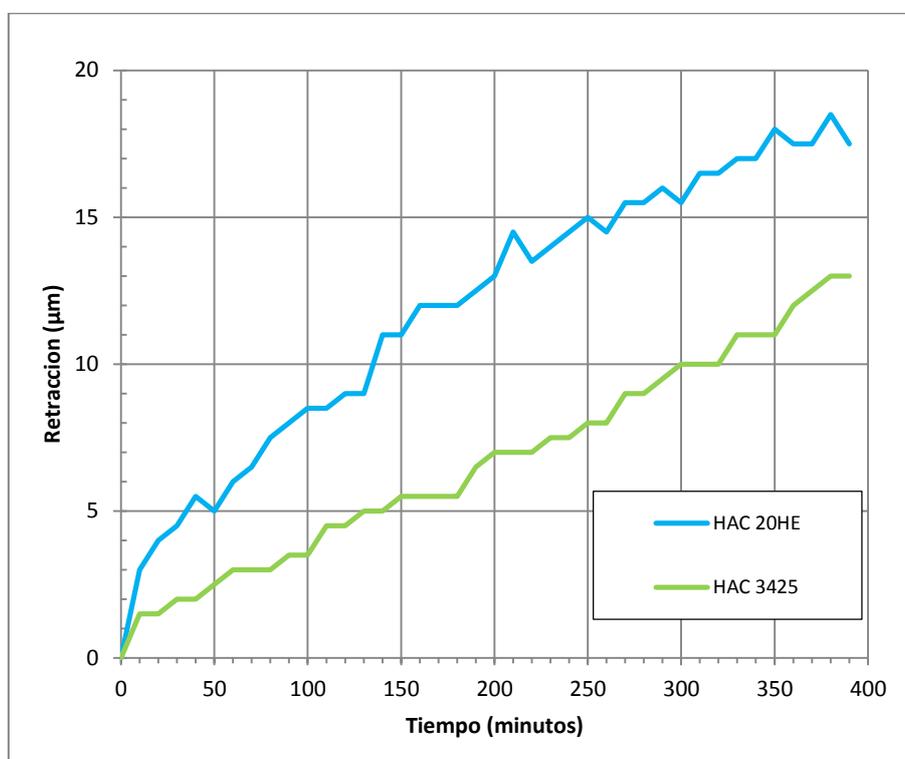


Figura 54. Comparación del HAC con aditivos distintos

Se logra apreciar que el comportamiento más estable que precede a estos hormigones está dado por el HAC 3425, el cual proporciona menor retracción que su opuesto a edades tempranas. Esto puede ser debido a que el proceso de principio y final de fraguado realizado a este hormigón con este aditivo se más lento respecto al aditivo 20HE. Además que el aditivo 20HE presente mayor retracción puede ser debido que al ser un aditivo que proporciona altas resistencias iniciales se dé la situación que el calor de hidratación se vea comprometido a corto plazo, y que la temperatura interna generada en el hormigón producto de la hidratación del cemento, genere un incremento del consumo de agua.

#### 4.4.1 Resultados de retracción por secado (por pérdida de peso)

En este ensayo 2 probetas de cada diseño se midieron constantemente por un tiempo de 25 días aproximadamente, se procedió a determinar el % acumulado de la pérdida por pesado de cada diseño de hormigón y de acuerdo a esto se obtuvo la retracción por secado. Este proceso se realizó a partir de las 48 horas previstas en el plan de trabajo, de acuerdo a los datos obtenidos se obtuvo lo figurado en la Figura 55.

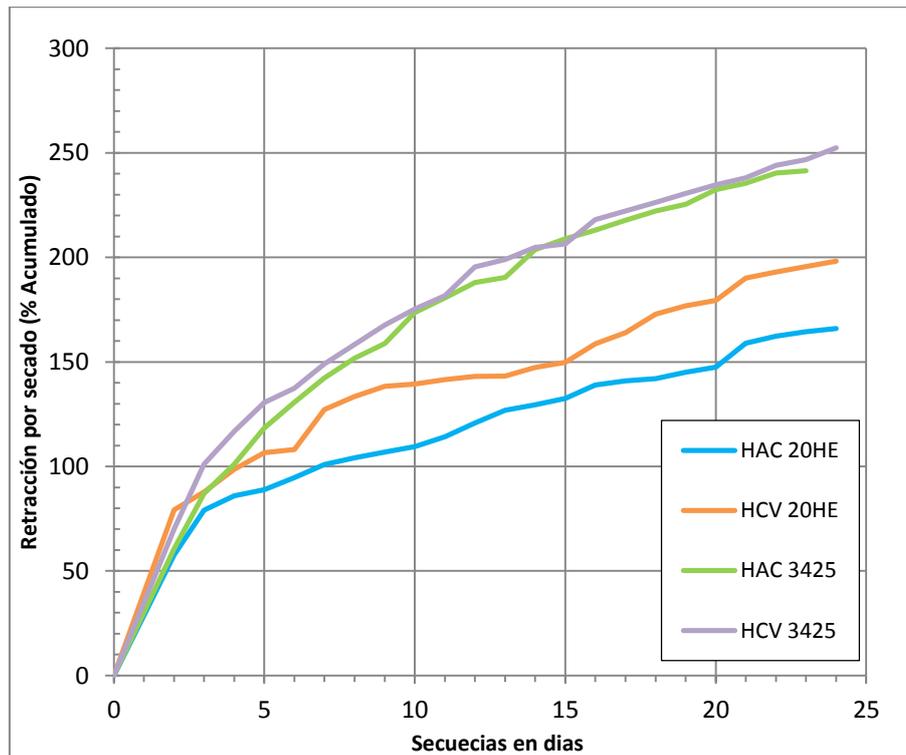


Figura 55. Determinación de retracción por secado (pérdida de peso)

La Figura 55 deja por entendido que los hormigones realizados con el aditivo 3425 sufren más contracción que los hormigones diseñados con el aditivo 20HE, por lo visto la pérdida de volumen producto de la determinación del peso de cada muestra de hormigón, es más constante en estos hormigones, debido a la utilización de dicho superplastificante. Se da el caso que los hormigones con adquisición de resistencias más rápidas a compresión son los que menor retracción presenten.

#### 4.4.2 Retracción autógena y total a partir de 48 horas

En la Figura 56 se observara la retracción total y autógena por perdida de sección para cada tipo de hormigón realizado. (CP #) no es más que el código de identificación que se le proporcione a cada muestra ensayada. Se ilustra que las probetas que poseen una menor retracción, son las probetas selladas con lamina de polietileno según el procedimiento de trabajo estas corresponden a las autógenas y la que están por encima de estas son las probetas para la retracción total (sin sellar o sin lámina de polietileno). Como se plateo en el capítulo 3, se utilizaron 4 probetas para evaluar la retracción total y 2 para evaluar la autógena, a cada ensayo tanto como autógena y la total, se determinó una media respecto a cada muestra y se determinó el  $R^2$  para la confirmar el grado de relación entre variables.

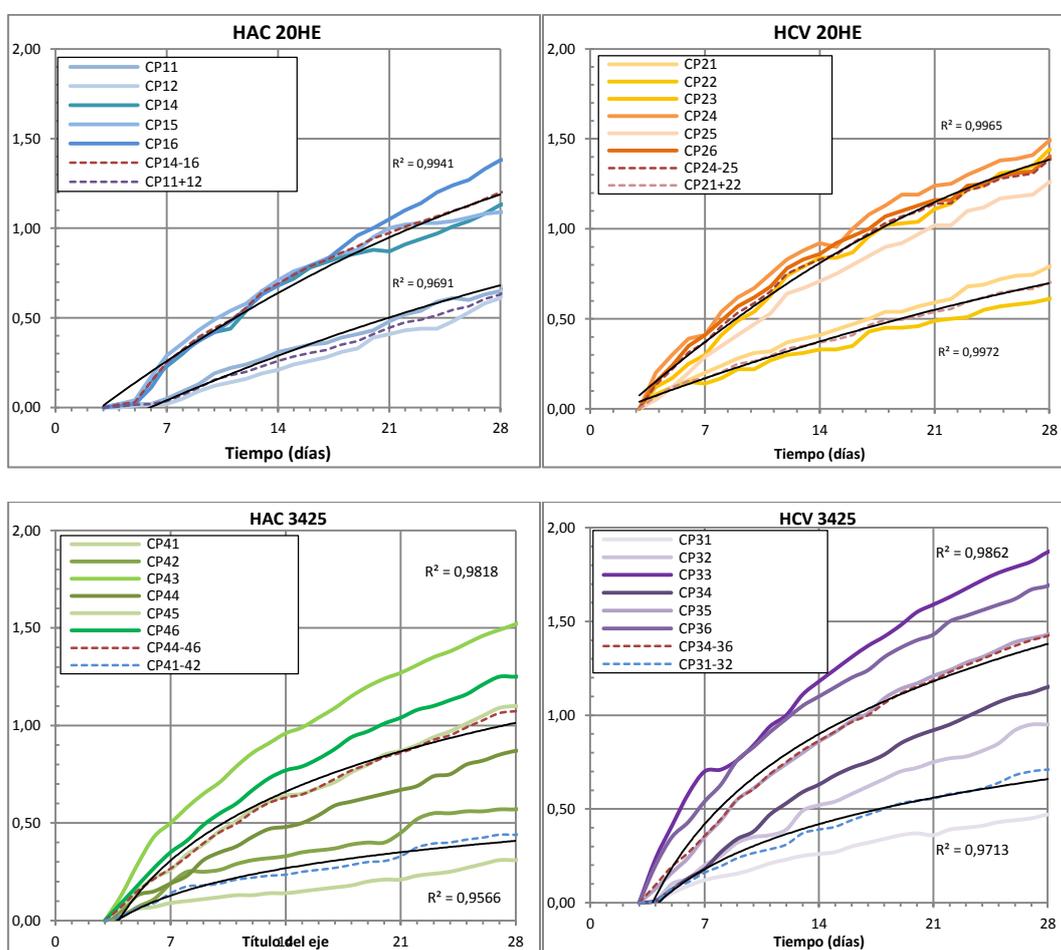


Figura 56. Retracción total-autógena de las muestras tomadas a cada diseño de hormigón

Lo primero que se puede apreciar es que en todos los casos de diseños, la retracción autógena es la que menor retracción acumula, en cambio en la retracción total es donde se presenta el mayor caso de contracción. De la misma manera puede parecer que según el aditivo, los casos de mayor retracción total se observan con el aditivo 3425.

En las Figura 57 y Figura 58 se muestran las medias de la retracción total y autógena, respecto al tipo de hormigón en función a su aditivo correspondiente.

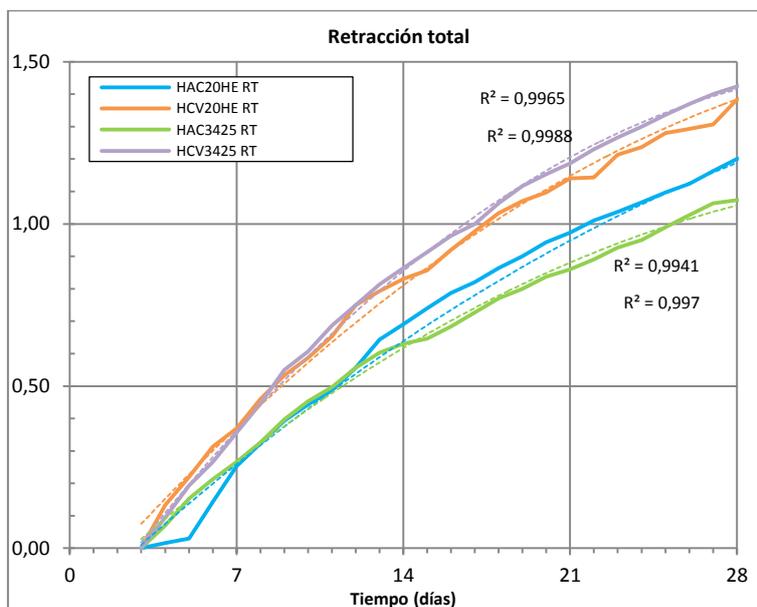


Figura 57. Media de retracción total

Se determina que el hormigón que presenta más retracción es el HCV, produciéndose específicamente en el HCV 3425, en cambio suele parecer que el hormigón HAC 3425 a partir de 12 días genere menos retracción que el HAC 20HE, en cambio a edades menores de 7 días es lo contrario. Este mismo caso se repite con la retracción autógena a pesar de que la diferencia entre HCV 3425 y 20HE no se note a partir de 7 días.

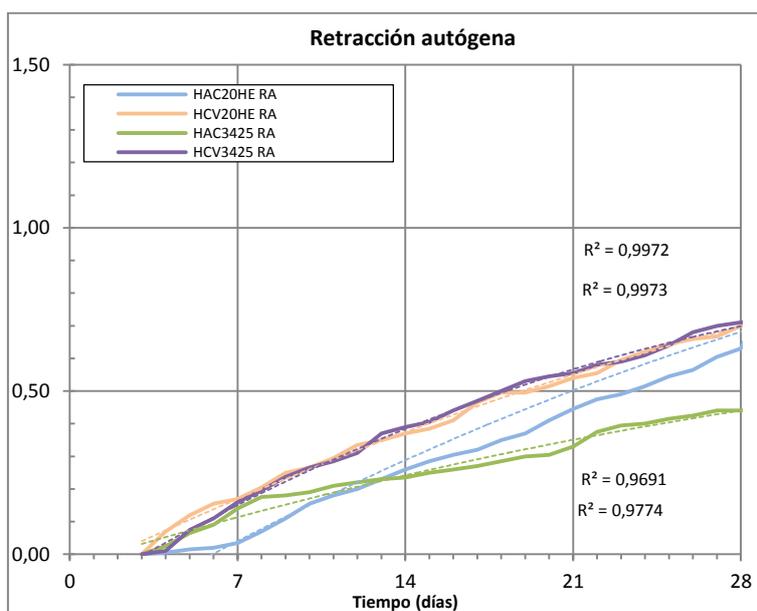


Figura 58. Media por retracción autógena

En la Figura 59 se muestra la retracción autógena y total, con las respectivas medias de los resultados obtenidos por cada diseño de hormigón.

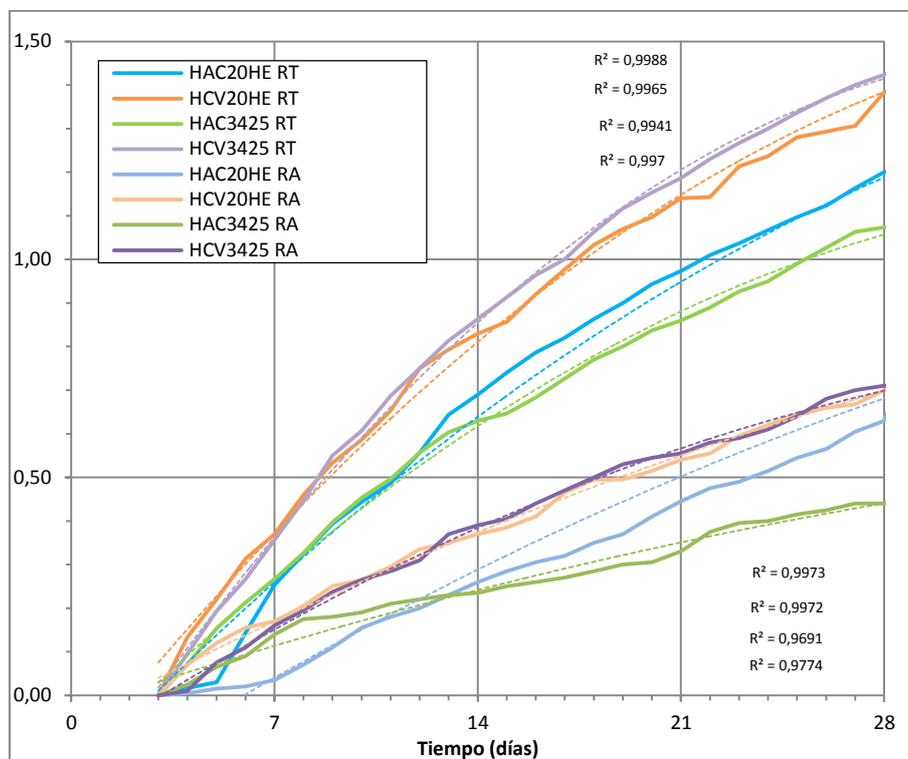


Figura 59. Retracción total-autógena a partir de 48 horas

En esta gráfica se detalla con más claridad lo antes planteado en las anteriores gráficas, donde la retracción autógena es la que menor reducción de sección presenta en los diseños de hormigón realizados.

Según lo que se planteó en el capítulo 3, de las 6 muestras por diseño que se utilizaron para este ensayo, una probeta de las que estaba sellada desde la prueba de retracción autógena a edad temprana, se le despojo de la lámina de polietileno para evaluar su comportamiento en una etapa diferente a las demás, se determinó que estas son las que más retracción total presentan. En cambio las muestras que permanecían selladas hasta el final de cada ensayo, presentaron más retracción autógena que las que fueron selladas a partir de 48 horas de inicio de ensayo. Véase en la Figura 60 con más detalle (las líneas continuas son los que identificas estos casos).

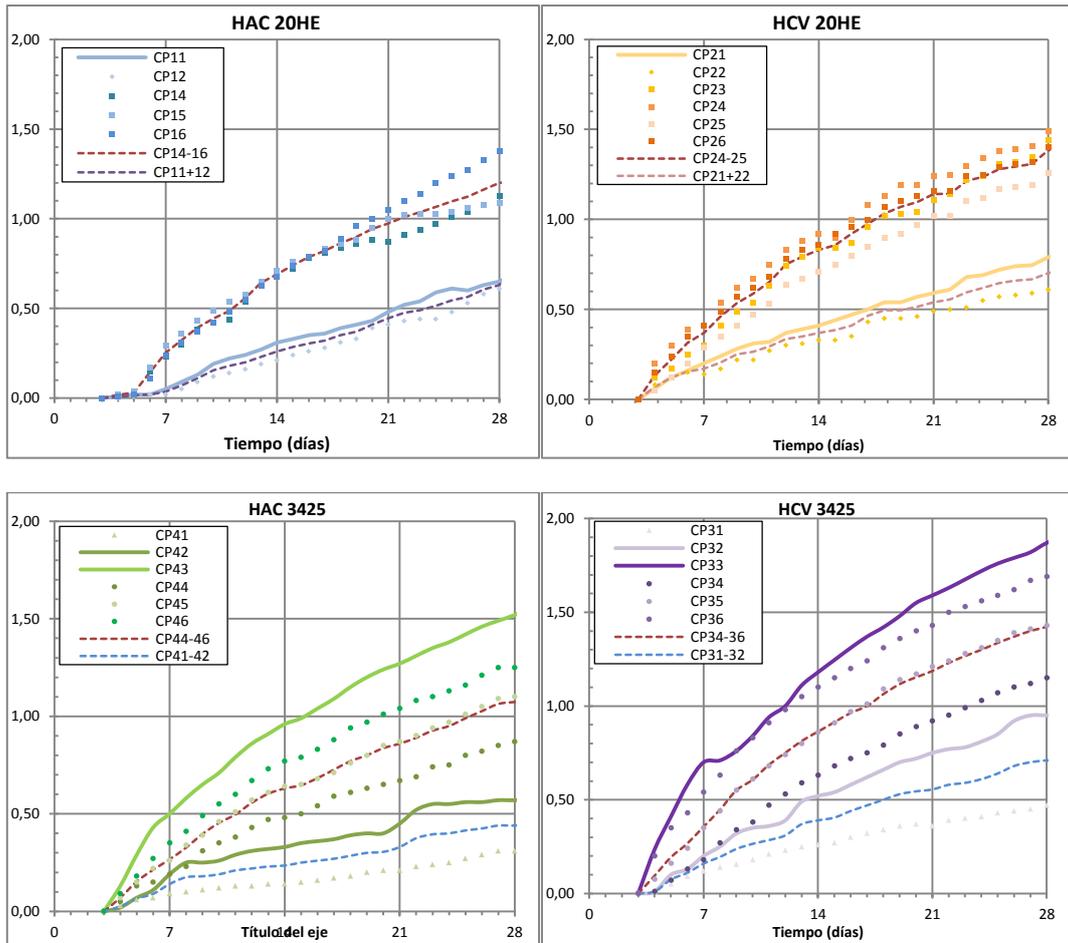


Figura 60. Diferencias entre muestras selladas y no selladas a partir de 48 horas

En la Figura 61 se muestran ambas retracciones por cada tipo de aditivo, se demuestra nuevamente que para ambas retracciones el hormigón más afectado por la retracción es el HCV.

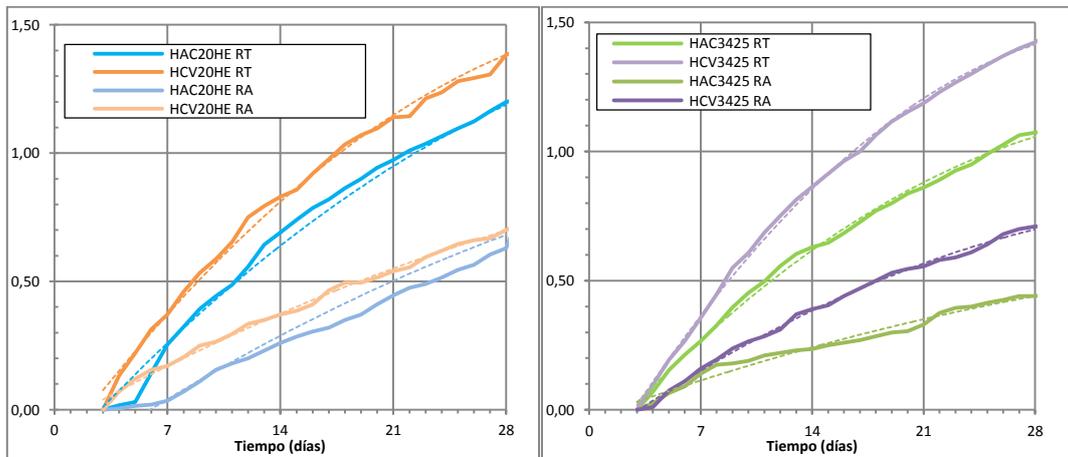


Figura 61. Retracción total y autógena por tipo de aditivo

## 5- CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Conforme al diseño y las condiciones de los dos tipos de hormigones autocompactantes, los resultados reológico adquiridos entran dentro de lo previsto por cada especificación técnica, logrando así determinar que estos proporcionan trabajabilidad a la hora de ejecución, sin riesgo de segregación y bloqueo.

Según lo analizado en la discusión de los datos, respecto a la resistencia a compresión en el hormigón, se determina un incremento de resistencia a partir de edades menores a 24 horas, logrando alcanzar en un día el 50 al 60 % de la resistencia del hormigón. Para edades de 48 horas se alcanza un 70 % de evolución de la resistencia, los cuales son mayores al propuesto por la EHE-08 a edades de 72 horas.

Dentro de las variables que se plantean en este trabajo de investigación, se puede determinar que el hormigón autocompactante posee adquisición de resistencia más rápida respecto a la evolución, acompañado del aditivo 20HE, el cual proporciona propiedades evolutivas mayores que el aditivo 3425. De la misma manera en referencia a las resistencias respectivas de cada hormigón, el HAC es el de más ganancia de resistencia.

En comparación con las instrucciones a edades superiores a las 24 horas las diferentes normativas son bastante conservadoras respecto a los resultados obtenidos, pero cabe matizar que a edades menores de 12 horas la EHE-08 subestima la evolución de resistencias a edades muy tempranas, lo cual no lleva a pensar sobre la importancia del desencofrado a edades tempranas.

De acuerdo con otras investigaciones se puede corroborar que para hormigones con la misma relación agua / cemento y el mismo diseño, el HAC posee ventajas respecto al HCV.

Concerniente a la evolución de la resistencia a tracción indirecta, el comportamiento establecido por las variables planteadas en esta propuesta investigativa son semejante a lo obtenidos a en los resultados a compresión. No obstante es de importancia establecer la relación existente entre la resistencia a compresión y la tracción.

Algunos autores han expuesto que la evolución de la resistencia a tracción en el HCV tiende a ser mayor que en el HAC, esto respecto a la tendencia evolutiva que corresponde en esta investigación es aceptable, aunque la diferencia no es amplia.

La relación existente entre el módulo de deformación y la compresión es muy similar para lo proyectado por las normas, a pesar que la relación más evidente entre los tipos de datos es respecto a la ACI 209.2R y el código modelo del 2010.

Ciertos autores estipulan que la inclusión de más pasta en el hormigón disminuye el resultado del módulo de deformación a edades iniciales en los HAC, en cambio los resultados adquiridos en este trabajo de master muestran que en el HAC se obtienen valores no muy elevados al HCV, repitiendo esta situación en cada edad de ensayo. Esto puede ser debido a que la composición interna sea menos porosa y con una

microestructura más fina, proporcionando mayor densidad, a medida que evoluciona el tiempo. Todo esto a pesar de que se use una misma relación a/c de 0.65.

Se ha determinado que la retracción a edades muy tempranas es evidentemente más con la utilización de aditivos 20HE en HAC. En cambio se ha definido que la utilización de aditivo 3425 proporciona menor retracción autógena a edades muy tempranas, a diferencia del 20HE, esto puede ser debido a que el desarrollo de fraguado del 3425 puede ser más lento que su contrario a edades iniciales. A diferencia de la retracción por secado determinada por peso, los resultados obtenidos plantean que la mayor retracción producida se genera en los hormigones realizados con aditivo 3425 y el de más tendencia a la retracción es el HCV.

El mismo caso sucede en la retracción total y autógena a partir de 48 horas, la contracción más evidente se produce con los hormigones convencionales, sin importar el tipo de aditivo. Sin embargo el HAC 3425 presenta un comportamiento más estable a partir de 7 días para la retracción total y 12 días respecto a la autógena. Que el HAC presente resultados más estables que el HCV, para la retracción autógena, secado por pérdida de peso y total, puede ser debido a la inclusión de filler y la utilización de aditivos que mejoran la viscosidad del hormigón.

La utilización de lámina de polietileno permite que la pérdida de humedad sea menor en las probetas selladas evitando incremento de la retracción, en cambio las no selladas presenta lo contrario produciéndose el aumento de la retracción.

### **Futuras líneas de investigación**

- Estudio más profundo respecto a las propiedades mecánicas de los hormigones HAC a edades tempranas, inclusión de más variables para evaluar y comparar dichos factores que inciden en este tema.
- Profundizar sobre la evolución de resistencias a corto plazo y que factores pueden influir en la utilización de aditivos facilitadores de altas resistencias iniciales, tanto para prefabricados como toda área de construcción.
- Investigación continúa de la retracción autógena a edades menores a 48 horas y superiores a estas, aplicación de otros tipos de métodos de estudio.
- Normalización y actualización sobre los métodos de análisis y estudio sobre la edad temprana en los diferentes tipos de hormigones existentes.

## 6- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- **ACHE, (2008).** *Hormigón autocompactante: Diseño y aplicación.* Comisión 2, Grupo de Trabajo 2/2, Hormigón autocompactante.
- **ACI (2007)** “ACI 237R-07, *Self-Consolidating Concrete*”. American Concrete Institute Committee 237 2007.
- **AENOR (2009)** “UNE EN 12390-3. *Ensayo de hormigón endurecido. Determinación de la resistencia a compresión de probetas*”.
- **AENOR (2010)** “UNE EN-12350-7 *Determinación del contenido de aire. Método de presión.*”
- **AENOR (2010).** “UNE EN 12390- 6. *Ensayo de hormigón endurecido. Resistencia a tracción indirecta de probetas.*”
- **AENOR (2010).** “UNE EN UNE 1992-1-1. *Proyecto de estructuras de hormigón. Reglas generales y reglas para edificación*”. Versión española.
- **AENOR (2011)** “UNE EN 12350-8. *Hormigón autocompactante. Ensayo del escurrimiento.*”
- **AENOR (2011)** “UNE EN-12350-10. *Hormigón autocompactante. Método de la caja en L.*”
- **AENOR (2011)** “UNE EN-12350-12. *Hormigón autocompactante. Ensayo con el anillo japonés.*”
- **AENOR (2011)** “UNE EN-12350-9. *Hormigón autocompactante. Ensayo del embudo en V.*”
- **AENOR (2013)** “UNE EN 12390-1. *Ensayo de hormigón endurecido. Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes.*”
- **AENOR (2014)** “prNE EN 83160. *Determinación de la resistencia del hormigón a edades tempranas.*” Parte 1. Métodos aplicables.
- **Agranati Landsberger, Galit. (2008).** *Estudio sobre la aplicación de los modelos de cálculo de la fluencia y retracción al hormigón autocompactable.* Tesis Doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- **Aguilar Beltrán, O. Rodríguez. Sermeño, Martín (2009).** *Determinación de la resistencia del concreto a edades tempranas bajo la norma ASTM C 1074, en viviendas de concreto coladas en el sitio.* Trabajo fin de grado. El Salvador: Universidad de El Salvador. [Consulta: 5 de enero 2015].
- **Anagnostopoulos, N., Sideris, K.K. & Georgiadis, a., (2009).** Mechanical characteristics of self-compacting concretes with different filler materials, exposed to elevated temperatures. *Materials and Structures*, 42(September), pp.1393–1405.
- **Assie, S., Escadeillas, G., Marchese, G., (2003).** Durability of self-compacting concrete, *Proceedings of the Third International Symposium on self-compacting concrete*, pp. 655-662.
- **ASTM C 469-14.** *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression.*
- **ASTM C403/C403M.** *Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance.*”
- **Benito Saorin, Francisco. (2014).** *Propiedades Mecánicas y retracción de hormigones autocompactantes fabricados con escorias siderúrgicas de alto horno.*

Tesis Doctoral. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. < <http://hdl.handle.net/10251/43072>> [Consulta: 06 de enero 2015].

- **Borralleras P. (2012).** “Criterios y ensayos prácticos para la selección del aditivo superplastificante para la producción industrial de SCC”. *3º Congreso Iberoamericano sobre Hormigón Autocompactante*. Madrid, España.
- **Boulay, C. et al., (2013).** How to monitor the modulus of elasticity of concrete, automatically since the earliest age? *Materials and Structures*, 47(1-2), pp.141–155.
- **Calavera, J., (2002).** *Proyecto y Calculo de Estructuras de Hormigón*. (Tomo I y II), INTEMAC Ediciones.
- **Chen Cheng, Alexis. (2013).** *Características mecánicas de hormigones reforzados con fibras a edades muy tempranas*. Trabajo fin de Master. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. < <http://handle.net/10251/43512>>. [Consulta: 15 de noviembre 2014].
- **Cuenca Asencio, Estefanía. (2008).** *Hormigón autocompactante y hormigón reforzado con fibras*. Trabajo fin de Master. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. < <http://hdl.handle.net/10251/12318>>. [Consulta: 01 de febrero 2015].
- **D.T. Institute (2010).** “4C-Rheometer Determination of Rheological Properties of Self-Compacting Concrete” Danish Technological Institute.
- **Figueroa Zuleta, Tatiana. (2011).** *Fluencia a compresión de hormigones autocompactantes sometidos a carga en autocompactantes sometidos a carga en edades temprana*. Trabajo fin de Master. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. <<http://hdl.handle.net/10251/15840>>. [Consulta: 15 de octubre 2014].
- **Holt, E. & Leivo, M., 2004.** Cracking risks associated with early age shrinkage. *Cement and Concrete Composites*, 26(5), pp.521–530.
- **Jensen, O.M. & Hansen, P.F., 1995.** Autogenous relative humidity change in silica fume-modified cement paste. *Advances in Cement Research*, 7(93), pp.33–38.
- **Klug, Y., Holschemacher, H., (2003).** Comparison of the hardened properties of self-compacting and normal vibrated concrete, *Proceedings of the 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete*.
- **Ministerio de fomento (2010) EHE-08.** Instrucción de Hormigón Estructural, Comisión Permanente del Hormigón. Ministerio de Fomento de España. 4ta edición.
- **Ministerio de fomento (2014).** Guía de aplicación de la instrucción de Hormigón estructural (EHE-08), comisión permanente del hormigón.
- **Neville AM (ed.) (1996).** *Properties of Concrete*, 4th edn. Wiley, New York, USA.
- **Neville, A.M. (1981).** *Tecnología del Concreto*, IMCYC (Tomo II), versión México.
- **Østergaard L (2003).** *Early-age Fracture Mechanics and Cracking of Concrete, Experiments and Modeling*. PhD thesis, Technical University of Denmark, Denmark.
- **Panesar, D.K. & Shindman, B., 2011.** Elastic properties of self consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 25(8), pp.3334–3344.
- **Parra, C., Valcuende M., Benlloch, J., (2007).** Mechanical properties of self-compacting concrete, *Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium on SCC, PRO 54*. pp. 645-650.
- **Parra, C., Valcuende, M. & Gómez, F., 2011.** Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 25(1), pp.201–207.
- **Parra, C., Valcuende, M., Benlloch, J., Santamaría A. (2008).** “Evolución en el tiempo de la resistencia a compresión, la resistencia a tracción y el módulo de

deformación de HAC”. 1º Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. Madrid, España.

- **RILEM 42 CEA. (1981).** “Properties of set concrete at early ages state-of-the-art-report” *Matériaux et Construction*. vol. 14, Issue 6, pp 399-450 ”
- **Schutter, G. & Taerwe, L., 1996.** Degree of hydration-based description of mechanical properties of early age concrete. *Materials and Structures*, 29, pp.335–344.
- **Skarendahl, A., Petersson, O., (2000).** *Self-Compacting Concrete – State of the Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC*, RILEM Publications.
- **Sofi, M., Mendis, P. a. & Baweja, D., 2012.** Estimating early-age in situ strength development of concrete slabs. *Construction and Building Materials*, 29, pp.659–666.
- **Soliman, a. M. & Nehdi, M.L., 2010.** Effect of drying conditions on autogenous shrinkage in ultra-high performance concrete at early-age. *Materials and Structures*, 44(5), pp.879–899.
- **Soliman, A.M. & Nehdi, M., 2011.** Early-age properties of concrete: overview of fundamental concepts and state-of-the-art research. *Proceedings of the ICE Construction Materials*, 164(2), pp.57–77.
- **Sukumar, B., Nagamani, K. & Srinivasa Raghavan, R., 2008.** Evaluation of strength at early ages of self-compacting concrete with high volume fly ash. *Construction and Building Materials*, 22(7), pp.1394–1401.
- **Swaddiwudhipong S, Lu HR and Wee TH (2003).** Direct tension test and tensile capacity of concrete at early-age. *Cement and Concrete Research*, 33(12): 2077–2084.
- **Valcuende, M. et al., 2012.** Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the shrinkage of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 42(4), pp.583–592.
- **Vieira, M., Bettencourt, A., (2003).** Deformability of Hardened SCC. *Proceedings of the Third International Symposium on self-compacting concrete, RILEM Proceedings PRO 33*, pp. 637-644.
- **Zerbino, R.; Barragán, B.; Agulló, L.; García, T.; Gettu, R.** “Reología de hormigones autocompactables. *Ciencia y tecnología del hormigón*. 2006, nº 13, pp. 51-64.