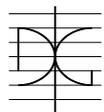


CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE HORMIGONES REFORZADOS CON FIBRAS A EDADES MUY TEMPRANAS

Por:

Alexis Chen Cheng

Junio 2013

Autor / Author: Alexis Chen Cheng		Fecha / Date: 26/06/2013	
Título / Title CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE HORMIGONES REFORZADOS CON FIBRAS A EDADES MUY TEMPRANAS			
Directores del trabajo / Supervisores: Pedro Serna Ros		Código / Code: CST/MIH-XX	Nº páginas / Pages: 135
Departamento / Department: INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL			
Universidad / University: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA			UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA
Palabras clave / Keywords: Temprana edad; retracción; edad del hormigón; hormigón; fibras Early Age; shrinkage; time effect; concrete; SFRC			
Código Unesco: 3305/05 Ciencias y tecnología de la construcción/ Tecnología del Hormigón			

Agradecimientos:

A Dios todo poderoso por la bendición de vivir, a mi familia que siempre me ha apoyado, en especial a mi Padre, Yin Kim, a mi madre, Li Jin que cruzaron la mitad del mundo para dar a mis hermanos y a mí un mejor futuro, a mi hermana Marisol que tiene mucha fé en mí, a mi hermano Carlos que fue el primer ingeniero de la familia y a mi hermana Alexandra nunca se rinde y que con su carisma y energía logra hacer muy grande cosas.

Alexis Chen Cheng

RESUMEN

El hormigón tradicional a base de cemento portland tiene la ventaja de poder mejorar algunas características mecánicas con la adición de elementos de refuerzos como fibras metálicas (SFRC) distribuidos aleatoriamente durante su amasado, con la ayuda de la tecnología de los aditivos de hoy día, hacen posible que los hormigones tengan consistencias muy fluida o autocompactante sin sacrificar la resistencia mecánica del material, brindado así una nueva generación de hormigones especiales.

La resistencia mecánica de los hormigones especiales a muy temprana edad (primeras horas) así como los de retracción aún no han sido estudiados con profundidad y hasta ahora se han tratados por separado. Actualmente no existen métodos de ensayos estandarizados aceptados mundialmente para medir dichas características experimentalmente.

En este trabajo se realiza una investigación en la literatura científica de las propiedades mecánicas del hormigón conocida hasta el presente, en conjunto con un programa experimental con la finalidad de medir a primeras horas: Esfuerzo de compresión, módulo elástico (módulo de Young), resistencia a la tracción por flexión (flexo tracción), retracción libre y retracción restringida (prueba del anillo restringido).

Se ha experimentado con 28 tipos de hormigones especiales de distintos tipos (tradicional, autocompactante, con fibra sintética y metálica), se ha cuantificado y analizado los resultados en este presente trabajo.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación.....	1
1.2 Objetivo general.....	2
1.3 Objetivos específicos.....	2
1.4 Estructura del trabajo.....	3
2. CAPÍTULO II ESTUDIO DEL ARTE	5
2.1.1 El hormigón reforzado con fibras (FRC).....	5
2.1.2 Hormigón reforzado con fibras metálicas (SFRC).....	7
2.1.3 Hormigón reforzado con fibras sintéticas (SNFRC).....	10
2.1.4 Otros tipos de fibras.....	11
2.1.5 Investigaciones actuales con fibras sintéticas.....	12
2.2 Influencia de los componentes del hormigón.....	13
2.2.1 Hidratación del cemento.....	13
2.2.2 Cambios de volumen en el hormigón por la hidratación.....	15
2.3 Retracción del hormigón.....	17
2.3.1 Retracción del hormigón a edades tempranas.....	18
2.3.3 Fluencia y retracción del hormigón.....	21
2.3.4 Cálculo de retracción total.....	22
2.4 Cálculo del coeficiente de edad del hormigón.....	25
2.4.1 Coeficiente de edad a compresión y tracción.....	25
2.4.2 Coeficiente de edad del módulo de elasticidad.....	26
2.5 Interrogantes sin resolver.....	28
3. CAPÍTULO III PROGRAMA EXPERIMENTAL	29
3.1 Programa general.....	29
3.2 Plan de trabajo.....	31
3.3 Procedimiento de trabajo.....	32
4. CAPÍTULO IV PROCEDIMIENTO OPERATIVO DE ENSAYO	35
4.1 Estudios preliminares.....	35
4.1.1 Estudio Granulometría de los Áridos.....	35
4.1.2 Diseño de mezcla de hormigón.....	37
4.2 Amasado.....	40
4.2.1 Toma de muestra.....	41
4.2.2 Asiento con el cono de Abram's (UNE-EN 12350-2-2006).....	43

4.2.3	Ensayo de extensión de flujo para hormigón autocompactante.....	43
4.3	Ensayos mecánicos	44
4.3.1	Ensayo de rotura por compresión y módulo de Young.....	44
4.3.2	Ensayo de resistencia a tracción por flexión en hormigón con fibras.....	45
4.4	Ensayos de retracción	47
4.4.1	Retracción libre total (ASTM C150).....	47
4.4.2	Retracción restringida, anillo restringido (ASTM C1581)	48
4.5	Equipos de laboratorio	49
5.	CAPÍTULO V RESULTADOS Y ANÁLISIS DE ENSAYOS.....	55
5.1.1	Resultados de ensayo de rotura por compresión.....	57
5.1.2	Análisis de ensayo de rotura por compresión.	60
5.2.1	Resultados de ensayo de módulo elástico.	68
5.2.2	Análisis de ensayo de módulo elástico.....	72
5.3.1	Resultados de ensayo de resistencia a tensión por flexión (flexo tracción)	75
5.3.2	Análisis de ensayo de resistencia a tensión por flexión (flexo tracción).....	78
5.4.1	Resultados de ensayo de retracción restringida. (Anillo restringido).....	90
5.4.2	Análisis de ensayo de retracción restringida.	90
5.5.1	Resultados de retracción libre total.....	91
5.5.2	Análisis de ensayo retracción libre total	93
6	CAPÍTULO VI Análisis de datos experimentales y ajustes	97
6.1	Análisis paramétrico de compresión y módulo elástico por método de mínimos cuadrados	97
6.2	Análisis paramétrico de resistencia a tracción por flexión	103
6.3	Calibración de una ecuación que relacione el módulo elástico en función de resistencia compresión independiente del tiempo a temprana edad.	105
7	CAPÍTULO VII Conclusión y futuras líneas de investigación	109
7.1	Conclusión de ensayos mecánicos:	109
7.2	Conclusión de ensayos de retracción:	110
7.3	Conclusión de modelo de ajuste propuesto	110
7.4	Futuras líneas de investigación	111
	Referencia y Bibliografía	113

Índice de Ilustración

Ilustración 1: Curva típica Carga vs Abertura de fisura. Ensayo a flexión	5
Ilustración 2: Tipos de fibras y propiedades (ACI 544-5R-10 2010)	6
Ilustración 3: Formas de las fibras de acero: a) sección circular. B) sección rectangular, c) sección ondulada, d) extremos conformados, e) de extractos fundidos y f) extremos ensanchados (Hammant, 1978)	8
Ilustración 4: Recomendaciones de proporciones para dosificaciones de SFRC (ACI 544.1R-96, 2009)	9
Ilustración 5: Efectos del tamaño del árido en la distribución de las fibras (Hannant, 1978)	9
Ilustración 6: Pequeñas expansiones en las primeras 6 horas y las retracciones aparecen a las 9 horas (Aly T. y Sanjayan JG. 2010).	12
Ilustración 7: Aumento de retracción por permeabilidad en el hormigón por adición de fibras de polipropileno (Aly T. y Sanjayan JG. 2010).	12
Ilustración 8: Cuatro fases de la evolución del cemento Portland hidratado. (Tomado de “Desarrollo y análisis de pavimentos Industriales desde el punto de vista de acabado superficial”).....	13
Ilustración 9: Etapas de la hidratación del cemento Portland. (Tomado de “Desarrollo y análisis de pavimentos Industriales desde el punto de vista de acabado superficial”)	14
Ilustración 10: Representación esquemática de las proporciones volumétricas en la pasta de cemento antes y después de la hidratación.	16
Ilustración 11: Resistencia mecánica, cambio de estado del hormigón (fraguado), posteriormente ocurre el rigidización, etapa tierna (verde) y etapa madura.	16
Ilustración 12: Clasificación de la retracción.....	18

Ilustración 13: Caída de capacidad de deformación donde el hormigón es más sensible a las tensiones internas (Byfors 1980, KASAI 1972).....	19
Ilustración 14: Retracción química y autógena (PORLAND CEMENT ASSOCIATION).....	20
Ilustración 15: Deformaciones en el hormigón a lo largo del tiempo (López, 2005)	21
Ilustración 16: Valores del coeficiente "ke"	23
Ilustración 17: Coeficiente α_{s1} y α_{s2}	24
Ilustración 18: Tabla de Valores de Retracción (EHE)	24
Ilustración 19: coeficiente que depende del origen del agregado.....	27
Ilustración 20: Tabla de proporción de fibras.....	30
Ilustración 21: Fibras de refuerzo utilizadas para los ensayos: 1) Metálica 2) Sintética macro 3) Sintética micro	30
Ilustración 22: Tabla de tamaño mínimo de las muestras de ensayo.	35
Ilustración 23: Curva granulométrica de los áridos utilizados.....	36
Ilustración 24: Cuadro Tanteo de resistencia (En todos los caso la f_{cm} es mayor a la de diseño, cumpliendo nuestros objetivos)	38
Ilustración 25: Tabla Resultado de Diseño de Mezcla.....	38
Ilustración 26: Curva mezcla granulométrica.....	39
Ilustración 27: Toma de muestra, probeta prismática.....	42
Ilustración 28: Dimensiones del molde de anillo restringido.	42
Ilustración 29: Prueba de asiento con cono de Abram's.....	43
Ilustración 30: Escurrimiento de hormigón autocompactante	44

Ilustración 31: Ibertest, modelo MEH-3000-LCMD2W	45
Ilustración 32: 1) Rodillo de apoyo 2) rodillo de carga	46
Ilustración 33: Probeta ensayada apoyada en 3 puntos con entalla central. Transductor de desplazamiento en la parte inferior de la viga.	46
Ilustración 34: 1) Probeta con puntos de MEK. 2) DEMEK. 3) espaciador macho. 4) calibrador hembra. 5) hidrómetro. 6) pegamento. 7) rotulador.	47
Ilustración 35: Espécimen de anillo de hormigón restringido internamente con anillo de acero. Hidrómetro (medidor de temperatura y humedad el aire) en el interior del anillo.	48
Ilustración 36: Regla de ancho de fisura, fisura en espécimen de hormigón....	48
Ilustración 37: Hormigonera Marca Betonmass, modelo ST 150 CD, de eje vertical y tambor fijo, capacidad máxima de 100 litros. Este equipo se utilizó para todas las amasadas.	49
Ilustración 38: Calentador de azufre y nivelador de refrenado para probetas de $\varnothing = 150$ mm.....	49
Ilustración 39: Presa servocontrolada Ibertest, modelo MEH-3000-LCMD2W de 3000 kN.....	50
Ilustración 40: Equipo INSTRON 3382, célula de carga y equipo de adquisición de datos.....	50
Ilustración 41: Cámara de retracción. Ventilador industrial conectado a un termostato.	51
Ilustración 42: Cierre de corte en húmedo con cuchilla de diamante. Se utilizó para hacer las entallas de las probetas en ensayo de flexotracción.	52
Ilustración 43: Mesa de vibración, se utilizó para compactar y sacar el oxígeno atrapado en las probetas de hormigón tradicional.....	52
Ilustración 44: Cámara húmeda de curado, 100%HR. 20 C.....	53
Ilustración 45: Horno de laboratorio a temperatura de 110 C. Se utilizó para secar los áridos y sacar las humedades.....	53

Ilustración 46: Tabla de % de aditivo utilizado para ajustar la consistencia por la adición de fibras	55
Ilustración 47: Resultados de compresión y modulo a 28 días.....	56
Ilustración 48: Tabla ensayo y desviación de tiempo de ensayo.....	57
Ilustración 49: Probetas desencofradas a 9 horas, se aprecia la humedad superficial.	66
Ilustración 50: Probetas ensayada a 9 horas , la falla ocurre a menos de1 MPa.	66
Ilustración 51:Foto 5.1.2 d Probetas ensayada a 11 horas después de la falla a 3.5 MPa. Se aprecia la probeta más seca y el tipo de falla vertical de arriba hacia abajo.	67
Ilustración 52: sección central de vigas después del ensayo a flexotracción ...	77
Ilustración 53: Gráfico típico de flexotracción con fibras metálicas	78
Ilustración 54: Grafico de evolución a flexotracción en fibras de metálicas.....	79
Ilustración 55: Gráfico típico de flexotracción con fibras	80
Ilustración 56: Grafico de Evolución a flexotracción con fibras polielefina.....	80
Ilustración 57: Grafico típico de resistencia a flexotracción en fibras de polipropileno	81
Ilustración 58: Grafico típico de evolución de resistencia a flexo tracción con fibras de polipropileno	82
Ilustración 59: Grafico Resistencia a flexotracción vs Ancho de fisura.....	83
Ilustración 60: Grafico Resistencia a flexotracción vs Ancho de fisura.....	83
Ilustración 61: Grafico Resistencia a flexotracción vs Ancho de fisura.....	84
Ilustración 62: Grafico Resistencia a flexotracción vs Ancho de fisura.....	84

Ilustración 63: Grafico de Resistencia a Flexotracción vs Tiempo	85
Ilustración 64: Grafico de Resistencia a Flexotracción vs Ancho de fisura.....	86
Ilustración 65: Grafico de Resistencia a Flexotracción vs Ancho de fisura.....	86
Ilustración 66: Grafico de Resistencia a Flexotracción vs Ancho de fisura.....	87
Ilustración 67: Grafico de Resistencia a Flexotracción vs Ancho de fisura.....	87
Ilustración 68: Grafico de Resistencia a Flexotracción vs tiempo.....	88
Ilustración 69: Grafico de Resistencia a Flexotracción vs tiempo.....	89
Ilustración 70: Tabla resultado de Retracción Restringida	90
Ilustración 71: Tabla estimación aproximada de esfuerzo antes de la fisura....	90
Ilustración 72: Tabla Resultado de retracción libre.....	91
Ilustración 73: Grafico de Retracción libre vs Tiempo	92
Ilustración 74: Grafico de Retracción libre en función de tiempo.....	93
Ilustración 75: Grafico de Retracción libre en función de tiempo.....	94
Ilustración 76: Grafico de Retracción libre en función de tiempo.....	94
Ilustración 77: Grafico de Retracción libre en función de tiempo.....	94
Ilustración 78: Grafico de Retracción libre en función de tiempo.....	95
Ilustración 79: Grafico de Retracción libre en función de tiempo.....	95
Ilustración 80: Grafico de Retracción libre en función de tiempo.....	96
Ilustración 81: Grafico de dispersión (compresión). La línea roja (ideal) representa resultados experimental = cálculos teóricos; La Línea azul representa resultados experimentales /resultados teóricos (compresión).....	97

Índice de Anejo

Anejo 1

Preliminares, Estudio granulométrico de los áridos117

Anejo 2

Resultados de Ensayos de resistencia a rotura a compresión y módulo elástico.....125

Anejo 3

Análisis de datos133

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

El hormigón es el material mayormente utilizado en la industria de la construcción debido a que puede adquirir casi cualquier forma y por su relativamente bajo precio. El hormigón tradicional tiene el defecto de no poder resistir mecánicamente los esfuerzos de tensión con la misma magnitud que los esfuerzos a compresión ($f_{tm} = 10\% f_{cm}$), como consecuencia de esta debilidad se le adicionan fibras de refuerzo (FRC) distribuidos aleatoriamente durante el amasado con el propósito de brindar al hormigón una capacidad residual y una rotura más dúctil en su estado fisurado.

En la industria de prefabricados, las propiedades del hormigón a muy corto plazo son de vital importancia, en las primeras horas se precisan actuar sobre los elementos constructivos por necesidad de: desencofrado, transmisión de pretensados o movimiento de la planta, todo con el fin de optimizar el uso de las instalaciones.

La entrada en el mercado de algunos hormigones especiales puede plantear dudas sobre la evolución de las propiedades mecánicas a temprana edad (uso de dosificaciones ricas en finos, empleo de elevadas cantidades de aditivo), asimismo algunas propiedades especiales pueden seguir ritmos de crecimiento no similares a las propiedades elementales (resistencia a compresión), en particular las resistencias residuales a tracción en hormigones con fibras. En este contexto se plantea el trabajo, con la finalidad de valorar experimentalmente la evolución de algunas propiedades de los hormigones especiales.

1.2 Objetivo general

Este trabajo es requisito para obtener el título de “Master en ingeniería del hormigón”, el objetivo general es estudiar y analizar la evolución de las propiedades mecánicas a muy corto plazo de hormigones tradicionales, autocompactantes, con y sin adición de fibras.

1.3 Objetivos específicos

Los objetivos específicos de este trabajo se han establecido como consecuencia de investigación en el estudio del arte (capítulo 2) de materiales para la elaboración de hormigones especiales. Los objetivos específicos se presentan a continuación:

Realizar una campaña experimental, con la finalidad de ensayar 4 tipos de hormigones (2 autocompatante y 2 tradicional, de 25 y 40 MPa.) con diferentes contenidos y tipos de fibras (fibras de acero, fibras macro sintéticas y fibras micro sintéticas) a edades muy tempranas (10 a 48 h.), cada tipo de hormigón se caracteriza mediante 5 tipos de ensayo:

- 1) Ensayo de resistencia a compresión. (UNE 83304)
- 2) Ensayo de módulo de elasticidad. (UNE 83316)
- 3) Ensayo de Flexotracción. (UNE-EN 14651)
- 4) Ensayo de contracción libre por secado. (ASTM C150)
- 5) Ensayo de anillo de contracción restringido. (ASTM C1581)

Se busca relacionar los diferentes ensayos con el fenómeno a estudiar y aportar conocimientos en esta área.

1.4 Estructura del trabajo

En el Capítulo I, contiene la introducción de este presente trabajo, los objetivos generales y específicos de esta investigación.

En el Capítulo II, abarca el estado actual del conocimiento, comenzando con de las propiedades del hormigón reforzado con fibras, tipos de adiciones, normativas y finalizando con estudios recientes de retracción a temprana edades y edades posteriores del hormigón.

En el Capítulo III, define el programa experimental, la programación, condiciones de la investigación, registro de datos y el tipo de formato para cada ensayo.

En el Capítulo IV, describe el procedimiento operativo de los ensayos, la descripción del procedimiento técnico de cada ensayo, así como las condiciones del entorno y herramientas de laboratorio a utilizar.

En el Capítulo V, presenta los resultados obtenidos, el análisis de los datos, gráficos y resumen de todos los ensayos realizados.

En el Capítulo VI, presenta un análisis paramétricos de los datos experimentales y los cálculos teóricos. Se propone dos ecuaciones de ajuste a temprana edad.

En el Capítulo VII, conclusión de los resultados obtenidos en esta investigación y futuras líneas de investigación a consecuencia de nuevas interrogantes.

(Esta página se ha dejado intencionalmente en blanco)

2. CAPÍTULO II ESTUDIO DEL ARTE

En este capítulo se aborda el estado actual del conocimiento, iniciando con la teoría clásica del hormigón reforzado con fibras, seguido por las investigaciones de nuevos materiales para adicionar al hormigón, comparación de cálculos en las normativas internacionales y terminando con artículos científicos relacionados con retracción y ensayos a tempranas edades en el hormigón.

2.1.1 El hormigón reforzado con fibras (FRC)

Se define como aquellos hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa (Anejo 14 EHE 2008).

Las fibras soportan esfuerzos de tracción que transmiten por adherencia al hormigón, controlan la fisuración y reducen la intensidad de la misma a la vez mejora la tenacidad. La figura 2.1 muestra un diagrama de la curva típica del comportamiento conceptual carga abertura de fisura de un ensayo a flexión con y sin fibras.

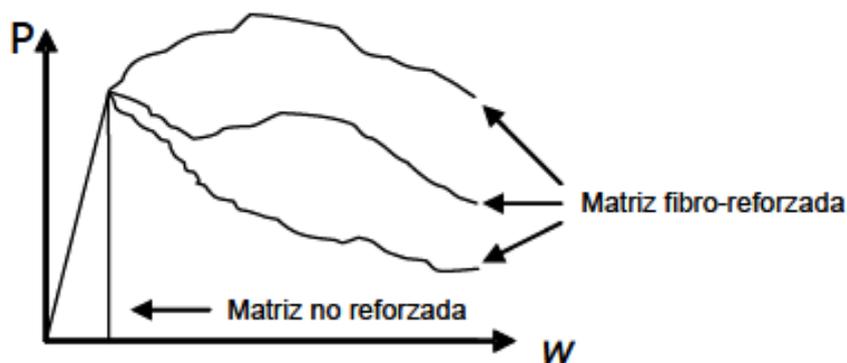


Ilustración 1: Curva típica Carga vs Abertura de fisura. Ensayo a flexión

El FRC es utilizado en aplicaciones estructurales para incrementar la durabilidad, reducir la mano de obra y en casos sustituye los refuerzos tradicionales del armado o mallas de control de retracción.

Hoy día existen una gran gama de diferentes tipos de fibras, dependiente de su naturaleza y forma específica varían su efectividad en la transmisión de esfuerzos en el interior del hormigón. En la tabla 2.1 se muestra algunos de los materiales más comunes utilizados en la fabricación de fibras y algunas propiedades del material.

Tipo de Fibra	Diámetro Equivalente (mm)	Densidad (kg/m ³)	Resistencia a Tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Alargamiento de Rotura (%)
Acrílico	0.02-0.35	1100	200-400	2	1.1
Asbesto	0.0015-0.02	3200	600-1000	83-138	1-2
Algodón	0.2-0.6	1500	400-700	4.8	3-10
Vidrio	0.005-0.15	2500	1000-2600	70-80	1.5-3.5
Grafito	0.008-0.009	1900	1000-2600	230-415	0.5-1
Aramida	0.01	1450	3500-3600	65-133	2.1-4
Nylon	0.02-0.4	1100	760-820	4.1	16-20
Poliéster	0.02-0.4	1400	720-860	8.3	11-13
Polipropileno	0.02-1	900-950	200-760	3.5-15	5-25
Polivinil alcohol	0.027-0.660	1300	900-1600	23-40	7-8
Carbón	-	1400	4000	230-240	1.4-1.8
Rayón	0.02-0.38	1500	400-600	6.9	10-25
Basalto	0.0106	2593	990	7.6	2.56
Polietileno	0.025-1	960	200-300	5.0	3
Sisal	0.08-0.3	760-1100	228-800	11-27	2.1-4.2
Coco	0.11-0.53	680-1020	108-250	2.5-4.5	14-41
Yute	0.1-0.2	1030	250-350	26-32	1.5-1.9
Acero	0.15-1	7840	345-3000	200	4-10

Ilustración 2: Tipos de fibras y propiedades (ACI 544-5R-10 2010)

La elección del tipo de fibra generalmente está condicionada a la aplicación que se le quiera dar, la durabilidad y la estética sin embargo, los factores económicos y la disponibilidad en el mercado local juega un papel importante en la elección de un tipo de fibras u otro.

Las fibras se dosifican según su volumen que ocupa dentro de la masa de hormigón (% del volumen de fibras / volumen total de hormigón), en algunas

ocasiones suelen mencionar kilogramos de fibras por metro cubico de hormigón (Kg/m³), según la densidad de las fibras la equivalencia debe ser la misma o similar.

2.1.2 Hormigón reforzado con fibras metálicas (SFRC).

Las fibras metálicas o de acero (mayormente utilizado en el mercado) son elementos de corta longitud y pequeña sección que se le adicionan al hormigón aleatoriamente durante el amasado con la finalidad de mejorar ciertas propiedades específicas que el hormigón tradicional no posee.

La matriz-fibra en los SFRC es mucho más efectiva, adquiere una resistencia a la tracción y un módulo de elasticidad significativamente mayor en comparación al hormigón tradicional, la adherencia con la matriz es incluso mayor que la resistencia a tracción de la misma (Naaman, 2000).

Las fibras deben cumplir con algunos requisitos mecánicos de resistencia a tracción, doblado y condiciones de superficie, los cuales están descritos en la UNE-EN 14889-1: 2008. En función de los materiales utilizados para la producción de fibras de acero, se clasifican los siguientes grupos:

- Grupo I: alambres estirados en frio (cold drawn wire)
- Grupo II: láminas cortadas (cut sheet)
- Grupo III: extractos fundidos (melt extracted)
- Grupo IV: conformados en frio.
- Grupo V: aserrados de bloques de acero (milled from Steel blocks).

Las fibras de Acero pueden ser de acero al carbón, acero inoxidable o revestidas de zinc (galvanizadas), pueden tener formas y secciones muy variadas (figura 2.3).

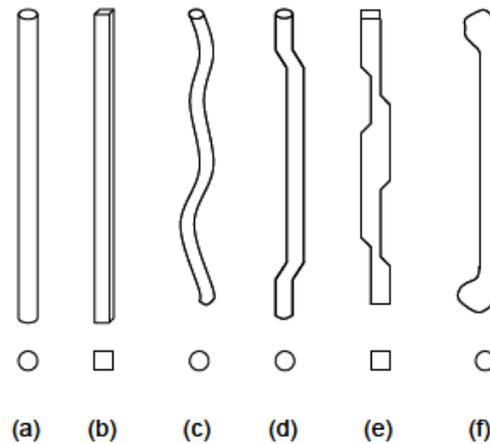


Ilustración 3: Formas de las fibras de acero: a) sección circular. B) sección rectangular, c) sección ondulada, d) extremos conformados, e) de extractos fundidos y f) extremos ensanchados (Hammant, 1978)

La sección transversal de las fibras depende principalmente de los materiales usados en su fabricación. El índice de esbeltez es la relación longitud sobre área de sección, generalmente están entre 40 y 80 (Naaman, 2000).

El contenido de fibras SFRC tradicional oscila entre el 0.25 y el 2%, salvo algunos casos extraordinarios como aplicaciones de seguridad o militares pueden llegar hasta un 15% de fibras en el hormigón.

Según el ACI 5444.4R-88, 2009, el volumen de fibras no debe ser inferior al 0.5% ni la esbeltez inferior a 50, debido a que a rotura a flexotracción puede ser despreciable.

Rossi (2000) plantea que el efecto de las fibras en las diferentes etapas del proceso de figuración del hormigón se refleja en dos escalas:

- Material: la fase de figuración es aleatoria, las fibras cosen las fisuras activas y retardan el desarrollo, incrementando la resistencia y ductilidad a escala del material
- Estructural: las microfisuras se propagan y las fibras cosen las fisuras y así aportan mayor capacidad resistente y ductilidad a escala estructural.

Cuando la cuantía de fibras en el SFRC es baja (20 a 30 Kg/m³), pueden ser trabajados sin realizar ninguna modificación en la dosificación, es decir como en un hormigón tradicional, a medida que se aumenta la cantidad

de fibras a dosificar, la exigencia a los ajustes necesarios es mayor (Arango S. 2010). Estas modificaciones pasan principalmente por una limitación en el tamaño máximo de áridos, relación grava-arena inferiores, mayores cantidad de aditivos reductores de agua y mayor demanda de finos.

Componentes de la mezcla	Tamaño máximo de árido (mm)		
	10	20	40
Cemento (kg/m^3)	350-600	300-530	280-415
Agua/cemento	0.35-0.45	0.35-0.50	0.35-0.55
% árido fino-grueso	45-60	45-55	40-55
% aire ocluido	4-8	4-6	4-5
Fibras conformadas (V_f %)	0.4-1.0	0.3-0.8	0.2-0.7
Fibras planas (V_f %)	0.8-2.0	0.6-1.6	0.4-1.4

Ilustración 4: Recomendaciones de proporciones para dosificaciones de SFRC (ACI 544.1R-96, 2009)

Un mayor contenido de finos es aconsejable en el SFRC para reducir el riesgo de segregación, aumentar la cohesión y la movilidad de las fibras. La movilidad potencial de las fibras depende de la proporción y el tamaño máximo de los áridos, la JSCE (Japan Society of Civil Engineers) plantea un valor óptimo de tamaño máximo de áridos debe ser aproximadamente a la mitad de la longitud de la fibra (JSCE, 1984).

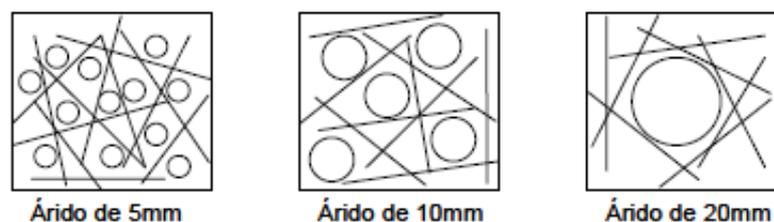


Ilustración 5: Efectos del tamaño del árido en la distribución de las fibras (Hannant, 1978)

Se recomiendan que el tamaño máximo de los áridos no supere:

- 2/3 de la longitud máxima de la fibra.
- 1/5 del lado del elemento
- 3/4 de la distancia libre entre la barras de armado

Al adicionar altas proporciones de fibras al SFRC estas sufren una reducción sustancial de docilidad, para contrarrestar este efecto se emplea superplastificantes durante el amasado, con el fin de no adicionar agua que pueda afectar la resistencia y durabilidad de la estructura.

2.1.3 Hormigón reforzado con fibras sintéticas (SNFRC)

La industria de la construcción desde 1990 ha mostrado un interés significativo en el uso de refuerzos con fibras de polímeros o sintéticas como una alternativa al refuerzo de acero en las estructuras de hormigón (B. Yu 2013), debido a la escases de acero en el mundo.

El hormigón reforzado con fibras sintéticas (SNFRC) poseen numerosas ventajas sobre SFRC, tales como: su peso ligero, alta resistencia y rigidez, baja conductividad, no dan problemas de interferencias electromagnéticas, excelente resistencia a la corrosión y alta durabilidad. Los SNFRC son empleados en piscinas, soleras, pavimentos, recubrimientos de túneles, paneles de fachada, hormigones proyectados, centrales eléctricas y otros.

Las fibras sintéticas en su composición química existen en dos grupos:

1. Poliolefinas o polialquenos: Se obtienen de la polimerización de olefina (alqueolos)
2. Poliamidas: Se obtienen de enlaces de Amida.

En función del trabajo realizado en esta investigación, estudiaremos solamente las fibras con carácter estructural tipo MACRO (de poliolefinas) y tipo MICRO (de polipropileno, grupo de las poliolefinas).

- Dentro de las desventajas de las fibras sintéticas tenemos las siguientes:
- El modulo elástico de los SNFRC es mucho menor que los SFRC, la cual conduce a una mayor desviación y ancho de la fisura.

- Son sensibles a la luz solar, se debe cuidar su almacenamiento y exposición.
- Poca adherencia a la matriz.
- Sensibilidad a las altas temperaturas.

La Normativa española UNE-EN 14889-2:2008 contempla estas fibras y se plantea los requisitos que deben cumplir así como la evaluación de la conformidad. Existen fibras de alto límite elástico (Fibras de Carbono, Aramida, etc.) la cual no se abordará en esta investigación.

Los SFRC son utilizados cada vez más en elementos constructivos pero todavía representa un reto formidable para los ingenieros, uno de los motivos por la cual se realiza esta investigación.

2.1.4 Otros tipos de fibras

Adicional a los SFRC y SNFRC existen otros tipos de fibras que se utilizan en sustituciones de cemento portland (no se aborda en este trabajo) como las siguientes:

- Fibras de vidrio: Se comenzó a utilizar en los años 50 como refuerzo de matices poliméricas (glass fiber cement, GRC) sin embargo, su bajo módulo de elasticidad y pérdida de propiedades (ductilidad y resistencia a la tracción) limitaron su uso.
- Fibras de asbesto: Este tipo de material está prohibido su utilización en la gran mayoría de los países por ser perjudicial a la salud (algunos estudios muestran que es un material cancerígeno).
- Fibras Naturales: Estas son de origen vegetal y se utiliza para fibro refuerzo de matices cementicos, sus aplicaciones están enfocados a construcciones de bajo coste y en países en vía de desarrollo.

2.1.5 Investigaciones actuales con fibras sintéticas

Investigaciones (Sivakumar A. 2007) con fibras sintéticas de polipropileno, han demostrado que la adiciones en volúmenes de 0,1-0,5% como refuerzo secundario en el hormigón, pueden mitigar las tensiones de tracción desarrolladas en el proceso de secado.

Otros estudios (Aly T. y Sanjayan JG. 2010) afirmaran que las adiciones de fibras de polipropileno aporta a la mejora de las propiedades resistentes a la formación de fisuras en el hormigón la edad temprana sin embargo, también registraron que las adiciones de dichas fibras de PP incrementaba la permeabilidad hormigón provocando una considerable pérdida de humedad, la cual tienden a aumentar las retracciones totales a edades posteriores.

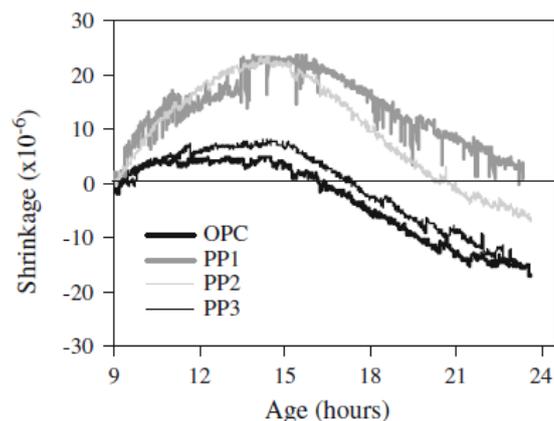


Ilustración 6: Pequeñas expansiones en las primeras 6 horas y las retracciones aparecen a las 9 horas (Aly T. y Sanjayan JG. 2010).

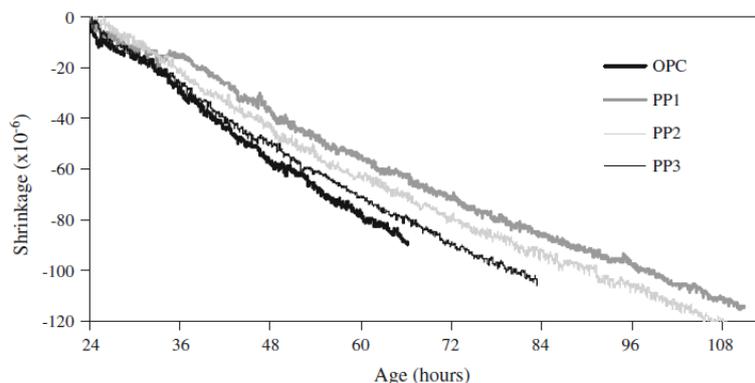


Ilustración 7: Aumento de retracción por permeabilidad en el hormigón por adición de fibras de polipropileno (Aly T. y Sanjayan JG. 2010).

2.2 Influencia de los componentes del hormigón.

2.2.1 Hidratación del cemento

El hormigón es material compuesto por agregados (arena y grava) y la pasta de cemento. El cemento al hidratarse produce una reacción química exotérmica, es decir que libera calor, y comienza a formar productos, en su mayoría silicatos cálcicos hidratados, que a su vez, comienza a formar un esqueleto micro estructural. Esta microestructura produce un aumento progresivo en el número de hidratos dentro del esqueleto poroso, a medida que esta va ganando silicatos de calcio hidratado, la mezcla gana resistencia. A continuación se representan la evolución de las fases de la hidratación del cemento.

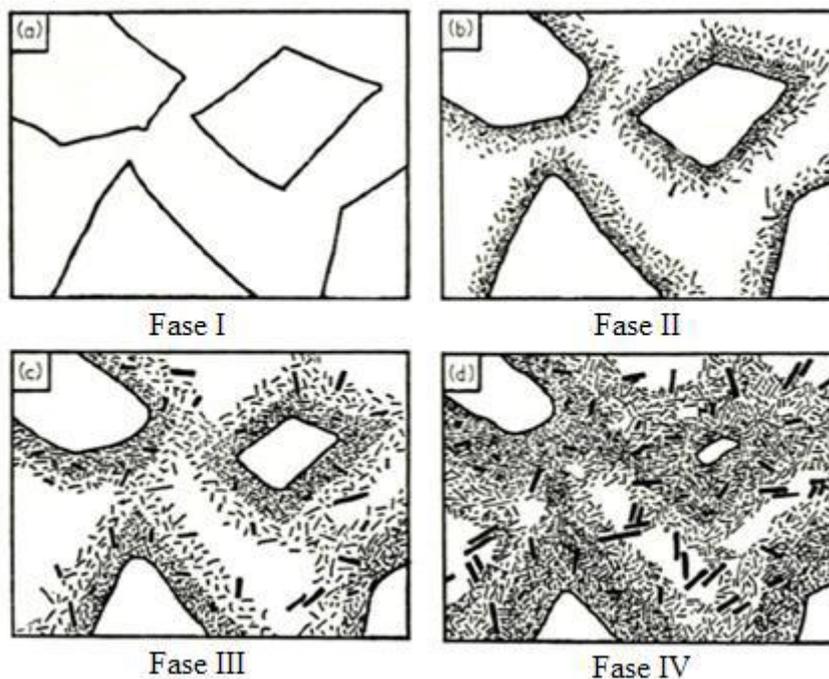


Ilustración 8: Cuatro fases de la evolución del cemento Portland hidratado. (Tomado de “Desarrollo y análisis de pavimentos Industriales desde el punto de vista de acabado superficial”)

Fase I, se observa los granos de Clinker dispersos sin reaccionar con el agua, minutos posterior, la hidratación se produce de fuera hacia dentro de la superficie de cada grano. Fase II, luego de unas horas, la capa que recubre los diferentes granos del clinker se forman una película de gel. Fase III, interactúan

las capas que recubren de los diferentes granos de clinker, volviéndose así un conjunto de geles (fraguado). Fase IV, surge una masificación de gel.

El calor total liberado viene condicionado por diferentes factores como: la finura del cemento y la presencia de productos químicos que forma el clinker. A continuación se muestra en detalle un gráfico cronológico de las etapas de la hidratación del cemento.

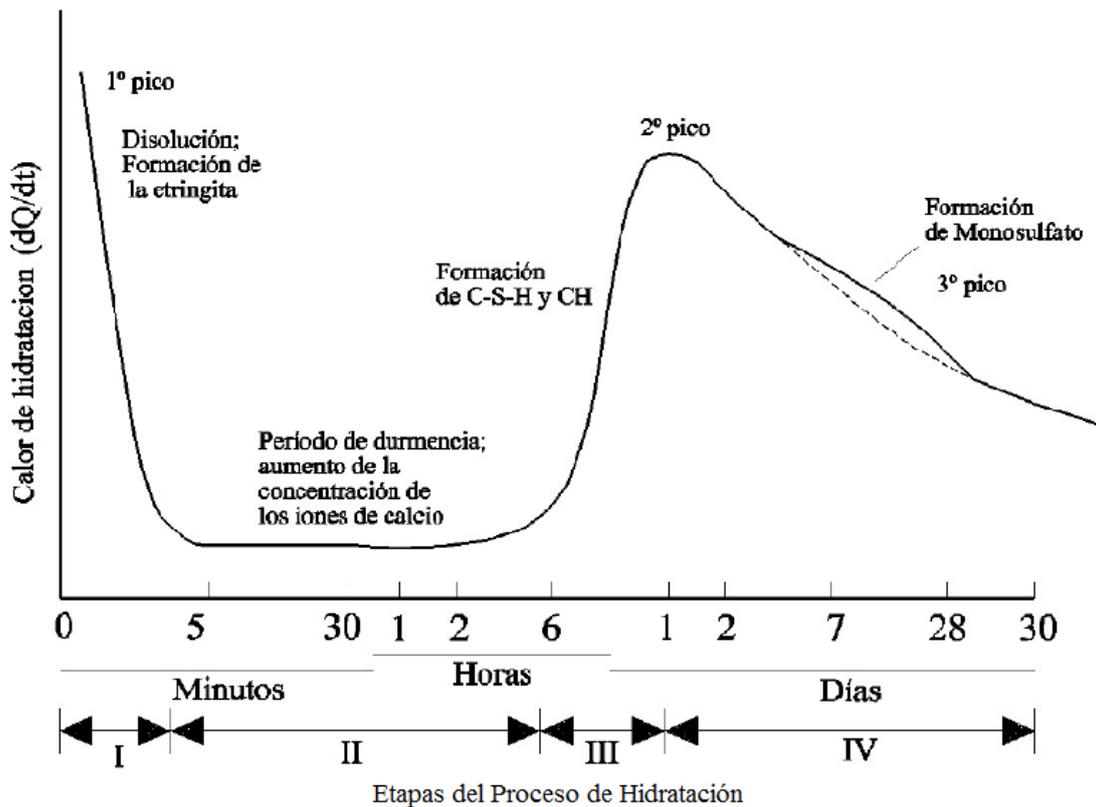


Ilustración 9: Etapas de la hidratación del cemento Portland. (Tomado de "Desarrollo y análisis de pavimentos Industriales desde el punto de vista de acabado superficial")

Etapa I: Reacción altamente exotérmica con un rápido incremento de calor que cesa a los 15-20 minutos debido a la formación de una membrana alrededor de los silicatos tricíclicos (C_3S) y aluminatos tricalcicos (C_3A).

Etapa II: Disminución significativa de la velocidad de los procesos de hidratación debido a la formación de las membranas alrededor de las partículas de gel que restringen el contacto de éstas con el agua exterior, posteriormente se forman los primeros hidratos y como consecuencia la micro estructura.

Etapa III: Los granos de cemento reaccionan desde la superficie hacia el interior, la parte anhidra va reduciéndose y ocurre el inicio del fraguado, el calor en la mezcla va aumentando hasta alcanzar un máximo, que corresponde el fin del fraguado.

Etapa IV: Los productos de la hidratación forman una densa corteza alrededor de las partículas originales, disminuyendo la velocidad de reacción y el calor periódicamente.

2.2.2 Cambios de volumen en el hormigón por la hidratación.

La influencia de los agregados como componentes en la generación de calor en la mezcla de hormigón, no es directa sin embargo, esta puede alterar la demanda de agua de la mezcla y la formación de productos en la hidratación del cemento. El agua de la mezcla puede estar en tres estados: químicamente combinada, absorbida físicamente en la superficie de gel tobermorítico y en el espacio externo a la atracción de las fuerzas superficiales.

En la mezcla de hormigón fresco, se puede considerar que, la diferencia de volúmenes entre los componentes separados y los productos durante las primeras horas es prácticamente nula como se presentan a continuación.

$$V_{H_2O} + V_C = V_V + V_a + V_g + V_{ph} + V_{nh}$$

Ecu.1

Dónde:

V_{H_2O} = Volumen de agua

V_C = Volumen de cemento

V_V = Volumen de vacíos en los poro capilares

V_a = Volumen de agua en los poro capilares

V_g = Volumen de agua en gel

V_{ph} = volumen de productos de hidratación sólidos

V_{nh} = Volumen de productos no hidratados.

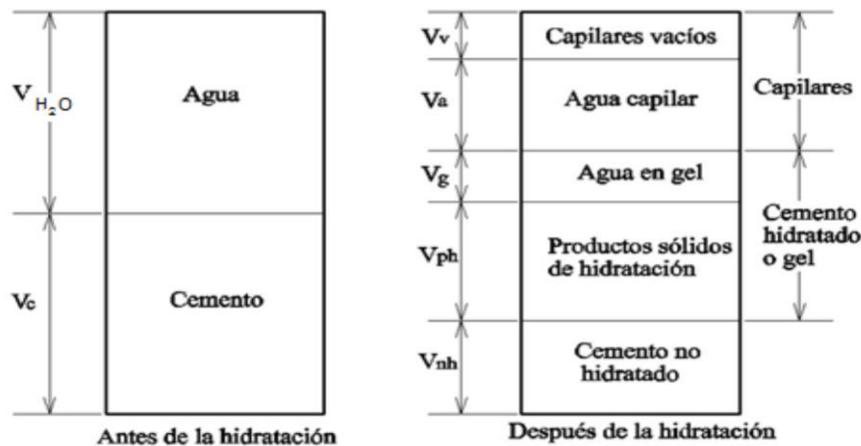


Ilustración 10: Representación esquemática de las proporciones volumétricas en la pasta de cemento antes y después de la hidratación.

Posterior a estas primeras horas ocurre un cambio de volumen, provocado por las reacción físico química de la pasta de cemento que se trasforma de estado blando ha endurecido que llamamos fraguado. La etapa de fraguado, normalmente dura pocas horas y el hormigón prácticamente no tiene resistencia mecánica, al finalizar esta etapa el hormigón endurece y comienza a ganar resistencia mecánica y se prolonga durante un lapso que dura meses, e incluso años.

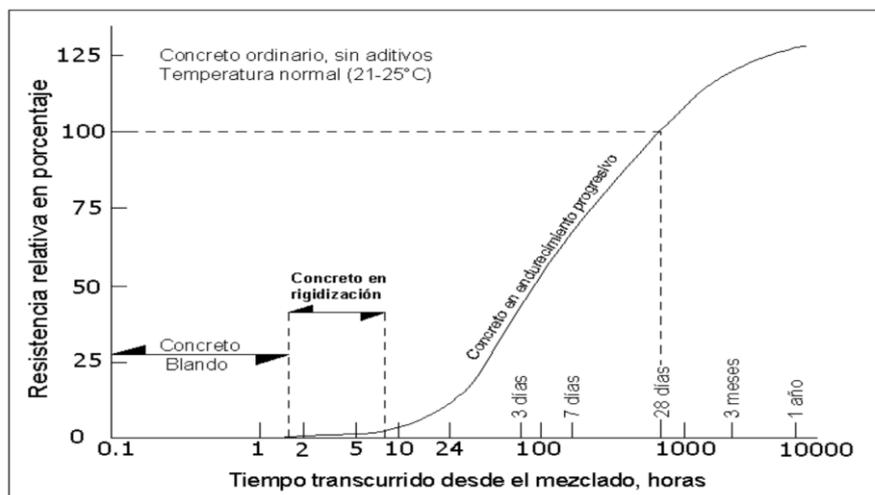


Ilustración 11: Resistencia mecánica, cambio de estado del hormigón (fraguado), posteriormente ocurre el rigidización, etapa tierna (verde) y etapa madura.

2.3 Retracción del hormigón

La retracción en el hormigón es un fenómeno inevitable, es la resultante de la reducción de volumen provocada por la hidratación de la pasta de cemento que ocupa menos espacio que los productos iniciales. La retracción también se debe en parte al secado, si la retracción es mayor que la que resiste el hormigón, está puede fisurar y afectar la durabilidad de la estructura.

Para mitigar este fenómeno, actualmente se utilizan mecanismos de control de fisura como: juntas de retracción, refuerzo del hormigón con fibras u otros elementos, limitaciones de espesores y control de la temperatura durante el vaciado. Todas estas técnicas acompañadas de un buen curado hacen constar que los ingenieros y constructores siempre han tenido en cuenta este fenómeno indeseado.

La retracción del hormigón se lleva en dos distintas etapas: edades tempranas y edades posteriores. La fase temprana se define comúnmente como el primer día (24 h.), mientras que el hormigón es puesto y se endurece. Edades posteriores o a largo plazo se refiere al hormigón posterior a las 24 horas, donde el hormigón se desmolda y la medición de las retracciones estandarizadas se lleva a cabo. La retracción a largo plazo es normalmente la que se trata en la mayoría de las literaturas, así como la parte donde se basa el diseño estructural tradicional.

Dentro de cada una de estas dos etapas de contracción hay varios tipos de cambios lineales que se pueden medir físicamente en un espécimen, principalmente la de secado y autógena. Además de las dos anteriores el hormigón también está sometido a reducción de volumen debido a los cambios térmicos y reacciones de carbonatación (E. Holt 2004). Los tipos de retracción se muestran en la siguiente figura.

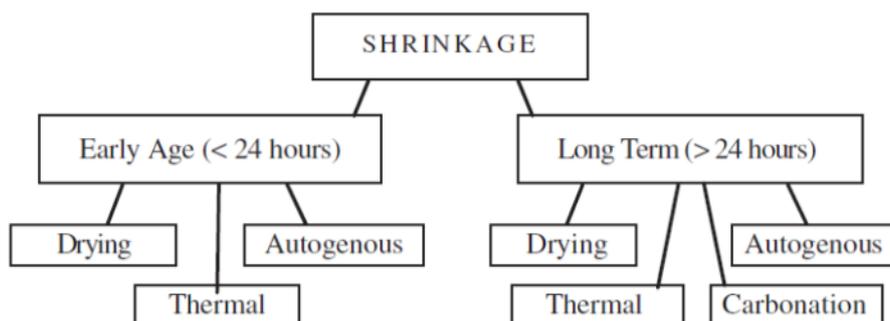


Ilustración 12: Clasificación de la retracción

2.3.1 Retracción del hormigón a edades tempranas.

Como se ha descrito en el párrafo anterior, es el cambio de volumen que presenta el hormigón antes de las 24 horas, donde aún se está hidratando y necesita de una fase de curado antes de adquirir su resistencia de diseño. Durante esta etapa es donde enfocaremos mayormente toda esta investigación.

La contracción a edad temprana es un tema de interés, ya que es durante estas primeras horas (inmediatamente después que ocurre la reacción de fusión provocado por la hidratación de la pasta de cemento) donde el hormigón tiene su capacidad resistente más baja y es más sensible a tensiones internas.

Las primeras fisuras resultantes son internas y microscópicas, una contracción en edad posterior puede simplemente abrir la fisura existente y causar problemas. Según estudios realizados por investigadores finlandeses (VTT) y otros organizaciones coinciden en que retracciones a tempranas edades con magnitudes de 1mm /m (1,000 $\mu \epsilon$) tienen un alto riesgo de formación de fisuras, esto coincide con las retracciones esperadas por la ACI (0,1-1,0 mm/m.) sin embargo, 1 mm/m es aproximadamente 10 veces la capacidad de deformación a tracción del hormigón a temprana edades.

Para comprender en detalle el fenómeno de retracción a temprana edad, a continuación se clasificara este fenómeno.

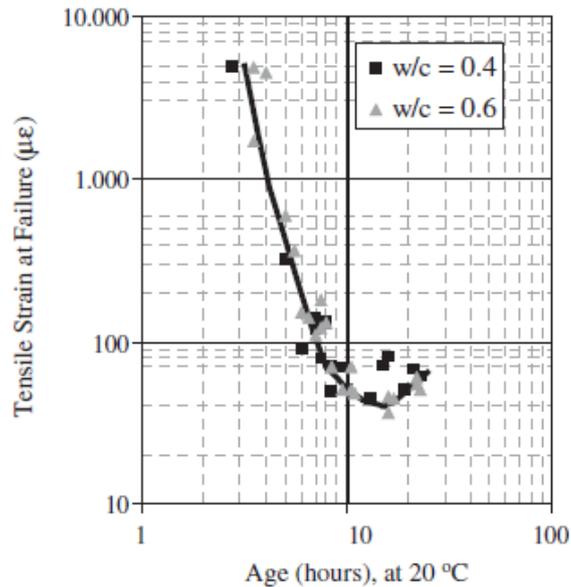


Ilustración 13: Caída de capacidad de deformación donde el hormigón es más sensible a las tensiones internas (Byfors 1980, KASAI 1972)

Retracción por secado:

Esta es provocada por la pérdida de agua del hormigón. En edades posteriores del hormigón (>24 h.) son medidos y registrados con frecuencia y sencillez, comúnmente se mide como la retracción total resultante de un cambio de longitud de una probeta después de un periodo de tiempo prescrito por una norma (ASTM C157). La mayoría de estos métodos no separa la retracción atribuida a los factores no secantes a temprana edad del hormigón.

Retracción Autógena:

La deformación autógena es la deformación general creada por la propia pasta de cemento, mortero o concreto durante el endurecimiento a una temperatura constante en condiciones selladas. Es un resultado de la contracción química afiliado con la hidratación de las partículas de cemento. La contracción química es una reducción de volumen interno, mientras que la contracción autógena es un cambio de volumen externo.

2.3.3 Fluencia y retracción del hormigón

Las deformaciones en el hormigón a lo largo del tiempo se pueden dividir en las siguientes partes: deformación elástica (producto de la puesta en carga), retracción (autógena y de secado) y fluencia (ARANGO S. 2010).

Fluencia es la deformación que depende del tiempo del hormigón bajo carga sostenida. La fluencia a temprana edad es de 3 a 5 veces más lenta a edad posterior. La magnitud de fluencia en tensión es mayor que la misma a compresión, a temprana edad puede ser considerada como un mecanismo de relajación de los esfuerzos.

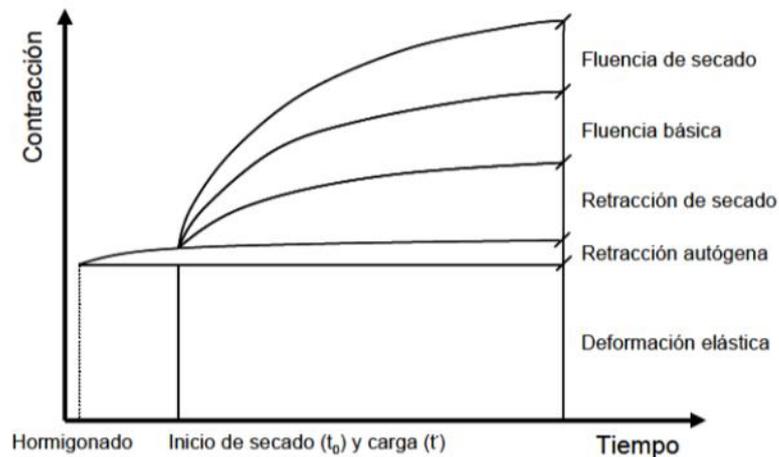


Ilustración 15: Deformaciones en el hormigón a lo largo del tiempo (López, 2005)

La fluencia y retracción pueden darse simultáneamente. Estos se originan en la pasta de cemento y tiene tendencias similares a lo largo del tiempo. Ha sido muy común considerar estos dos fenómenos como aditivos (Neville et al 1983). La fluencia está influenciada por el secado o auto-deshidratación en la edad temprana del hormigón, y esta sinergia se refiere a menudo como el efecto de Pickett.

2.3.4 Cálculo de retracción total

La normativa española (EHE-08 art. 39.7) calcula la retracción total compuesta por la reacción autógena y la retracción de secado. La deformación autógena se desarrolla durante el endurecimiento del hormigón, mientras la retracción por secado desarrolla latentemente.

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cd} + \epsilon_{ca} \quad \text{Ecu.2}$$

La componente de secado puede calcularse a lo largo de tiempo como:

$$\epsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t - t_s) \cdot k_e \cdot \epsilon_{cd,\infty} \quad \text{Ecu.3}$$

Dónde:

t = edad del hormigón en el instante de la evaluación, en días

t_s = edad del hormigón al comienzo de la retracción, en días

$$\beta_{ds}(t - t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04\sqrt{e^3}} \quad \text{Ecu.4}$$

$$e = \frac{2A_c}{u} \quad \text{Ecu.5}$$

e = espesor medio

A_c = área de la sección transversal

u = perímetro en contacto con la atmósfera

Tabla 39.7.a
Valores del coeficiente k_e

e (mm)	k_e
100	1,00
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

Ilustración 16: Valores del coeficiente "ke"

El coeficiente de reacción a tiempo infinito se obtiene como:

$$\varepsilon_{cd,\infty} = 0,85 \left[(220 + 110\alpha_{ds1}) \cdot \exp\left(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cm0}}\right) \right] \cdot 10^{-6} \beta_{HR}$$

Ecu.6

Para estructuras al aire (HR<99%)

$$\beta_{HR} = -1,55 \left[1 - \left(\frac{HR}{100} \right)^3 \right]$$

Ecu.7

Para estructuras sumergidas (HR>99%)

$$\beta_{HR} = 0,25$$

Ecu.8

$f_{cm0} = 10 \text{ N/mm}^2$

El coeficiente de retracción a tiempo infinito se obtiene con la siguiente expresión:

Tabla 39.7.b
Coeficientes α_{ds1} y α_{ds2}

	Endurecimiento lento	Endurecimiento normal	Endurecimiento rápido
α_{ds1}	3,00	4,00	6,00
α_{ds2}	0,13	0,12	0,11

Ilustración 17: Coeficiente ads1 y ads2

Por otra parte, la componente autógena puede calcularse como:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca,\infty} \quad \text{Ecu.9}$$

$$\varepsilon_{ca,\infty} = -2,5(f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \quad \text{Ecu.10}$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2t^{0,5}) \quad \text{Ecu. 11}$$

Para distintos valores de variables involucradas, el valor de deformación de retracción, a distintas edades, tomando como origen el final del curado a los 7 días, de acuerdo con el modelo propuesto para hormigones de peso normal, pueden obtenerse de las tablas 39.7 c y d. Las tablas corresponden a resistencias características 30 N/mm² y 70 N/mm², cemento de endurecimiento normal.

Tabla 39.7.c Valores de la retracción [10 ⁻⁶] para $f_{ck} = 30$ N/mm ²							Tabla 39.7.d Valores de la retracción [10 ⁻⁶] para $f_{ck} = 70$ N/mm ²						
t (días)	Humedad relativa (%)						t (días)	Humedad relativa (%)					
	50		70		90			50		70		90	
	Espesor medio [mm]							Espesor medio [mm]					
	50	600	50	600	50	600		50	600	50	600	50	600
14	-186	-30	-146	-29	-76	-28	14	-178	-81	-153	-81	-110	-80
30	-332	-46	-258	-43	-126	-37	30	-285	-108	-239	-106	-157	-102
90	-455	-84	-352	-74	-170	-55	90	-382	-153	-319	-147	-206	-136
365	-513	-177	-397	-145	-193	-88	365	-434	-226	-362	-206	-236	-171
1.825	-529	-305	-409	-242	-198	-129	1.825	-446	-308	-372	-268	-242	-199
10.000	-532	-369	-412	-289	-199	-149	10.000	-448	-347	-374	-298	-242	-211

Ilustración 18: Tabla de Valores de Retracción (EHE)

2.4 Cálculo del coeficiente de edad del hormigón

2.4.1 Coeficiente de edad a compresión y tracción

(EHE 08 art. 31.3)

La resistencia del hormigón a compresión típicamente se refiere a los resultados obtenidos en ensayos de rotura a compresión a 28 días, realizados sobre probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. A falta de datos la institución EHE admite valores de resistencia a t días a título indicativo por la siguiente expresión:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm} \quad \text{Ecu. 12}$$

$$f_{ct,m}(t) = \beta_{cc}(t)^\alpha f_{ct,m} \quad \text{Ecu. 13}$$

$$\beta_{cc} = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad \text{Ecu. 14}$$

β_{cc} = el coeficiente de edad del hormigón.

s = el coeficiente de velocidad de endurecimiento del cemento (art.26) que tiene los valores siguientes:

- 0,2 para cementos de endurecimiento rápido.
- 0,25 para cementos de endurecimiento normal.
- 0,38 para cementos de endurecimiento lento.

α = coeficiente que depende de la edad del hormigón que tiene los siguientes valores

- 1 si $t < 28$ días
- 2/3 si $t > 28$ días y $f_{ck} \leq 50 \text{ N/mm}^2$ a los 28 días
- 1/2 si $t > 28$ días y $f_{ck} \geq 50 \text{ N/mm}^2$ a los 28 días

El código modelo 2010 (artículo 5.1.93) y Eurocódigo 2 (capítulo 3.1.1) tienen la misma expresión de cálculos de resistencia a compresión a edad t , salvo algunas modificaciones en la resistencia a tracción en el eurocódigo2 para hormigón de alta resistencia (>50 MPa.).

2.4.2 Coeficiente de edad del módulo de elasticidad

A diferencia del cálculo de resistencia a compresión, existe diferencias en el cálculo del módulo de elasticidad entre la EHE, Eurocodigo2 y Código modelo, se utilizan las siguientes expresiones para el cálculo del módulo de deformación (módulo de elasticidad) a edades diferentes a 28 días:

EHE (artículo 39.6),

$$E_{cm} = 8.500 \sqrt[3]{f_{cm}} \quad E_{cm} \text{ en MPa. Ecu. 15}$$

Eurocodigo2 (capítulo 3.1.3 tabla 3.1)

$$E_{cm} = 22[(f_{cm})/10]^{0,3} \quad E_{cm} \text{ en GPa. Ecu. 16}$$

$(f_{cm} \text{ en MPa})$

Código Modelo (5.1-21)

$$E_{ci} = E_{c0} \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck} + \Delta f}{10} \right)^{1/3} \quad E_{ci} \text{ en MPa. Ecu. 17}$$

E_{ci} = módulo elástico del hormigón a 28 días.

Δf = 8MPa.

E_{c0} = 21,5 x10³ MPa.

α_E = coeficiente que depende del origen del agregado (ver Tabla 2.5.2)

Types of aggregate	α_E	$E_{co} \cdot \alpha_E$ [MPa]
Basalt, dense limestone aggregates	1.2	25800
Quartzite aggregates	1.0	21500
Limestone aggregates	0.9	19400
Sandstone aggregates	0.7	15100

Ilustración 19: coeficiente que depende del origen del agregado

Cuando el módulo de elasticidad es diferente a 28 días, se puede estimar la variación con la siguiente ecuación, donde el EHE y Código modelo son similares.

EHE

$$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{c,m}} \right)^{0,3} E_{cm}$$

Ecu. 18

Eurocódigo

$$E_{cm}(t) = \left(f_{cm}(t) / f_{cm} \right)^{0,3} E_{cm}$$

El Código modelo varia el cálculo con la siguiente expresión

$$E_{ci}(t) = \beta_E(t) E_{ci} \quad \text{Ecu. 19}$$

$$\beta_E(t) = [\beta_{cc}(t)]^{0,5}$$

Ecu. 20

Donde β_{cc} es el coeficiente de edad (el mismo de compresión)

2.5 Interrogantes sin resolver.

Con la introducción en el mercado de nuevos productos para el hormigón como: aditivos de última generación, sustituciones en el cemento y distintos tipos de fibras, quedan algunas interrogantes sin resolver, se listan a continuación:

- La validez de las teorías de Neville et al (1983) de fluencia y retracción con relaciones de agua / cemento elevadas y uso de aditivos en hormigones autocompactantes.
- La evolución de resistencia mecánica o los coeficientes edad del hormigón ¿son extrapolables a temprana edades? ¿Los valores son conservadores?
- ¿El uso de aditivos pueden variar el coeficiente de edad del hormigón?
- ¿Pueden las fibras mitigar los efectos de la retracción con relaciones A/C elevadas en el hormigón autocompactante?
- ¿La adherencia fibra y hormigón a temprana edad es efectiva?

3. CAPÍTULO III PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Programa general

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

Como se describió en capítulo 1, el objetivo es realizar 5 tipos de ensayos (3 tipo mecánico y 2 pasivos o de retracción) a edad temprana y posterior (10, 12, 24, 48 h. y 28 días) con 28 tipos de hormigón (14 tradicional y 14 autocompactante) de dos resistencia (25 y 40 MPa).

En este estudio se ha realizado un total de 968 ensayos, aproximadamente 4 metros cúbicos de hormigón, las cuales se detallan a continuación.

CANTIDAD DE ENSAYOS REALIZADOS					
ENSAYOS	tipos de hormigón	probetas por ensayo	datos por ensayos	Volumen de cada probeta (L.)	Volumen (L.)
modulo	28	12	336	6	2016
compresión	28	12	336		
flexo tracción	24	6	144	5	720
anillo	4	2	8	7	56
retracción libre	24	6	144	5	720
TOTAL			968		3512 L.

Tabla 4.1 (En esta tabla no se incluye el desperdicio)

En el hormigón se adicionaran tres tipos diferentes de fibras las cuales se especificaran a continuación:

- 1) DRAMIX RC-65/60 BN, fibra metálica de alambre estirado en frio.
- 2) SikaFiber M, Macro-fibra sintética con carácter estructural, 100% poliolefina.
- 3) CHRYSO Fiber P31, Fibra sintética de polipropileno, no estructural.

proporción de fibras a utilizar				
adición #	tipo de fibras	densidad de la fibras (Kg/m3)	Dosificación (Kg. fibras/ m3)	% (V. fibras / V. hormigón)
1	metálica	7850	30	0,40%
2	poliolefina	910	3	0,35%
3	polipropileno	910	3	0,35%
5	metálica	7850	60	0,80%
6	poliolefina	910	6	0,70%
7	polipropileno	910	6	0,70%

Ilustración 20: Tabla de proporción de fibras



Ilustración 21: Fibras de refuerzo utilizadas para los ensayos: 1) Metálica 2) Sintética macro 3) Sintética micro

3.2 Plan de trabajo

Esta investigación propone realizar una misma amasada por cada tipo de hormigón sin embargo, se divide en dos etapas, cada etapa incluye un ciclo de ensayo limitado principalmente por factores como: la capacidad de la amasadora, disponibilidad de los instrumentos de laboratorio, organización de las horas de trabajo necesarias para cada ensayo. Se divide de la siguiente forma:

1) ETAPA 1: Se realiza en el mismo amasado el hormigón necesario para estos dos ensayos:

- Ensayo de resistencia a compresión. (UNE-EN 12390-3)
- Ensayo de módulo de elasticidad. (UNE 83316)

(Se midió la consistencia de cada amasada con el cono de Abram's)

LIMITACIONES DE LA ETAPA 1:

- Disponibilidad de los moldes: 12 probetas cilíndricas de $\phi 150\text{mm}$ x 300mm
- Capacidad máxima por amasadora: 85 litros por amasada.
- Equipo de ensayo de resistencia a compresión y módulo de elasticidad: 1 equipo disponible marca IBERTEST.
- Cámara de curado a 100% H.R. y 20 °C.: (disponible.)

2) ETAPA 2: Se realiza en el mismo amasado el hormigón necesario para estos tres ensayos:

- Ensayo de Flexo tracción. (UNE-EN 14651)
- Ensayo de contracción libre por secado. (ASTM C157)
- Ensayo de anillo de contracción restringido. (ASTM C1581)

LIMITACIONES DE LA ETAPA 2:

- Disponibilidad de los moldes: 7 moldes prismáticos de 100mm. x 500mm. 4 moldes de anillo restringido (se tuvo que mandar a hacer nuevos en taller)
- Capacidad máxima por amasadora: 40 litros por amasada.
- Equipo de ensayo de resistencia a tracción por flexión: 1 equipo disponible marca INSTRON.
- Cámara de curado a 100% H.R. y 20 °C: (disponible)
- Cámara de retracción 50% H.R. y 23 °C: (no disponible.)

3.3 Procedimiento de trabajo

Con el fin de optimizar el tiempo de trabajo en laboratorio se realizó una planificación y un calendario de trabajo por etapa, se describen a continuación:

1) PLAN DE TRABAJO ETAPA 1

(Ensayo de resistencia a compresión y módulo de elasticidad):

Día 1: (pre amasado)

- Pesar y separar los áridos, cemento, filler y fibras de refuerzo.
- Sacar muestras de humedad de los áridos.
- Cubrir los materiales con plástico para el día siguiente.

Día 2: (amasado y ensayo a temprana edad)

- Corregir el agua por la humedad de los áridos.
- Colocar desencofraste a los moldes cilíndricos
- Amasar el hormigón.
- Realizar prueba de consistencia (cono de Abram's para los hormigones tradicionales o mesa de escurrimiento para los autocompactentes)
- Vertido y colocación de hormigón a los moldes.

- Procedimiento de compactación manual con 25 varillados por cada 1/3 de capa y 5 segundos en mesa de vibración mecánica (solo para el hormigón tradicional)
- Desencofrar 6 horas después del fin de amasado.
- Colocar todas las probetas que no se ensayen el mismo día a la cámara de curado.
- Ensayar modulo elástico a 10 y 12 horas (aplicando una carga inferior al 1/3 de la resistencia máxima)
- Ensayar a compresión a 10 y 12 horas (utilizando las probetas del módulo)

Día 3: (ensayo a 24 h.)

- Ensayar modulo elástico a 24 horas
- Ensayar a compresión a 24 horas

Día 29: (ensayo de control a 28 días)

- Ensayar modulo elástico a 28 días
- Ensayar a compresión a 28 días

FIN DE CICLO, Repetir este calendario con 28 tipos de hormigón.

2) PLAN DE TRABAJO ETAPA 2

(ensayo de resistencia a Flexo tracción, Retracción restringida y retracción libre):

Día 1: (pre amasado)

- Pesar y separar los áridos, cemento, filler y fibras de refuerzo.
- Sacar muestras de humedad de los áridos.
- Cubrir los materiales con plástico para el día siguiente.

Día 2: (amasado y ensayo a temprana edad)

- Corregir el agua por la humedad de los áridos.
- Colocar desencofraste a los moldes prismáticos.
- Amasar el hormigón.

- Vertido y colocación de hormigón a los moldes (7 prismáticos + 1 anillo restringido)
- Procedimiento de compactación manual con 25 varillados por cada 1/3 de capa y 5 segundos en mesa de vibración mecánica (solo para el hormigón tradicional), para el anillo restringido 75 varillados cada ½ capa.
- Cubrir las muestras de anillo restringido con plástico para evitar la evaporación.
- Desencofrar a 16 horas después del fin de amasado.
- Colocar todas las probetas que no se ensayen el mismo día a la cámara de curado.
- Quitar el plástico y el anillo exterior a la muestra de anillo restringido.
- Realizar las entallas a las probetas prismáticas y colocar instrumentación.
- Ensayar modulo a flexo tracción a 18 horas.
- Colocar puntos de DEMEC a las probetas de retracción, tomar lectura inicial y colocar las probetas a la cámara de retracción.

Día 2: (ensayo a 24 h.)

- Realizar las entallas a las probetas prismáticas y colocar instrumentación.
- Ensayar flexo tracción a 24 horas.

Leer retracción con el DEMEC, anotar temperatura y humedad de la cámara.

Día 29: (ensayo de control a 28 días)

- Ensayar modulo elástico a 28 días
- Ensayar a compresión a 28 días
- Leer retracción con el DEMEC, anotar temperatura y humedad de la cámara.

FIN DE CICLO, Repetir este calendario con 28 tipos de hormigón.

4. CAPÍTULO IV PROCEDIMIENTO OPERATIVO DE ENSAYO

En este capítulo se detalla el procedimiento y tipo de ensayo realizado en este trabajo, comenzando con el estudio granulométrico de los agregados, continuando con el diseño de mezcla, hormigonado, toma de muestras y finalizando con los ensayos mecánicos. Se detallan a continuación:

4.1 Estudios preliminares

4.1.1 Estudio Granulometría de los Áridos

La determinación de las propiedades geométricas de los áridos es esencial en el diseño de mezcla del hormigón. Se utiliza la norma española UNE-EN 933-1 (Determinación de las propiedades geométricas de los áridos, Método del tamizado), la cual describe el procedimiento de ensayo resumido a continuación:

Nota: El tamizado en vía seca sin lavado puede utilizarse para áridos libres de partículas que causen conglomeración.

LAVADO:

1. Se saca una muestra de cada árido (arena, grava 4/7, 7/12 y 12/20), el volumen mínimo de muestra está estipulado según la tabla 1 UNE-EN 933-1.

Tabla 1 – Tamaño mínimo de las muestras de ensayo

Tamaño del árido <i>D</i> (máximo) mm	Masa del árido kg	Volumen de áridos ligeros (litros)
90	80	–
32	10	2,1
16	2,6	1,7
8	0,6	0,8
≤ 4	0,2	0,3

Ilustración 22: Tabla de tamaño mínimo de las muestras de ensayo.

2. Se coloca la muestra en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta que la masa permanezca constante.
3. Se deja enfriar, se pesa y se registra su masa como M1.

4. Se procede a lavar la muestra con abundante agua.
5. Se seca el residuo retenido por el tamiz 0,063 mm.
6. Se coloca la muestra lavada en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta que la masa permanezca constante.
7. Se deja enfriar la muestra, se pesa y se registra su masa como M2.

TAMIZADO:

8. Se tamiza la muestra con la serie de tamaño nominal de las aberturas y cualquier otro tamiz necesario (UNE 933-2), la serie designa los tamaños 0,063 mm; 0,125; 0,250; 0,500 mm; 1 mm; 2 mm; 4 mm; 8 mm; 16 mm; 31,5 mm; 16 mm; 63 mm; 125 mm. (en nuestro ensayo incluimos tamices de tamaños de 5 mm; 10 mm; 12,5 mm; 16 mm)
9. Se pesa el material retenido en cada tamiz.

CÁLCULO:

10. Calculamos el porcentaje de finos que pasa el tamiz de 0,063 mm. con la siguiente ecuación.

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 \quad \text{Ecu. 21}$$

11. Graficamos los resultados en escala semi logarítmica.

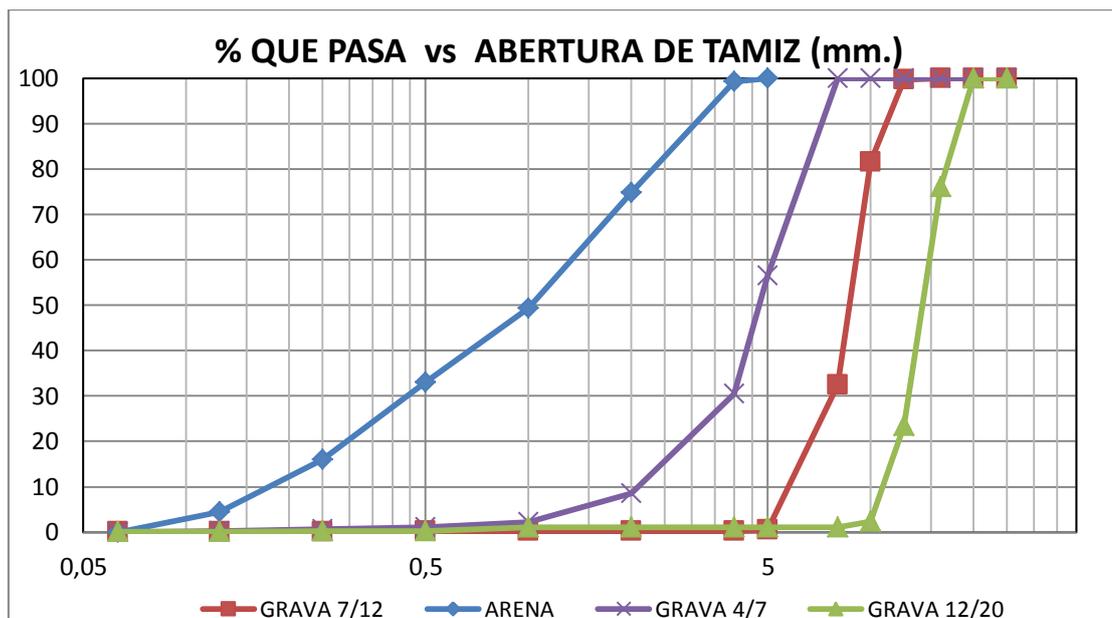


Ilustración 23: Curva granulométrica de los áridos utilizados

4.1.2 Diseño de mezcla de hormigón

Obtenido el estudio granulométrico de los áridos procedemos a diseñar la mezcla del hormigón. Los parámetros restrictivos para el hormigón son:

➤ **Hormigón de 25 MPa:**

- $D_{\max} = 20$ mm.
- Asiento con cono de Abram's = 10 cm. (hormigón tradicional, H25)
- Consistencia 600 mm. (hormigón Autocompactante, HAC25)
- CEM II 42,5R (disponible en laboratorio)
- 195 L. a 200 L. agua por $/m^3$ (experiencia satisfactorias de laboratorio)

➤ **Hormigón de 40 MPa:**

- $D_{\max} = 12$ mm.
- Asiento con cono de Abram's = 10 cm. (hormigón tradicional, H40)
- Consistencia 600 mm. (hormigón autocompactante, HAC40)
- CEM II 42,5R (disponible en laboratorio)
- 195 L. a 210 L. agua por $/m^3$ (experiencia satisfactorias de laboratorio)

La resistencia del hormigón depende la relación agua/cemento, utilizando como referencia las ecuaciones de Carlos de la Peña con cementos españoles:

$$Z = K \cdot f_{cm} + 0,5 \quad \text{Ecu.22}$$

Realizando un tanteo con los kilogramos de cemento y cuidando que la relación a/c no sea mayor a (según EHE-08 37.3.2.a) despejamos la resistencia media en la siguiente tabla:

TANTEO POR METODO DE LA PEÑA				
	Agua	Cemento	A/C	F _{cm}
H 25	195	265	0,74	29
HAC 25	210	285	0,74	29
H 40	195	360	0,54	40
HAC 40	210	360	0,58	45

Ilustración 24: Cuadro Tanteo de resistencia (En todos los caso la fcm es mayor a la de diseño, cumpliendo nuestros objetivos)

Para obtener un esqueleto granular continuo, utilizamos un ajuste por mínimos cuadrados tomando como referencia las curvas de Bolomey con coeficientes $a = 13, 18, 14,20$ respectivamente, limitamos los kilogramos de cemento a lo estipulado anteriormente y adicionando filler calizo en caso de requerir más finos, obtenemos las siguientes dosificaciones en peso seco de material:

H 25			
a BOLOMEY =	13		
AGUA=		195	L.
CEM II 42,5 =		265	Kg.
GRAVA	12/20	566,3	Kg.
GRAVA	7/12	0,0	Kg.
GRAVA	4/7	567,9	Kg.
ARENA	RODADA	757,1	Kg.
FILLER		56,2	Kg.
PESO POR M ³		2407,5	Kg./m ³

HAC 25			
a BOLOMEY =	18		
AGUA=		210	L.
CEM II 42,5 =		285	Kg.
GRAVA	12/20	524,1	Kg.
GRAVA	7/12	0,0	Kg.
GRAVA	4/7	525,6	Kg.
ARENA	RODADA	700,7	Kg.
FILLER		173,0	Kg.
PESO POR M ³		2418,3	Kg./m ³

H 40			
a BOLOMEY =	14		
AGUA=		195	L.
CEM II 42,5 =		360	Kg.
GRAVA	12/20	0,0	Kg.
GRAVA	7/12	216,5	Kg.
GRAVA	4/7	696,5	Kg.
ARENA	RODADA	938,0	Kg.
FILLER		0,0	Kg.
PESO POR M ³		2406,0	Kg./m ³

HAC 40			
a BOLOMEY =	20		
AGUA=		210	L.
CEM II 42,5 =		360	Kg.
GRAVA	12/20	0,0	Kg.
GRAVA	7/12	205,0	Kg.
GRAVA	4/7	620,0	Kg.
ARENA	RODADA	885,0	Kg.
FILLER		140,0	Kg.
PESO POR M ³		2420,0	Kg./m ³

Ilustración 25: Tabla Resultado de Diseño de Mezcla

Nota: la relación A/C de 0,74 son superiores a las recomendadas, se procedió de esta manera con el propósito de obtener hormigones con las resistencias de diseño utilizando el tipo de cemento disponible en el laboratorio (CEM II 42,5 R).

Para ajustar la trazabilidad y la fabricación de hormigones autocompactantes se utilizó un aditivo supeplastificante de altas prestaciones de 3ra generación, Marca SIKA Viscocrete 20 HE, con una proporción de 0,5% a 1,5% del peso del conglomerante como indica el fabricante. No se hicieron modificaciones en la granulometría por la adición de fibras (bajo % de fibras). A continuación se muestran la curva mezcla, la curva de Bolomey y la desviación estándar (DS) de los hormigones diseñados.

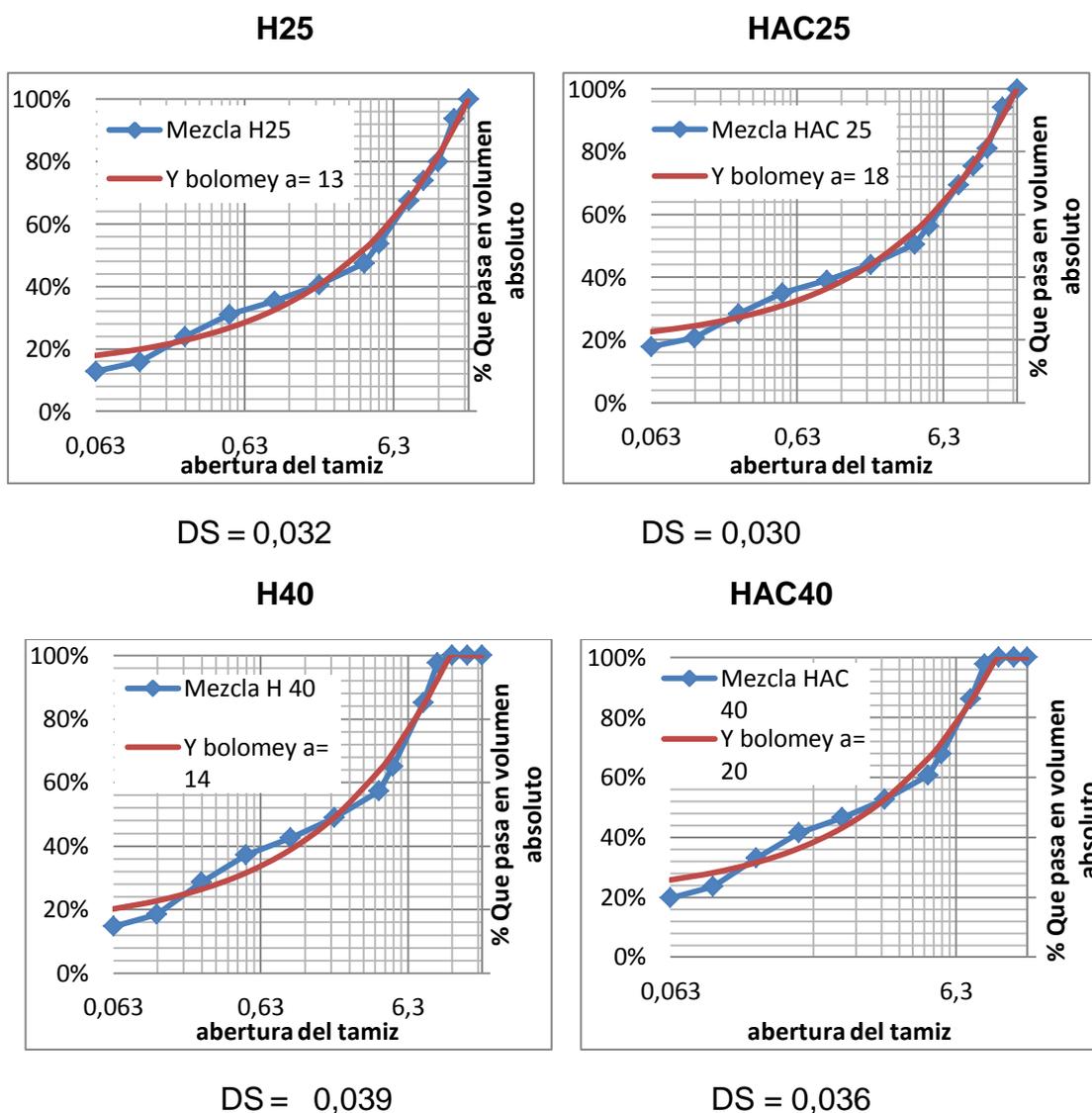


Ilustración 26: Curva mezcla granulométrica

4.2 Amasado

El procedimiento de amasado se ha establecido fijando unos tiempos de amasado (el procedimiento depende del modelo y la velocidad de la amasadora, en nuestro caso la amasadora de hormigón de eje central vertical con tambor fijo), controlando la velocidad de vertido del agua y de las fibras evitando la formación de erizos o paletos de fibras, los áridos deben estar previamente pesados y con la humedad corregida. Se ha establecido dos tipos de amasado, uno para el hormigón tradicional y otro para el hormigón autocompactante.

➤ **Tiempo de amasado par hormigón tradicional:**

Minuto 0: adición de grava y arena.

Minuto 1: adición de cemento.

Minuto 5: adición del agua total (vertido lento).

Minuto 6: adición del aditivo supe plastificante (vertido lento)

Minuto 10: adición de las fibras (esparciendo con la mano lentamente)

Minuto 14: Fin de amasado. (se examina si la mezcla esta homogénea y se toma un control de la consistencia)

El control de la consistencia del hormigón fresco se ha realizado mediante el método del cono de Abram's (UNE-EN 12350-2-2006)

➤ **Tiempo de amasado par hormigón autocompactante:**

Minuto 0: adición de grava, arena y ½ porción del agua total.

Minuto 15: adición de cemento.

Minuto 16: adición del ½ porción del agua total (vertido lento).

Minuto 17: adición del aditivo supe plastificante (vertido lento)

Minuto 21: adición de las fibras (esparciendo con la mano lentamente)

Minuto 25: Fin de amasado. (se examina si la mezcla esta homogénea y se toma un control de la consistencia)

El control de la consistencia del hormigón fresco se ha realizado con la mesa de consistencia, se miden los diámetros perpendiculares y se promedian.

4.2.1 Toma de muestra

Los ensayos de hormigón fresco así como la toma de muestra están regulados por la UNE-EN 12350-1. En este trabaja se ha utilizado tres tipos de moldes: cilíndrico, prismático y de anillo restringido. A continuación describiremos las dimensiones de las probetas utilizadas así como el método de compactación empleado en este estudio.

➤ **Molde cilíndrico Ø 150 mm. x 300 mm.**

Son utilizados para ensayos de resistencia a la compresión y módulo de Young. Antes de usar los moldes se debe verificar que estén bien cerrados y aplicar desencófrate con moderación. Se compactan manualmente en tres capas y 25 varillados en cada capa, al final se colocan los moldes en una superficie nivelada y se enrazan con una llana de metal. En el hormigón de tipo autocompactante se omiten los varillados

Molde prismático de 100 mm. x 100 mm. x 500 mm.

Son utilizados para los ensayos de flexo tracción y retracción libre. Antes de usar los moldes se debe verificar que estén bien cerrados y aplicar desencófrate con moderación. Se coloca hormigón primero en la zona central (1) y luego en las zonas externas (2) hasta aproximadamente un 90%, se compacta mediante vibración externa durante 10 segundos, se rellena el hormigón faltante, se colocan en una superficie a nivel y se enrazan con una llana de metal. En el hormigón de tipo autocompactante se omiten la vibración externa.

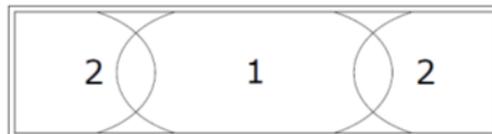


Ilustración 27: Toma de muestra, probeta prismática

➤ **Molde de Anillo restringido de \varnothing int 305 mm. x \varnothing ext 400 mm. x 140 mm.**

Son utilizados para los ensayos de retracción restringida. Antes de usar los moldes se debe verificar que estén bien cerrados y aplicar desencófrate con moderación. Se coloca hormigón en dos capa con 75 varillados en cada capa, luego se le coloca vibración externa durante 5 segundos, se colocan en una superficie a nivel se cubre con un plástico para que mantenga la humedad. En el hormigón de tipo autocompactante se omiten los varillados.

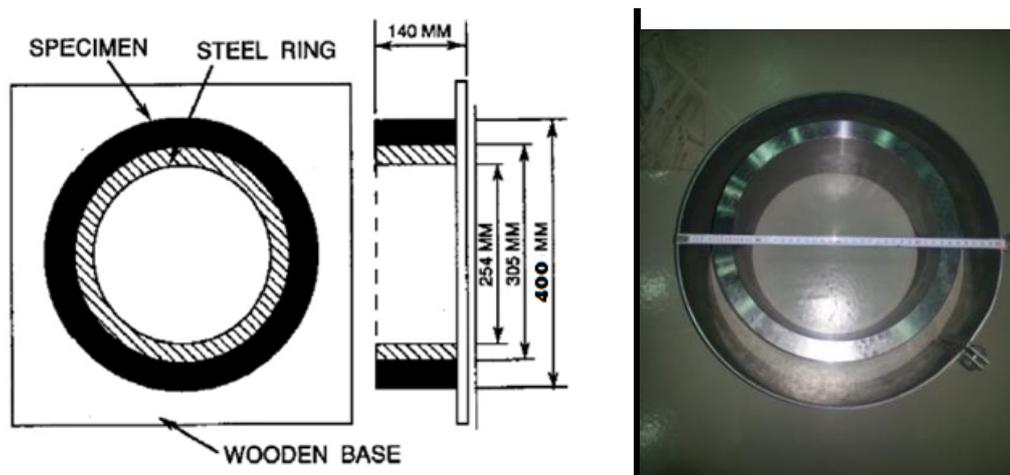


Ilustración 28: Dimensiones del molde de anillo restringido.

4.2.2 Asiento con el cono de Abram's (UNE-EN 12350-2-2006)

Este ensayo se realiza para determinar el asiento del hormigón tradicional, se realiza en una superficie a nivel colocando hormigón dentro del cono en tres capas con 25 varillados entre cada capa, se limpia el extenso en el borde superior del cono con la varilla y a continuación se extrae el cono lentamente hacia arriba, se invierte el molde del cono sobre la misma superficie y se mide la distancia del cono a la muestra de hormigón.



Ilustración 29: Prueba de asiento con cono de Abram's

4.2.3 Ensayo de extensión de flujo para hormigón autocompactante

A diferencia del hormigón tradicional, el hormigón Autocompactante no se puede medir el asiento con el cono de Abram's, para ellos se modifica el ensayo colocando el cono sobre una mesa a nivel, se vierte el hormigón con un cubo estándar y no se vibra de ninguna manera, se levanta el cono, se mide los diámetros perpendicularmente y se promedia la media.



Ilustración 30: Escurrimiento de hormigón autocompactante

4.3 Ensayos mecánicos

En este capítulo se detalla los ensayos mecánicos realizado, la instrumentación, preparación del equipo de adquisición de datos y parámetros del ensayo.

4.3.1 Ensayo de rotura por compresión y módulo de Young

Para la realización de este ensayo se utiliza una máquina de ensayos que cumple con las especificaciones de la Norma UNE 83304, capaz de aplicar la carga de ensayo con la velocidad especificada.

Se utilizó una Presa servocontrolada Ibertest, modelo MEH-3000-LCMD2W de 3000 kN. Todos los parámetros vienen previamente programados, solo fue necesario introducir las dimensiones de la probeta, seleccionar la norma a utilizar.

Durante los ensayos a edades tempranas, se omitió la colocación del refrenado a las probetas, debido a la debilidad del hormigón y su humedad superficial imposibilitaba el hecho.

Para obtener resultados más consistentes, todas las probetas del mismo tipo de hormigón se realizaron en la misma amasada. Primero se ensaya la probeta #1 a compresión y posteriormente con la probeta #2 se ensaya el

Modulo de Young programando la carga máxima de la probeta #1 y así sucesivamente.

Para ambos ensayos se utilizó las siguientes normas:

UNE 83304- Ensayo de hormigón. Rotura por compresión.

UNE 83316- Determinación del módulo de elasticidad en compresión



Ilustración 31: Ibertest, modelo MEH-3000-LCMD2W

4.3.2 Ensayo de resistencia a tracción por flexión en hormigón con fibras.

Este ensayo proporciona un método de determinación de la resistencia a la tracción por flexión del hormigón con fibras, también permite determinar el límite de proporcionalidad (LOP) y un conjunto de valores de resistencia residual a tracción por flexión (UNE-EN 14651).

El comportamiento a tracción del hormigón con fibras se evalúa en términos de valor de resistencia residual a la tracción por flexión determinados a partir de la curva carga-desplazamiento del borde de la fisura o de la curva carga-flecha, obtenida aplicando una carga puntual centrada sobre un prisma con entalla simplemente apoyado. En nuestro caso las probetas son de 100

mm x 100 mm x 500 mm; la luz de apoyo es de 350 mm; la entalla de 18 mm; el captador de desplazamiento se coloca en la parte inferior en posición horizontal.

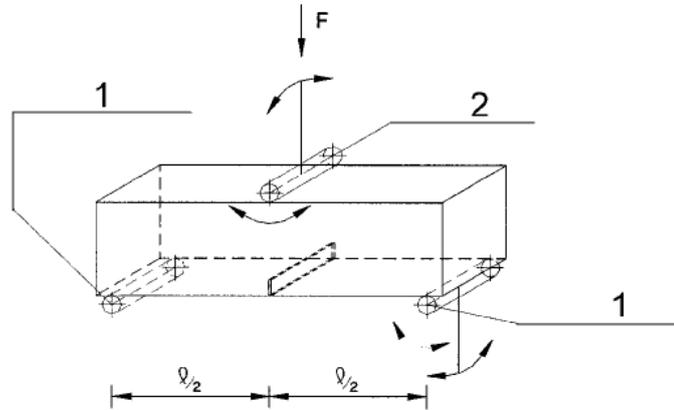


Ilustración 32: 1) Rodillo de apoyo 2) rodillo de carga

Para este ensayo se utilizó una Máquina de prueba universal de flexotracción, modelo INSTRON 3382, un equipo de adquisición (EAD) y transductores de fuerza (célula de carga) y desplazamiento (captador extenso métrico), el software de recopilación de datos utilizado fue creado por técnicos de la ICITECH.



Ilustración 33: Probeta ensayada apoyada en 3 puntos con entalla central. Transductor de desplazamiento en la parte inferior de la viga.

4.4 Ensayos de retracción

En este capítulo se detalla los ensayos de retracción realizada. Todos los ensayos de retracción se deben realizar en una cámara con temperatura y humedad controlada (23 C y 50% RH.) de acuerdo con la norma ASTM C150 y ASTM C1581 sin embargo, las limitaciones de laboratorio se tuvo que modificar las condiciones que se especifican a continuación.

4.4.1 Retracción libre total (ASTM C150)

Una vez el espécimen haya sido elaborado como se indica en el capítulo anterior, 16 horas después del fin de amasado se procede con mucho cuidado a desmoldar la probeta. Se coloca cuatro chapitas de control de desplazamiento (puntos de DEMEK) espaciadas a 100 milímetros en el eje central utilizando el espaciador macho del DEMEK, se registra manualmente la fecha, hora, medida inicial, humedad relativa y temperatura de la cámara (se utilizó un hidrómetro) dentro de la cámara de retracción (la cámara de retracción utilizada consta de un calentador industria conectada a un termostato externo ajustado manualmente).



Ilustración 34: 1) Probeta con puntos de MEK. 2) DEMEK. 3) espaciador macho. 4) calibrador hembra. 5) hidrómetro. 6) pegamento. 7) rotulador.

4.4.2 Retracción restringida, anillo restringido (ASTM C1581)

Una vez el espécimen de anillo haya sido elaborado como se indica en el capítulo anterior, 24 horas después del fin de amasado se procede a remover el plástico y a desmoldar con cuidado el anillo exterior. Debido a las dimensiones del anillo no fue posible colocarlas dentro de la cámara de retracción, la prueba se modificó de la original, se colocó sobre una base cubierta a nivel y se registró manualmente dos veces al día la fecha hora, humedad relativa temperatura, aparición de la primera fisura y ancho de la fisura.



Ilustración 35: Especimen de anillo de hormigón restringido internamente con anillo de acero. Hidrómetro (medidor de temperatura y humedad el aire) en el interior del anillo.



Ilustración 36: Regla de ancho de fisura, fisura en espécimen de hormigón.

4.5 Equipos de laboratorio

En este subcapítulo se ilustran y detallan los equipos de laboratorios utilizado en este trabajo.

➤ Amasadora de hormigón



Ilustración 37: Hormigonera Marca Betonmass, modelo ST 150 CD, de eje vertical y tambor fijo, capacidad máxima de 100 litros. Este equipo se utilizó para todas las amasadas.

➤ Calentador de azufre y nivelador de refrenado



Ilustración 38: Calentador de azufre y nivelador de refrenado para probetas de $\varnothing = 150$ mm.

➤ **Prensa de ensayo a compresión y módulo de elasticidad**



Ilustración 39: Prensa servocontrolada Ibertest, modelo MEH-3000-LCMD2W de 3000 kN.

➤ **Equipo de Flexotracción**

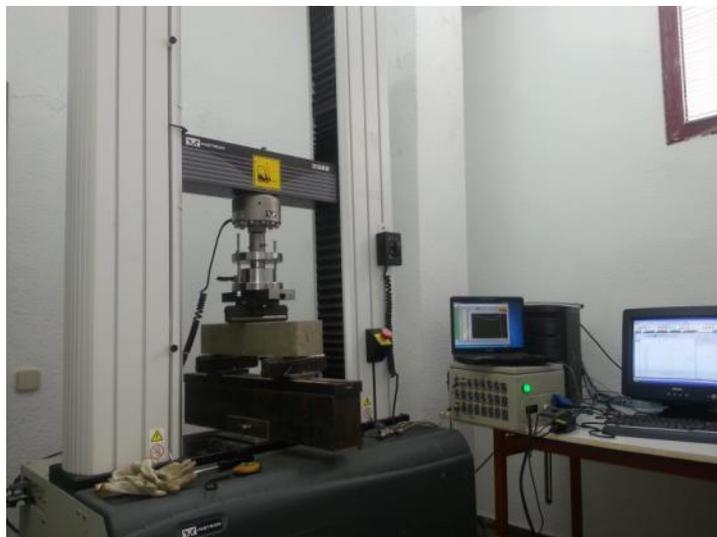


Ilustración 40: Equipo INSTRON 3382, célula de carga y equipo de adquisición de datos.

➤ **Demek**



Foto 4.5.5 DEMEK MEYERS INSTRUMENTS LIMITED. (Medidor micrométrico y accesorio).

Este equipo se utilizó para los ensayos de retracción libre total.

➤ **Cámara de retracción**



Ilustración 41: Cámara de retracción. Ventilador industrial conectado a un termostato.

➤ **Cierra circular de diamante**



Ilustración 42: Cierre de corte en húmedo con cuchilla de diamante. Se utilizó para hacer las entallas de las probetas en ensayo de flexotracción.

➤ **Mesa de vibración**



Ilustración 43: Mesa de vibración, se utilizó para compactar y sacar el oxígeno atrapado en las probetas de hormigón tradicional.

➤ **Cámara de curado a humedad saturada**



Ilustración 44: Cámara húmeda de curado, 100%HR. 20 C.

➤ **Horno de Laboratorio**



Ilustración 45: Horno de laboratorio a temperatura de 110 C. Se utilizó para secar los áridos y sacar las humedades.

(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)

5. CAPÍTULO V RESULTADOS Y ANÁLISIS DE ENSAYOS

En este capítulo se muestra los resultados de cinco tipos ensayos realizados con 28 tipos de hormigones. Los hormigones han sido dosificados según su consistencia, fluida de cono 10 cm para tradicionales y diámetro de escurrimiento de 600 mm para los autocompactante, la dosificación de los áridos se indican en el capítulo 4.1.2. No se modificó la granulometría con la adicción de fibras sin embargo, se corrigió con la adición moderada de aditivo, como se indica a continuación en la siguiente tabla.

% aditivo y fibras utilizados en el diseño de mezcla.						
#	TIPO	Kg. Cemento	L. Agua	A/C	% aditivo	tipo de fibras
1	H 25	265	195	0,74	0,65	sin fibras
2					0,75	30 Kg./m ³ metálica, Dramix 65/60
3					0,7	60 Kg./m ³ metálica, Dramix 65/60
4					0,75	3 Kg./m ³ macro sintética, polielefina, SIKA M – 60
5					0,8	6 Kg./m ³ macro sintética, polielefina, SIKA M – 60
6					1	3 Kg./m ³ micro sintética, polipropileno, CHRYSO Fibre-P31
7					1,2	6 Kg./m ³ micro sintética, polipropileno, CHRYSO Fibre-P31
8	HAC 25	285	210	0,74	1,8	sin fibras
9					1,85	30 Kg./m ³ metálica, Dramix 65/60
10					1,85	60 Kg./m ³ metálica, Dramix 65/60
11					1,8	3 Kg./m ³ macro sintética, polielefina, SIKA M – 60
12					1,8	6 Kg./m ³ macro sintética, polielefina, SIKA M – 60
13					2,1	3 Kg./m ³ micro sintética, polipropileno, CHRYSO Fibre-P31
14					2,6	6 Kg./m ³ micro sintética, polipropileno, CHRYSO Fibre-P31
15	H 40	360	195	0,54	0,65	sin fibras
16					0,65	30 Kg./m ³ metálica, Dramix 65/60
17					0,7	60 Kg./m ³ metálica, Dramix 65/60
18					0,75	3 Kg./m ³ macro sintética, polielefina, SIKA M – 60
19					0,8	6 Kg./m ³ macro sintética, polielefina, SIKA M – 60
20					1	3 Kg./m ³ micro sintética, polipropileno, CHRYSO Fibre-P31
21					1,2	6 Kg./m ³ micro sintética, polipropileno, CHRYSO Fibre-P31
22	HAC 40	360	210	0,58	1,7	sin fibras
23					1,7	30 Kg./m ³ metálica, Dramix 65/60
24					1,7	60 Kg./m ³ metálica, Dramix 65/60
25					1,7	3 Kg./m ³ macro sintética, polielefina, SIKA M – 60
26					1,7	6 Kg./m ³ macro sintética, polielefina, SIKA M – 60
27					2,1	3 Kg./m ³ micro sintética, polipropileno, CHRYSO Fibre-P31
28					2,6	6 Kg./m ³ micro sintética, polipropileno, CHRYSO Fibre-P31

Nota: el color rojo indica pérdida de propiedades autocomplaciente.

Ilustración 46: Tabla de % de aditivo utilizado para ajustar la consistencia por la adición de fibras

Los resultados de los ensayos mecánicos a 28 días en el hormigón se presentan a continuación en la siguiente tabla:

TIPO DE HORMIGÓN	fcm(28) (MPa)	Ecm(28) (GPa)	fcm(28) (MPa)	Ecm(28) (GPa)
H25 sin fibras	37,8	28,2	38,0	28,1
H25 30 Kg./m3 metálica, Dramix 65/60	37,2	27,3		
H25 60 Kg./m3 metálica, Dramix 65/60	37,0	27,9		
H25 3 Kg./m3 macro sintética, polielefina, SIKA M – 60	36,0	29,4		
H25 6 Kg./m3 macro sintética, polielefina, SIKA M – 60	39,2	27,2		
H25 3 Kg./m3 micro sintética, polipropileno, CHRYSO Fibre-P31	39,7	29,3		
H25 6 Kg./m3 micro sintética, polipropileno, CHRYSO Fibre-P31	39,2	27,4		
HAC25 sin fibras	42,9	29,0	41,1	28,8
HAC25 30 Kg./m3 metálica, Dramix 65/60	39,4	28,6		
HAC25 60 Kg./m3 metálica, Dramix 65/60	40,5	28,4		
HAC25 3 Kg./m3 macro sintética, polielefina, SIKA M – 60	44,5	29,4		
HAC25 6 Kg./m3 macro sintética, polielefina, SIKA M – 60	38,9	28,6		
HAC25 3 Kg./m3 micro sintética, polipropileno, CHRYSO Fibre-P31	42,7	29,3		
HAC25 6 Kg./m3 micro sintética, polipropileno, CHRYSO Fibre-P31	38,5	28,4		
H40 sin fibras	52,6	31,1	51,2	31,1
H40 30 Kg./m3 metálica, Dramix 65/60	52,6	31,7		
H40 60 Kg./m3 metálica, Dramix 65/60	51,5	32,7		
H40 3 Kg./m3 macro sintética, polielefina, SIKA M – 60	51,5	31,4		
H40 6 Kg./m3 macro sintética, polielefina, SIKA M – 60	50,6	31,6		
H40 3 Kg./m3 micro sintética, polipropileno, CHRYSO Fibre-P31	48,3	29,9		
H40 6 Kg./m3 micro sintética, polipropileno, CHRYSO Fibre-P31	51,1	29,2		
HAC40 sin fibras	49,6	29,5	49,3	28,6
HAC40 30 Kg./m3 metálica, Dramix 65/60	50,8	30,0		
HAC40 60 Kg./m3 metálica, Dramix 65/60	52,2	29,0		
HAC40 3 Kg./m3 macro sintética, polielefina, SIKA M – 60	50,9	28,2		
HAC40 6 Kg./m3 macro sintética, polielefina, SIKA M – 60	48,7	28,2		
HAC40 3 Kg./m3 micro sintética, polipropileno, CHRYSO Fibre-P31	47,8	27,3		
HAC 6 Kg./m3 micro sintética, polipropileno, CHRYSO Fibre-P31	44,8	28,0		

Ilustración 47: Resultados de compresión y modulo a 28 días

Los ensayos mecánicos en algunas ocasiones fueron realizados con retraso o adelanto a la hora programada, la siguiente tabla muestra el rango de tiempo.

ensayo	hora programada de ensayo	desviación (horas)
1er	10	± 0,5
2do	10,5	± 0,5
3er	12	± 0,5
4to	12,5	± 0,5
5to	24	± 2
6to	24,5	± 2
7mo	48	± 2
8vo	48	± 2
9no	72	± 24
10mo	72	± 24
11mo	672 (28 d)	± 24
12mo	672 (28 d)	± 24

Ilustración 48: Tabla ensayo y desviación de tiempo de ensayo

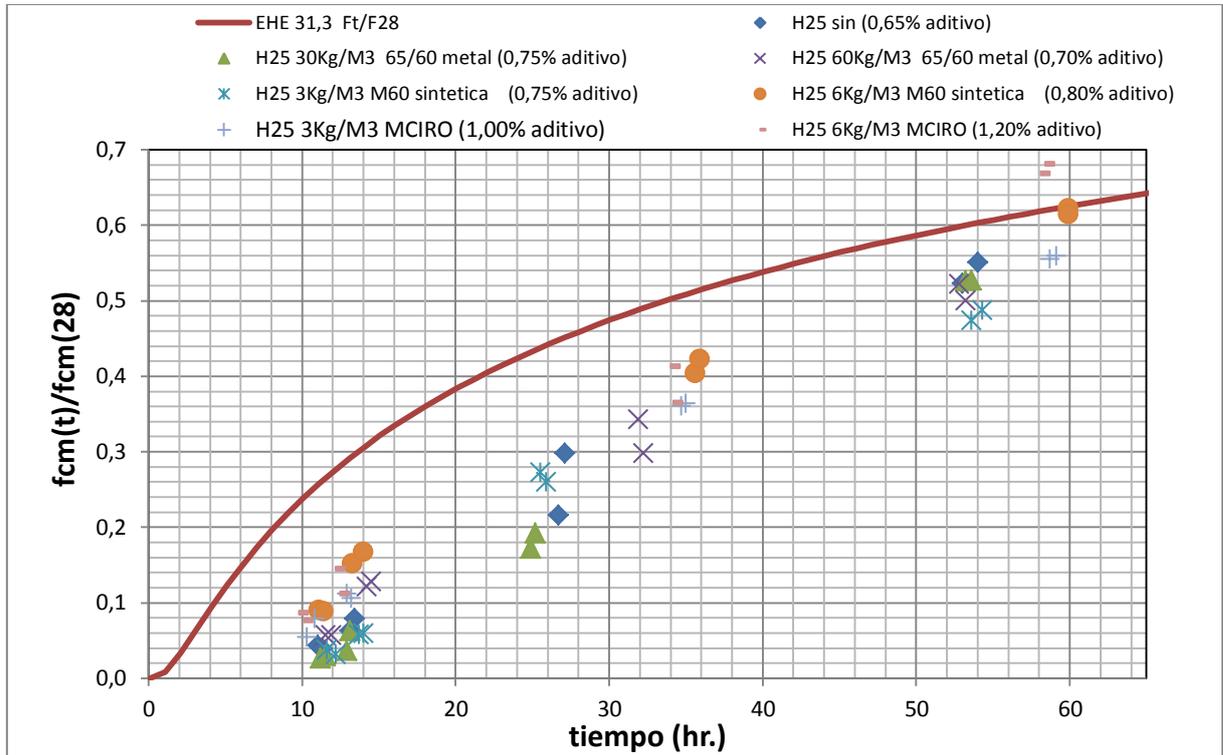
5.1.1 Resultados de ensayo de rotura por compresión.

Los resultados de resistencia a rotura a compresión han sido clasificados en cuatro grupos según el tipo de hormigón. La siguiente tabla muestra los resultados de los esfuerzos a compresión de los hormigones a 28 días. Se presenta a continuación gráficos de la evolución los esfuerzos a compresión a edades tempranas en proporción a su esfuerzo a 28 días y se compara con el coeficiente de la edad del hormigón (β_{cc}) de la normativa española, Eurocodigo2 y Código modelo.

(Nota: todos los datos experimentales están en el ANEJO 2)

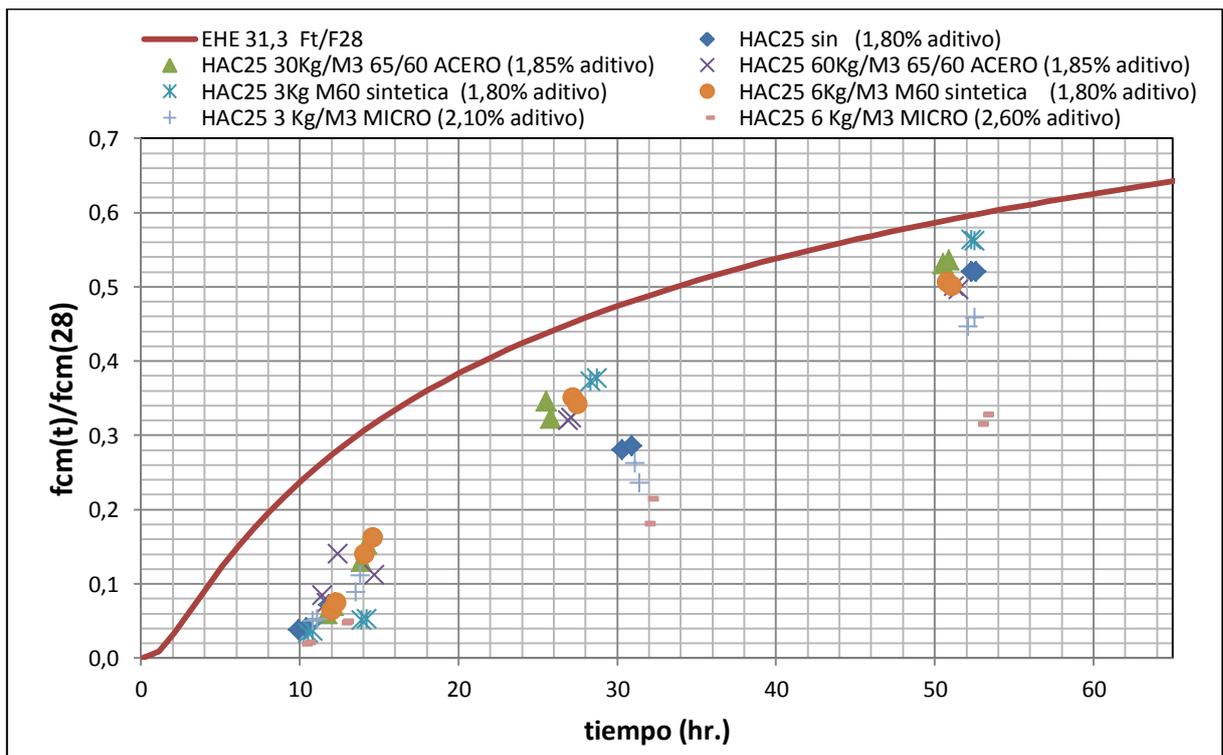
Resistencia a compresión vs Tiempo

H25; A/C= 0,74; $f_{cm}(28)= 38,0$ MPa



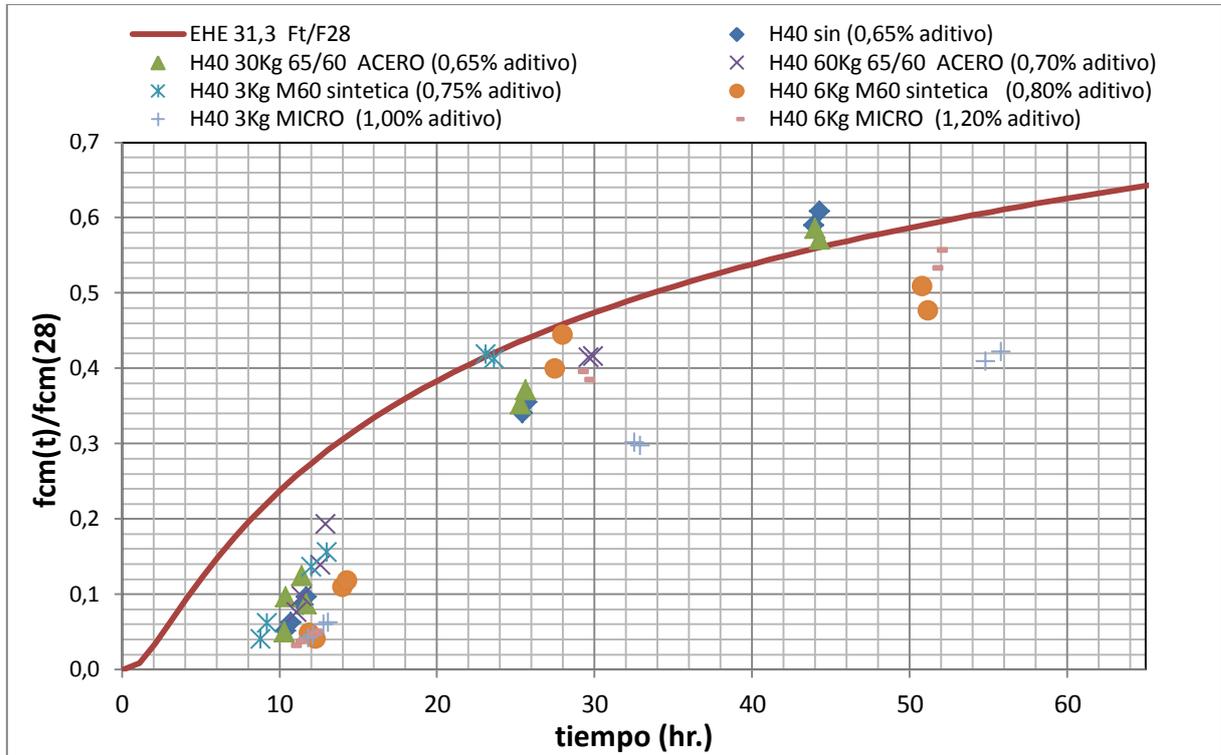
Resistencia a compresión vs Tiempo

HAC25; A/C= 0,74; $f_{cm}(28)= 41,1$ MPa.



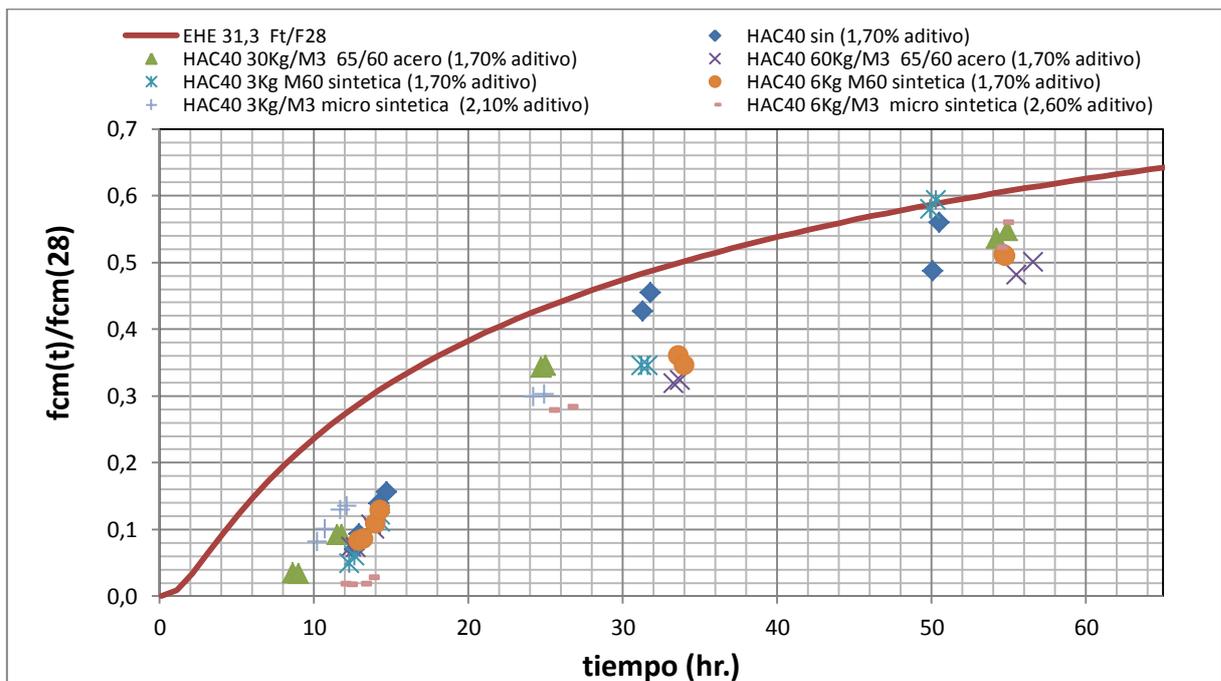
Resistencia a compresión vs Tiempo

H40; A/C= 0,54; $f_{cm}(28)= 51,2$ MPa.



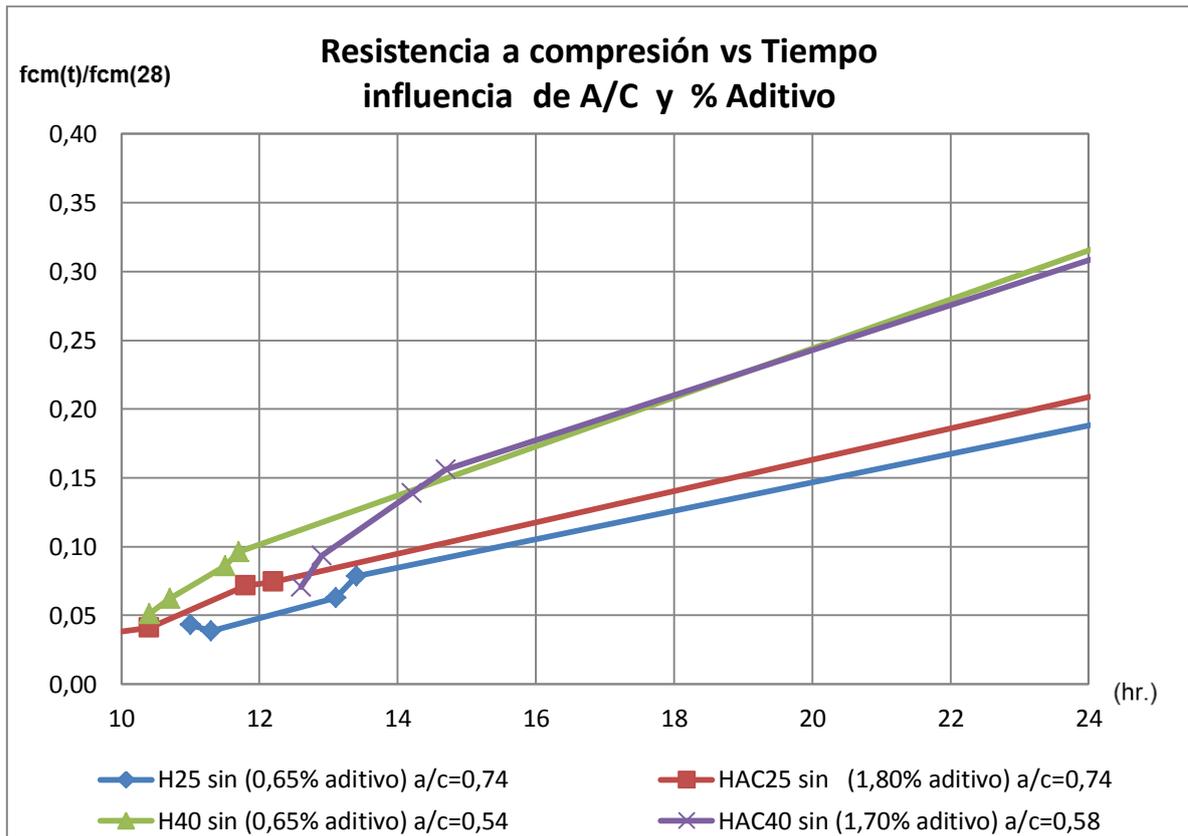
Resistencia a compresión vs Tiempo

HAC40; A/C= 0,58; $f_{cm}(28)= 49,3$ MPa.



5.1.2 Análisis de ensayo de rotura por compresión.

La resistencia a compresión del hormigón depende principalmente de la relación A/C y la cantidad de aditivo. En la siguiente gráfica se compara los 4 tipos de hormigones sin fibras durante las primeras 24 horas, utilizando el mismo tipo de cemento y aditivo.



Se aprecia que los hormigones con menor relación a/c (0,54, y 0,58) tienen un crecimiento mayor en el coeficiente de edad a compresión, como es de esperarse a edades posterior.

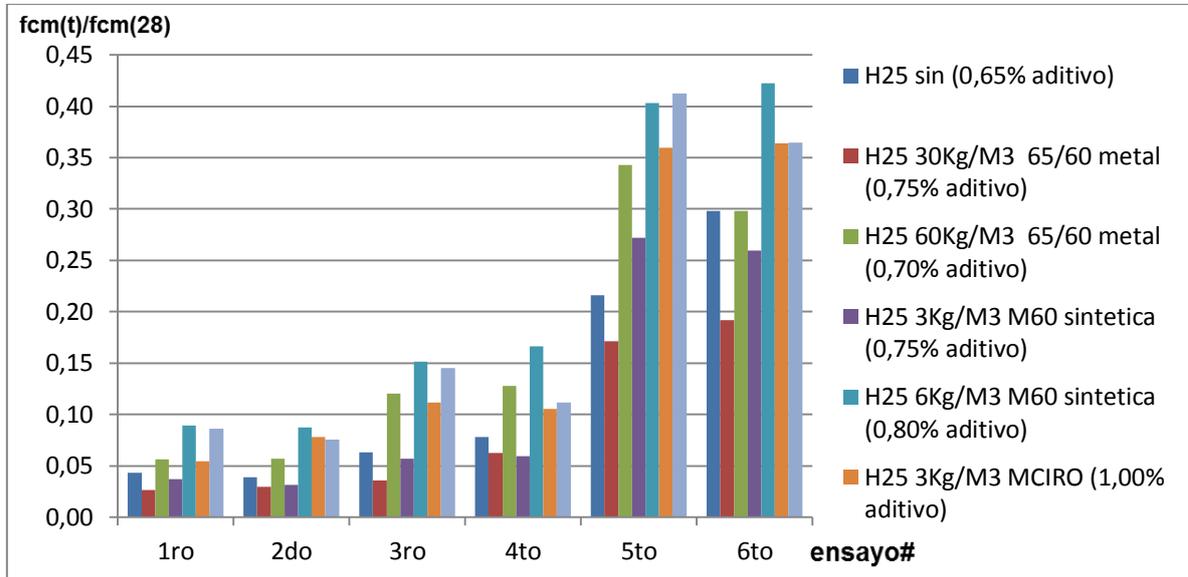
Entre los dos hormigones con relaciones a/c iguales (0,74) podemos apreciar una ganancia del coeficiente de edad a medida que se incrementa el % de aditivo utilizado (proporciones normales < 2 %).

Cada tipo de fibras demanda una cantidad de aditivo para obtener la consistencia deseada. Si se ordenan los datos de mayor a menor en función del % de aditivo (por la absorción y cambio de consistencia provocado por la

adición de fibras) y separamos los gráficos en función de su relación A/C se obtienen lo siguiente:

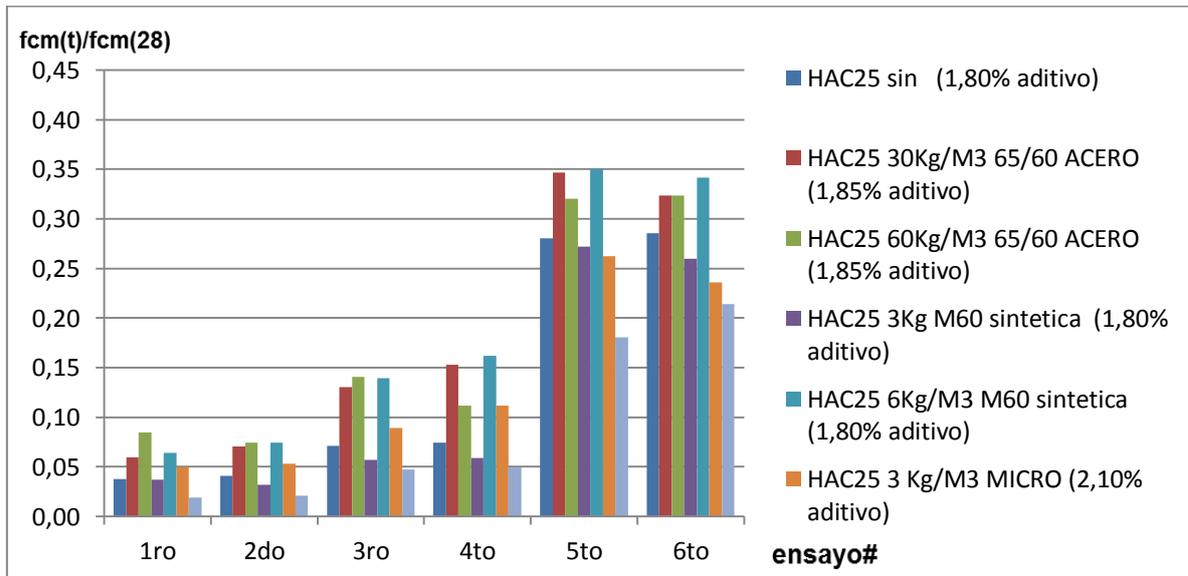
Resistencia a compresión en función del porcentaje de aditivo

H25; A/C= 0,74; $f_{cm}(28)= 38,0$ MPa



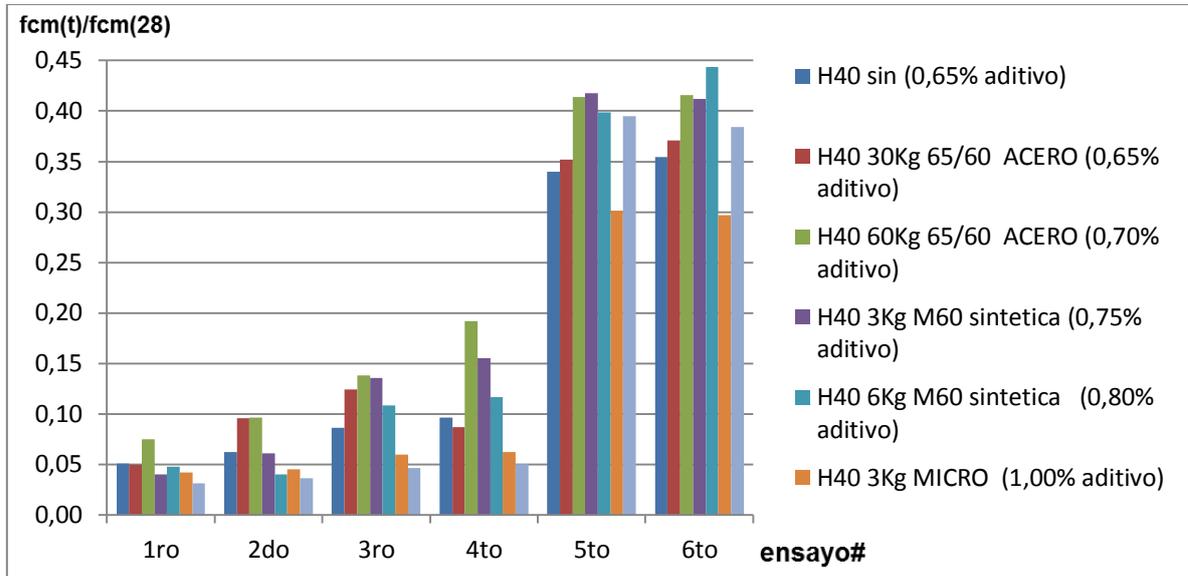
Resistencia a compresión en función del porcentaje de aditivo

HAC25; A/C= 0,74; $f_{cm}(28)= 41,1$ MPa.



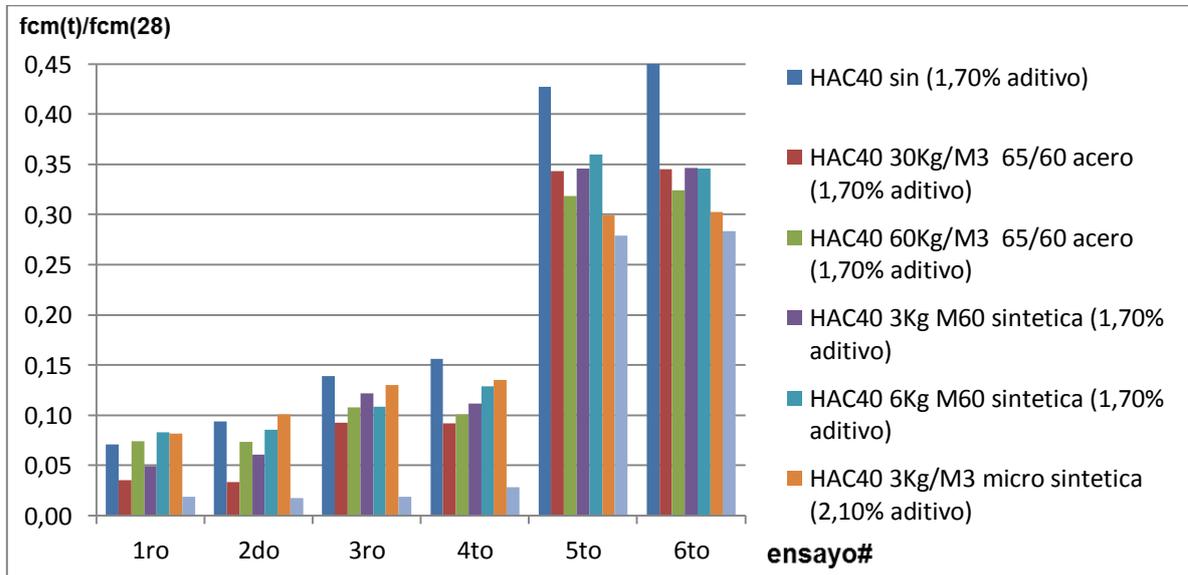
Resistencia a compresión en función del porcentaje de aditivo

H40; A/C= 0,54; $f_{cm}(28)= 51,2$ MPa.



Resistencia a compresión en función del porcentaje de aditivo

HAC40; A/C= 0,58; $f_{cm}(28)= 49,3$ MPa.

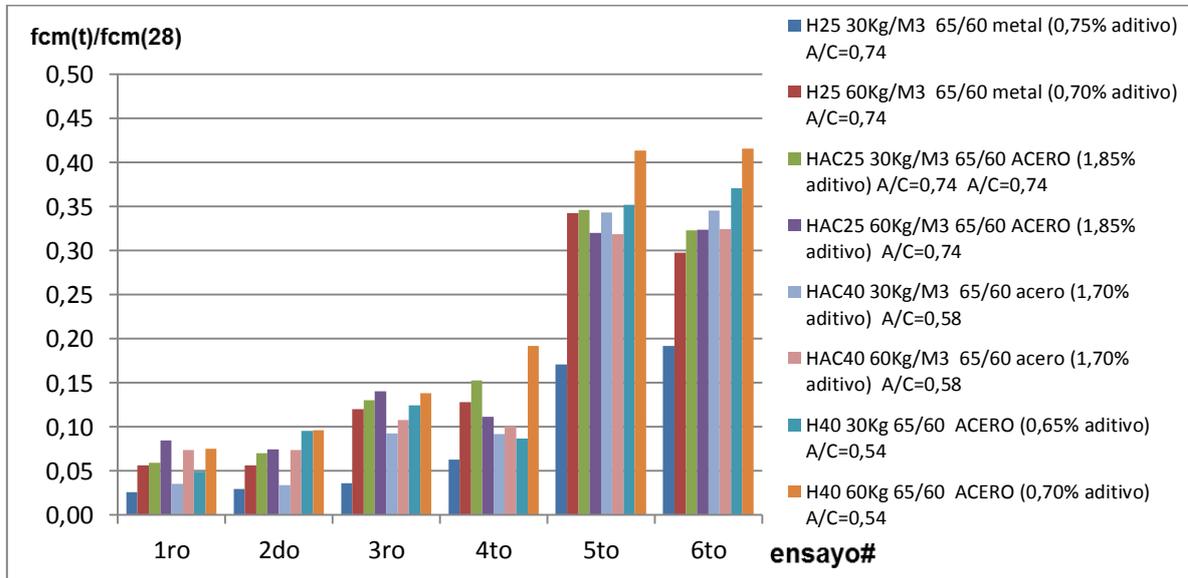


Podemos apreciar que el tipo de fibra influye en el comportamiento del hormigón y que el porcentaje de aditivo añadido no compensa la ganancia de resistencia a compresión sin embargo, podemos apreciar que en el mismo tipo de fibras con proporciones mayores de aditivo hay un ligero incremento.

Si en el mismo tipo de grafico separamos los datos por los distintos tipos de fibras y lo agrupamos de mayor a menor relación a/c.

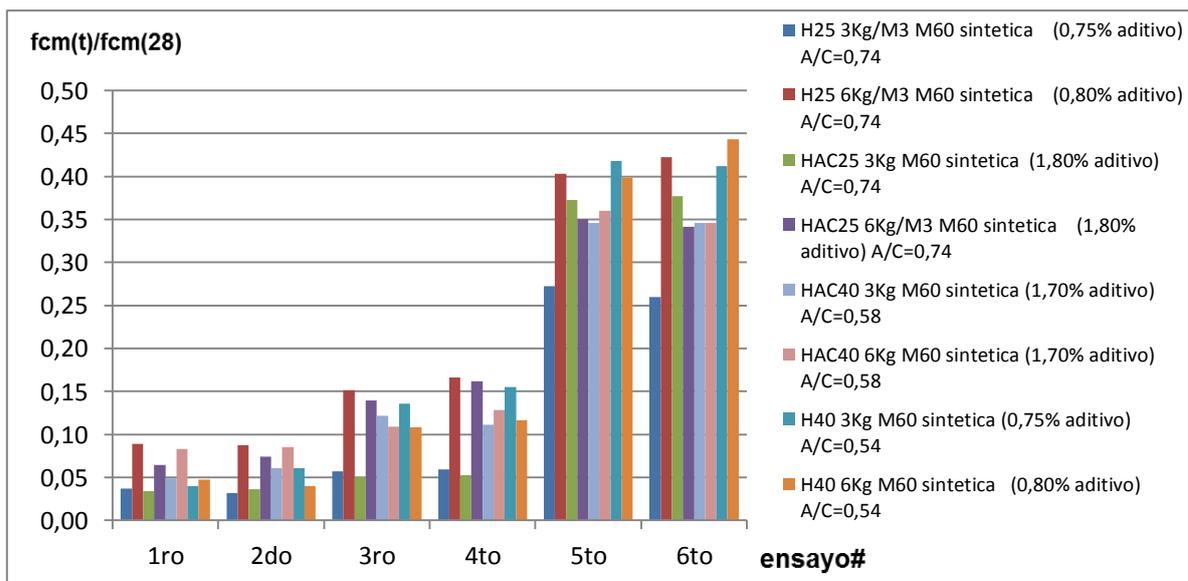
Resistencia a compresión en función del tipo de fibras

FIBRAS METÁLICAS



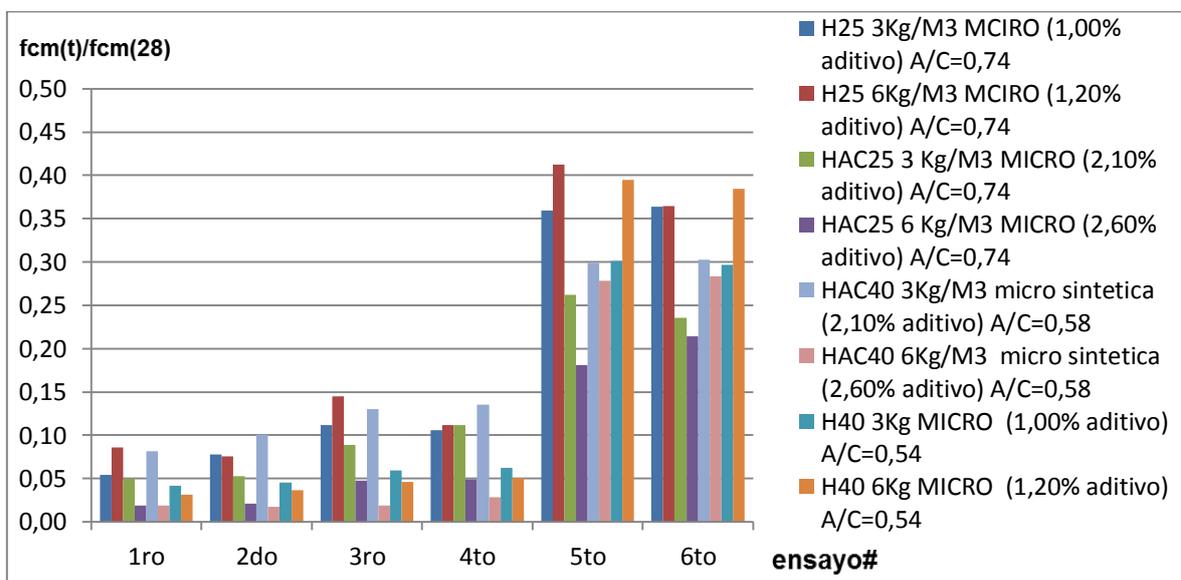
Resistencia a compresión en función del tipo de fibras

FIBRAS DE POLIELEFINA



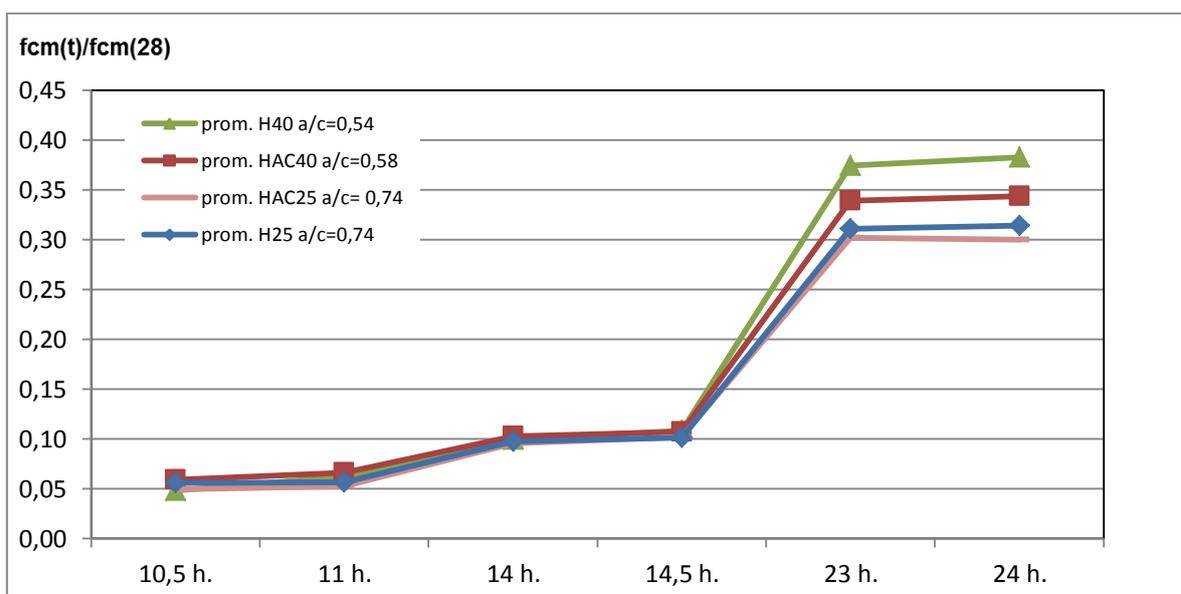
Resistencia a compresión en función del tipo de fibras

FIBRAS DE POLIPROPILENO



En las gráficas anteriores confirmamos lo escrito anteriormente y también notamos que un porcentaje de aditivo superior a 2% con fibras de polipropileno puede causar variaciones en el coeficiente de edad del hormigón en compresión.

Resistencia a compresión vs tiempo



Sabiendo que tanto la relación a/c, el % de aditivo y el tipo de fibras son influyentes en la evolución de la resistencia a compresión. Graficamos el

promedio todos los ensayos por tipo de hormigón e interpolando linealmente las horas de ensayo, notamos que el comportamiento es casi idéntico al comportamiento del hormigón sin fibras donde la relación A/C es el factor determinante.

En base a los resultados de las gráficas anteriores podemos observar lo siguiente:

- El coeficiente de edad del hormigón después de las 10 horas van aumentando en función del tiempo con un comportamiento parecido a las de edades posteriores.
- Todos los hormigones ensayados antes de las 24 horas (temprana edad) tienen un coeficiente de edad por debajo al de la normativa.
- Los hormigones a edades posterior (>24 h) tienden a ajustarse cada vez más a la curva de la normativa (β_{cc}).
- Los hormigones con relaciones A/C elevadas (0,74) tiene un comportamiento ligeramente atrasado en la evolución de su resistencia en comparación con los hormigones con A/C moderado (0,54 y 0,58).
- La relación A/C es probablemente el parámetro más influyente el coeficiente de envejecimiento, la madurez del hormigón aumenta con relaciones A/C inferiores.
- La utilización de aditivos superplastificantes reductores de agua en proporciones moderadas pueden mejorar ligeramente el coeficiente de madurez del hormigón.
- Las fibras Micro de polipropileno (en las proporciones utilizadas), pueden absorben parte del agua del amasado, variar drásticamente la resistencia del hormigón e imposibilitar las propiedades autocompactantes.

Observaciones:

Antes de las 10 horas, el tipo de falla de las probetas ensayadas a compresión son por expansión en la parte central (hinchamiento y fisuras forma de estrías verticales), se puede apreciar la humedad en el interior de la probeta y la deformación permanente sin aparente recuperación elástica.

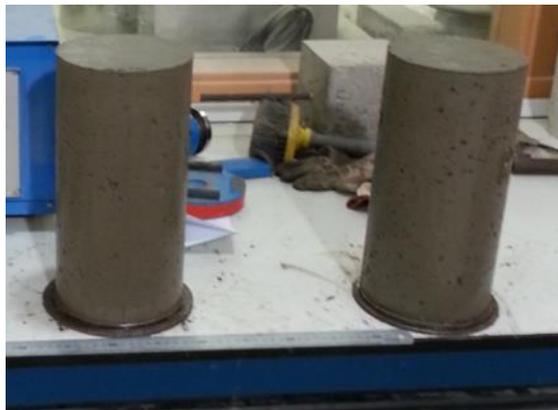


Ilustración 49: Probetas desencofradas a 9 horas, se aprecia la humedad superficial.



Ilustración 50: Probetas ensayada a 9 horas , la falla ocurre a menos de 1 MPa.



Ilustración 51:Foto 5.1.2 d Probetas ensayada a 11 horas después de la falla a 3.5 MPa. Se aprecia la probeta más seca y el tipo de falla vertical de arriba hacia abajo.

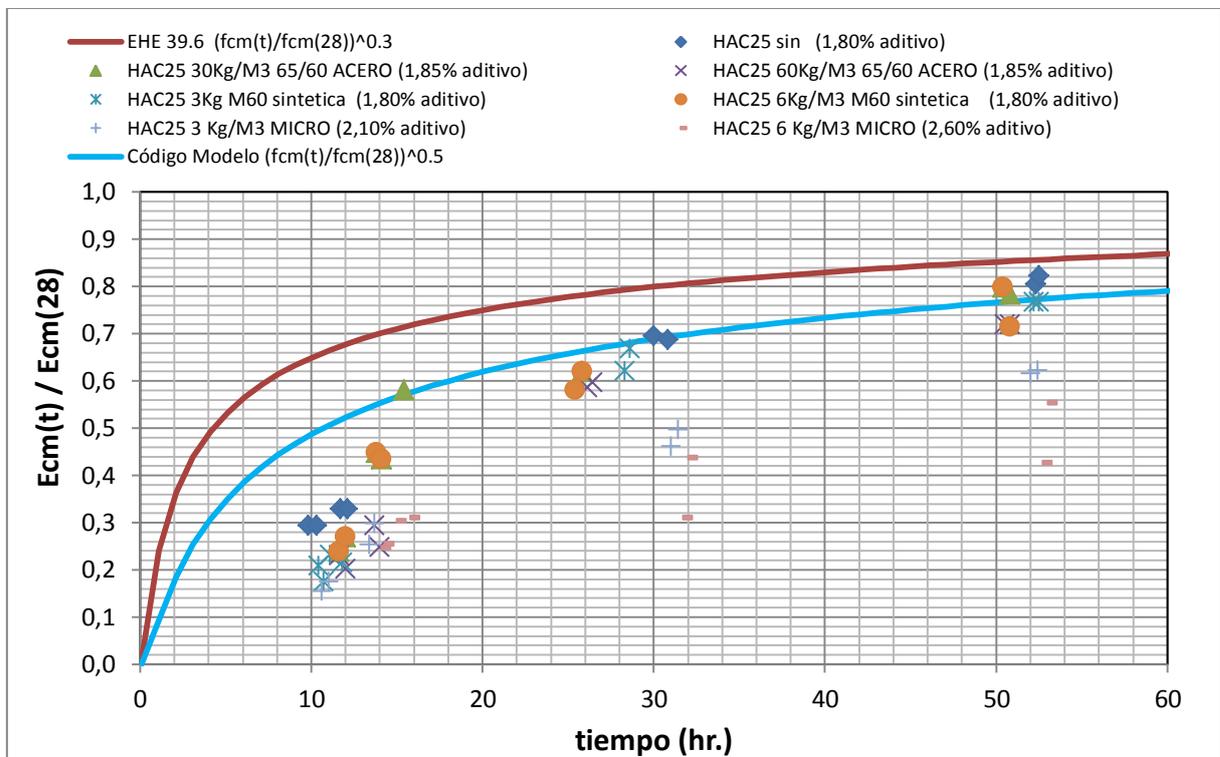
Es probable que un desencofrado a muy temprana edad pueda afectar en un aumento prematuro de resistencia a temprana edad (por secado) y un decremento de resistencia a edad posterior (por interrupción de la hidratación normal por el confinamiento del molde y el hormigón).

5.2.1 Resultados de ensayo de módulo elástico.

Los resultados de módulo de elasticidad han sido clasificados en cuatro grupos según el tipo de hormigón. Se presenta a continuación gráficos de la evolución del módulo elástico a edades tempranas y se compara con el ecuación teórica de la EHE, eurocódigo2 (línea roja) y Código Modelo (línea celeste).

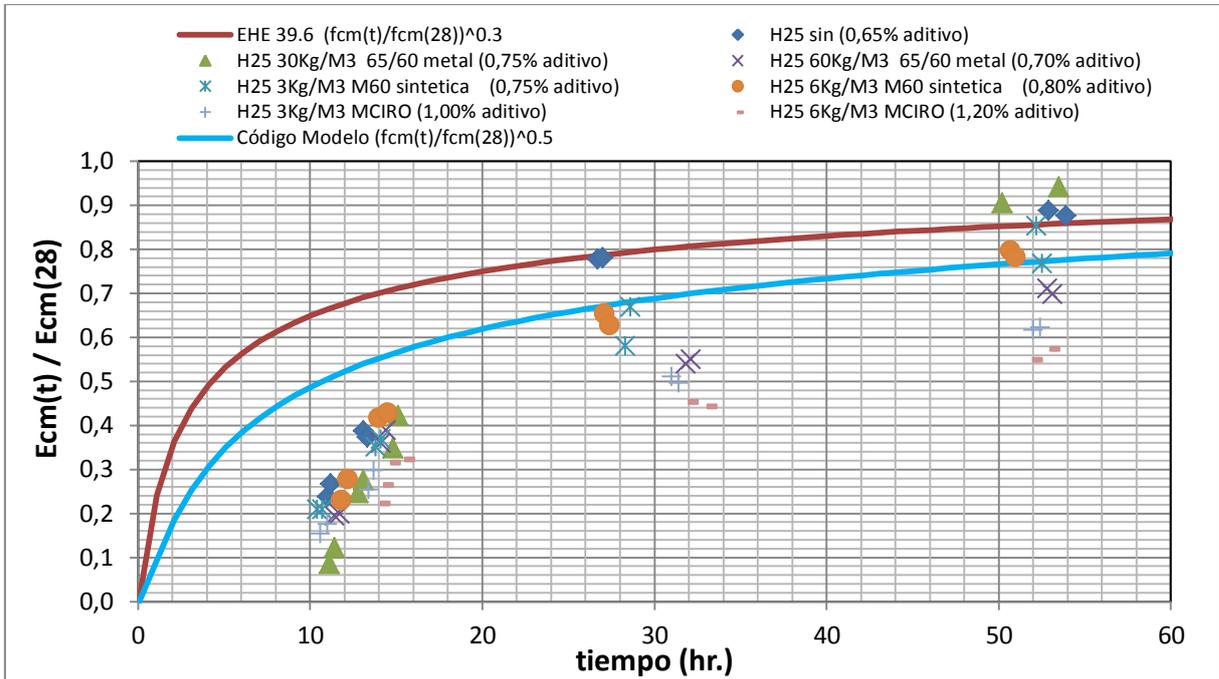
Módulo de elasticidad vs Tiempo

H25; A/C= 0,74; $f_{cm}(28)= 38,0$ MPa; $E_{cm}(28)=28,1$ GPa.



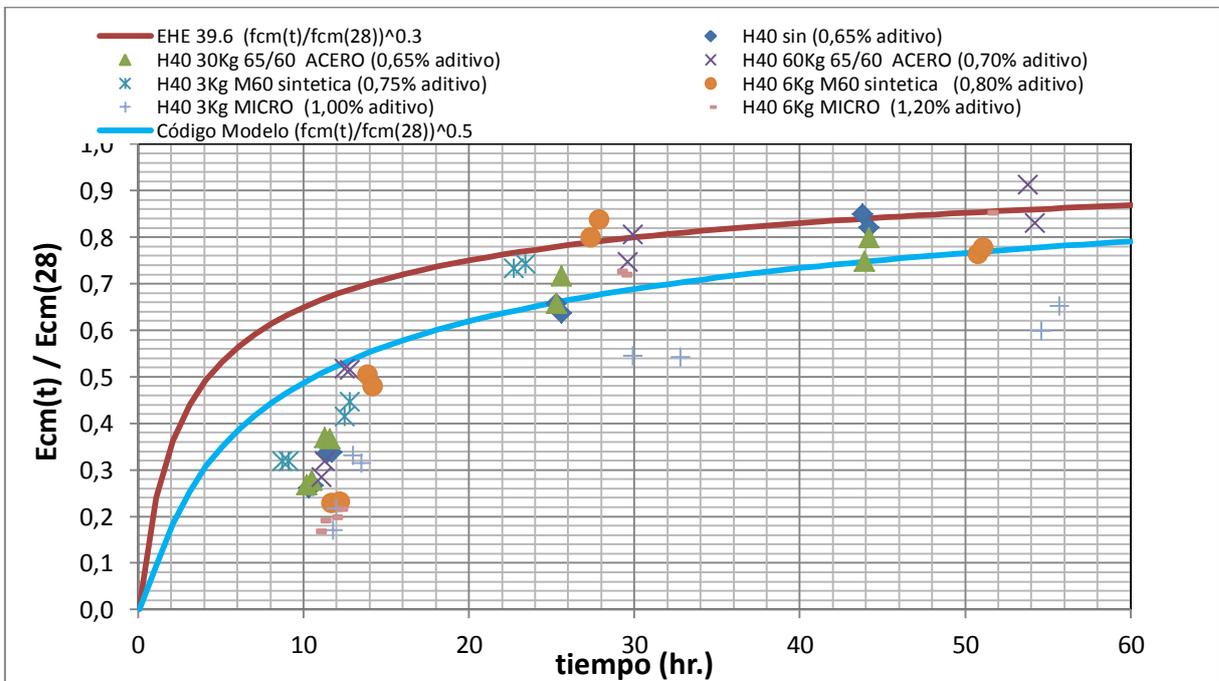
Módulo de elasticidad vs Tiempo

HAC25 A/C= 0,74; $f_{cm}(28)= 41,1$ MPa; $E_{cm}(28)=28,8$ GPa.



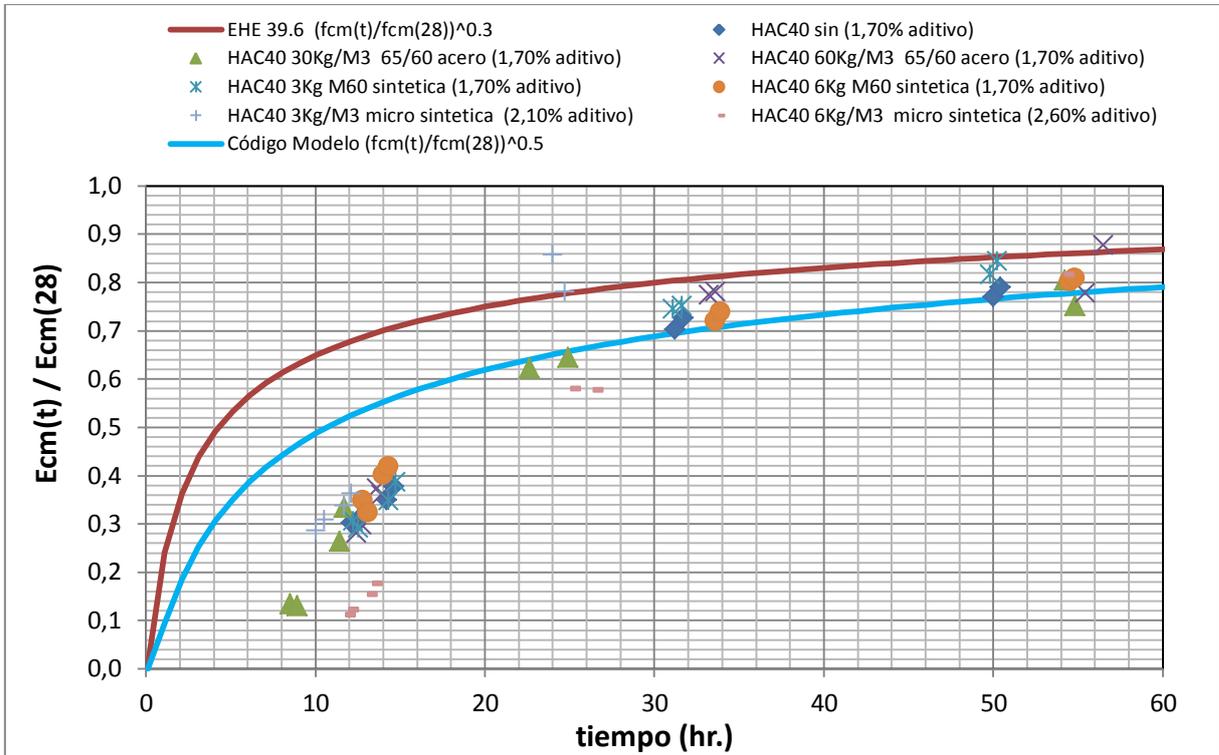
Módulo de elasticidad vs Tiempo

H40 A/C= 0,54; $f_{cm}(28)= 51,2$ MPa; $E_{cm}(28)=31,1$ GPa.

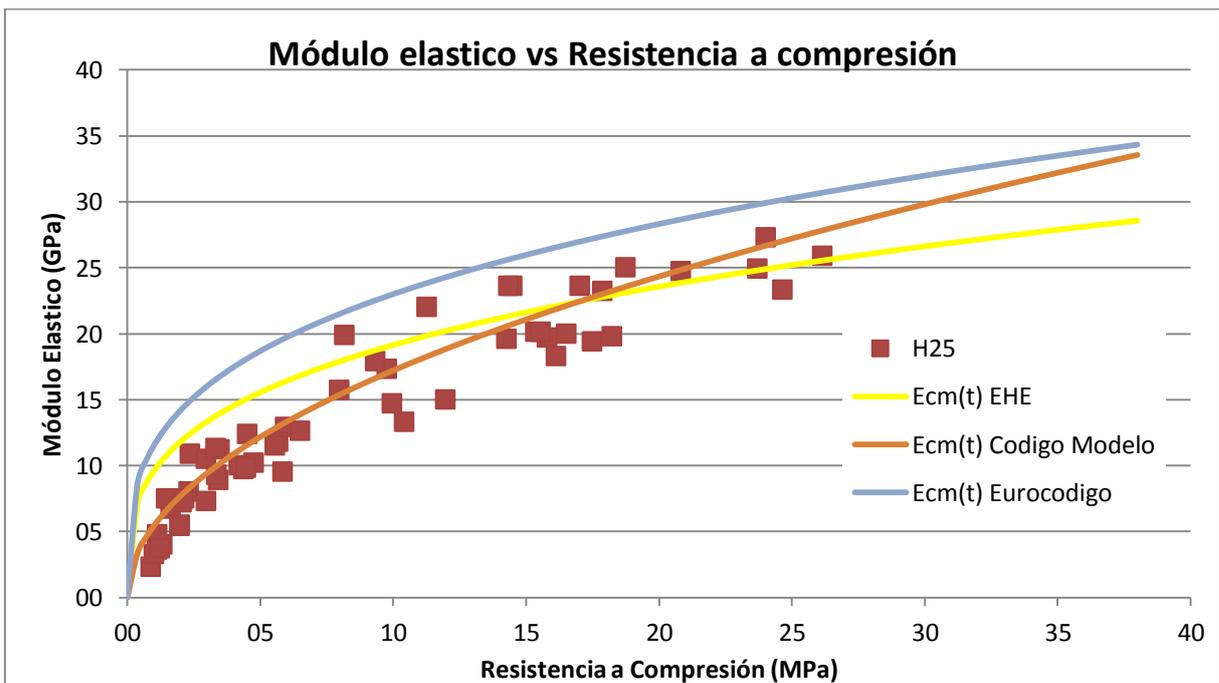


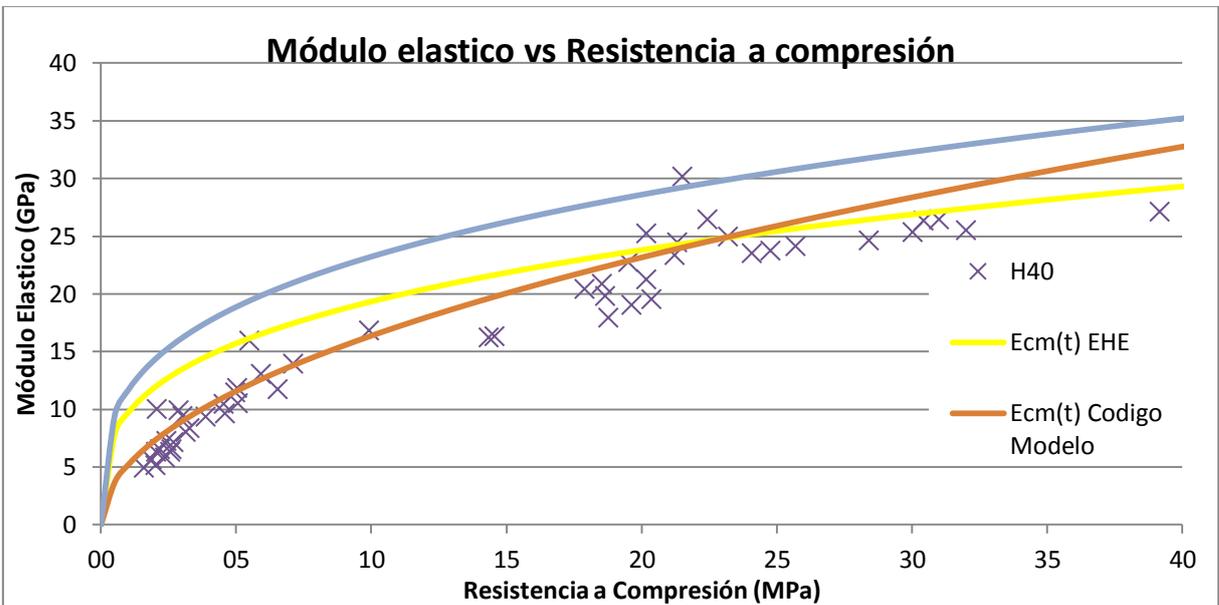
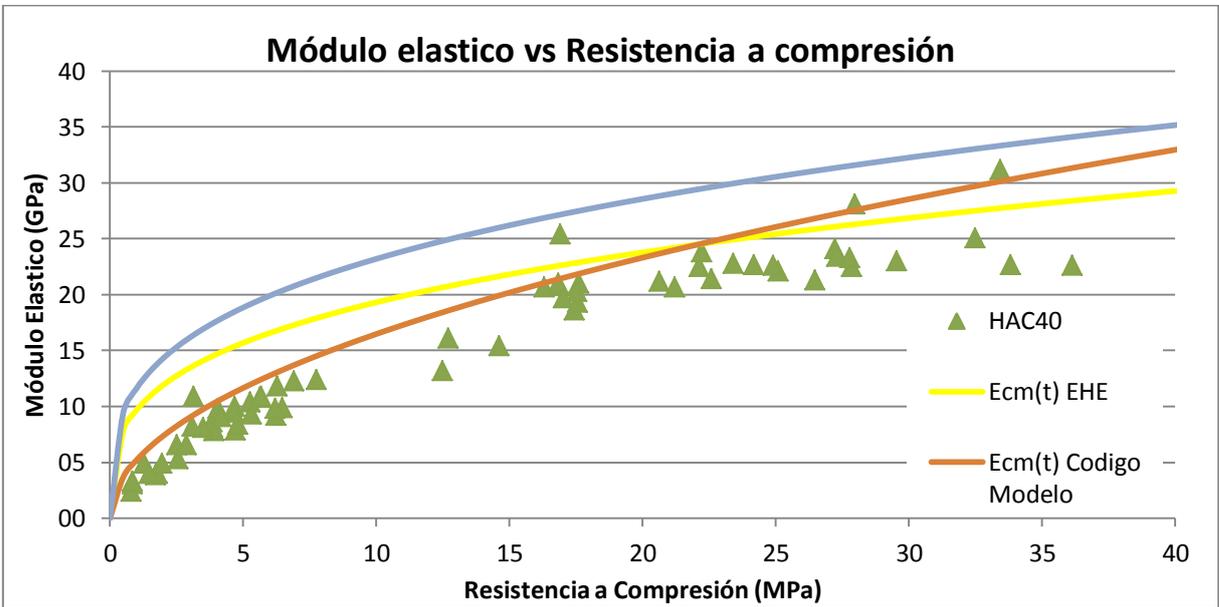
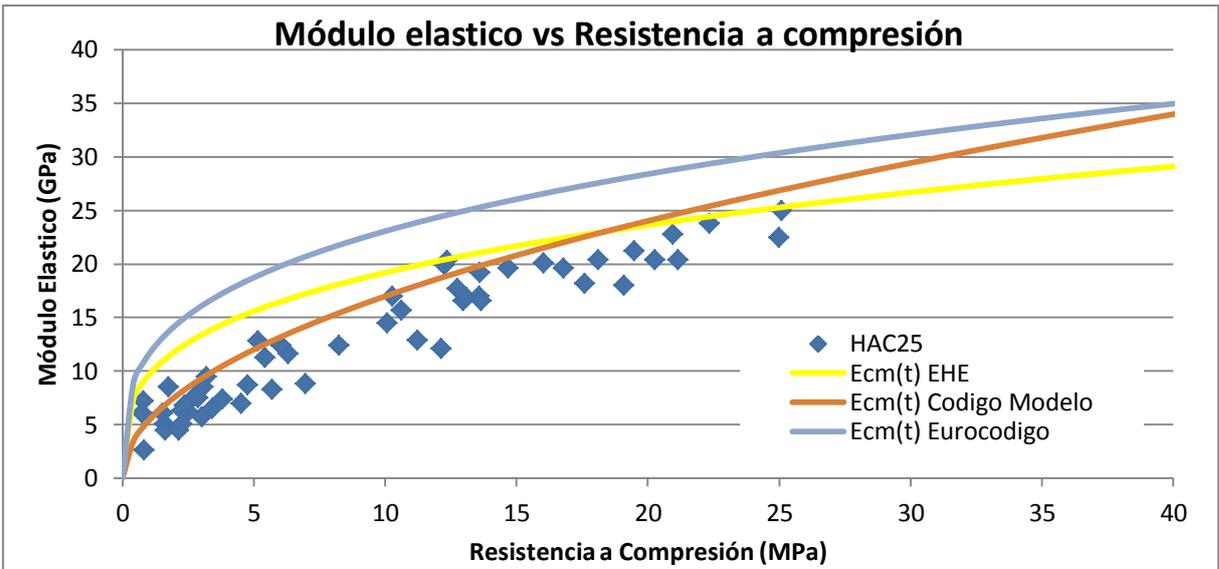
Módulo de elasticidad vs Tiempo

HAC40 A/C= 0,58; $f_{cm}(28)= 49,3$ MPa; $E_{cm}(28)=28,6$ GPa.



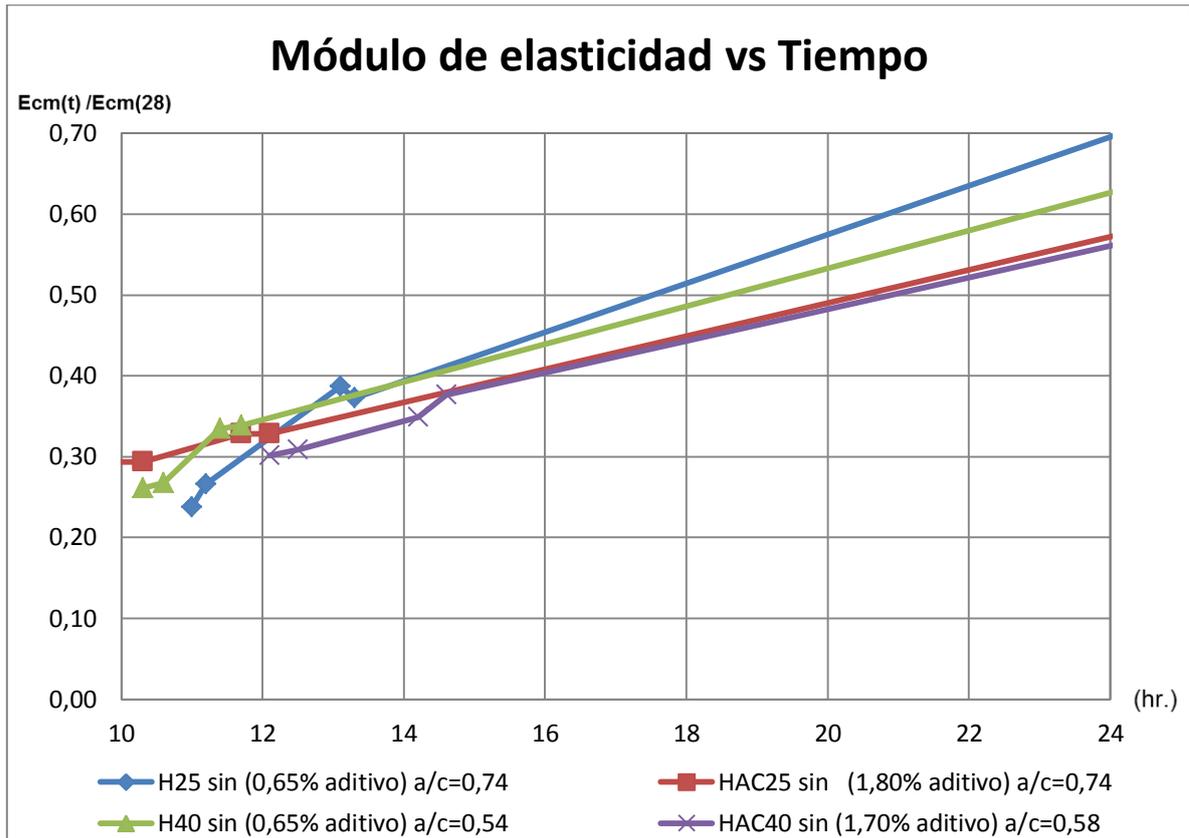
Ahora si graficamos el esfuerzo de compresión en función del tiempo y comparamos con la ecuación de cálculo de las normas y código.





5.2.2 Análisis de ensayo de módulo elástico.

El módulo elástico del hormigón aumenta razón de una raíz a medida que aumenta su el coeficiente de edad del hormigón. En la siguiente gráfica se compara los 4 tipos de hormigones sin fibras utilizados en las primeras 24 horas.

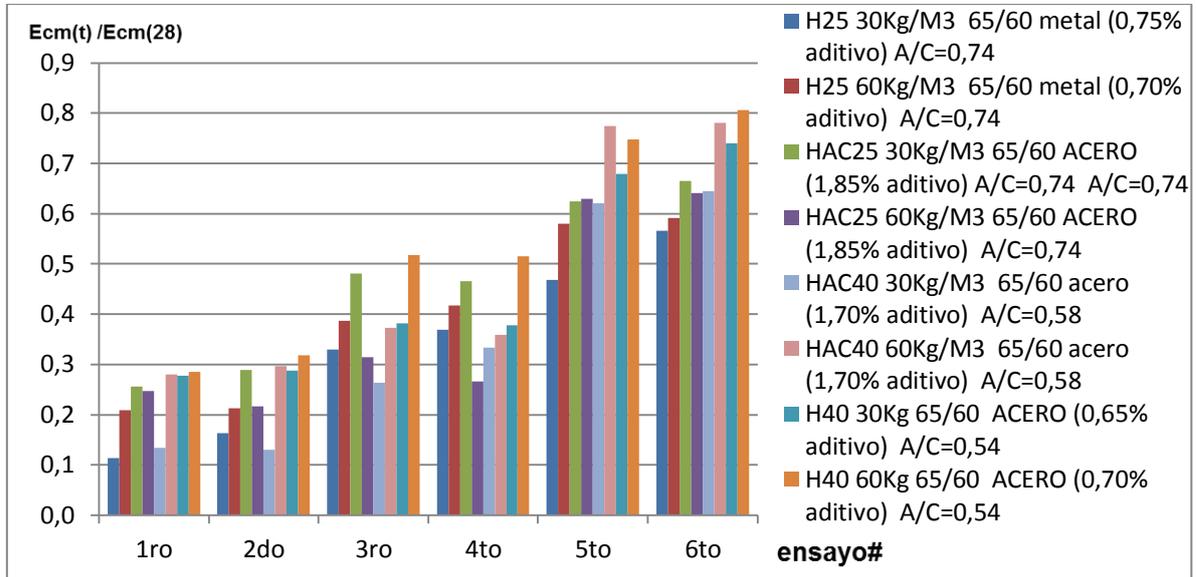


A diferencia del comportamiento a compresión, podemos apreciar que los dos hormigones autocompactantes tienen un atraso en la madurez del módulo elástico durante las edades tempranas que posteriormente vuelve a recuperar, podemos deducir que el porcentaje de aditivo puede ser el causante de este comportamiento.

Si se ordenan los datos de mayor a menor en función del % de aditivo y separamos los gráficos en función del tipo de fibras se obtienen lo siguiente:

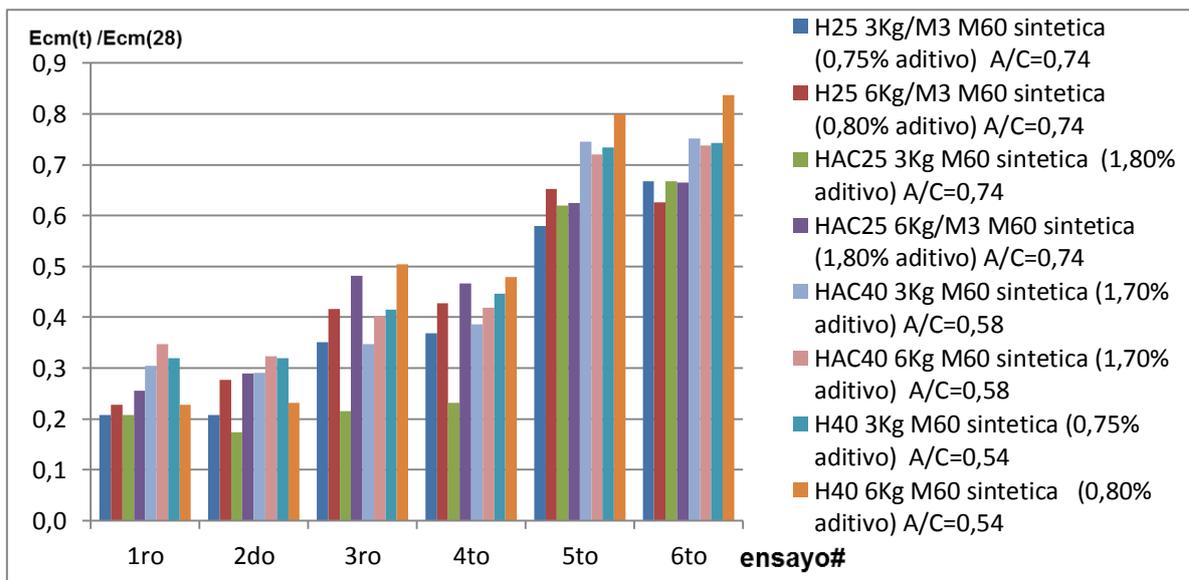
Histograma de Módulo en función del tiempo

FIBRAS METÁLICAS

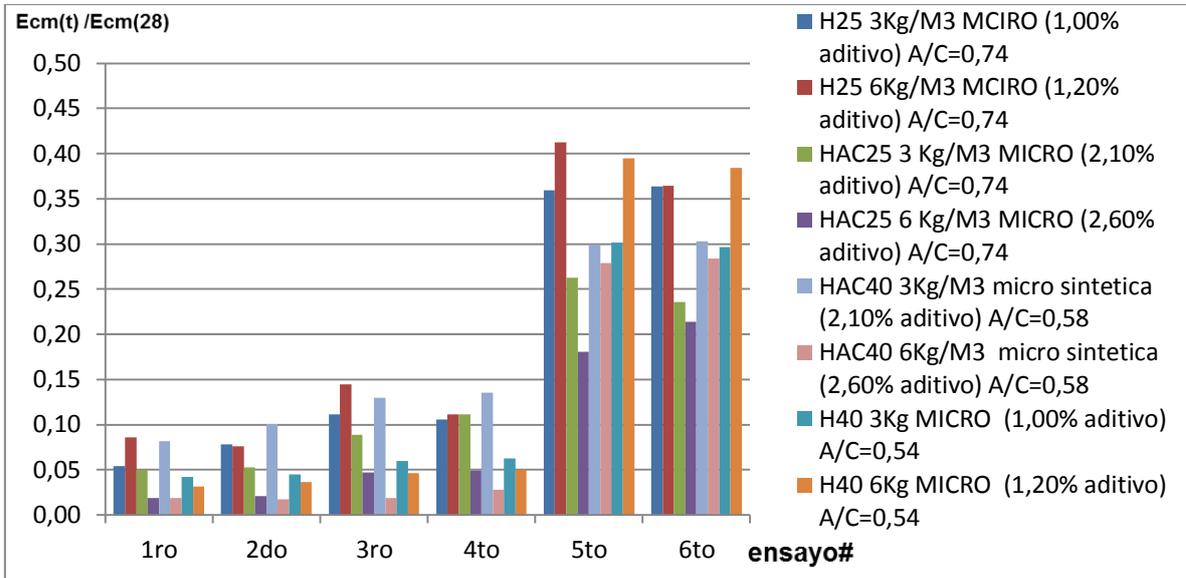


Histograma de Módulo en función del tiempo

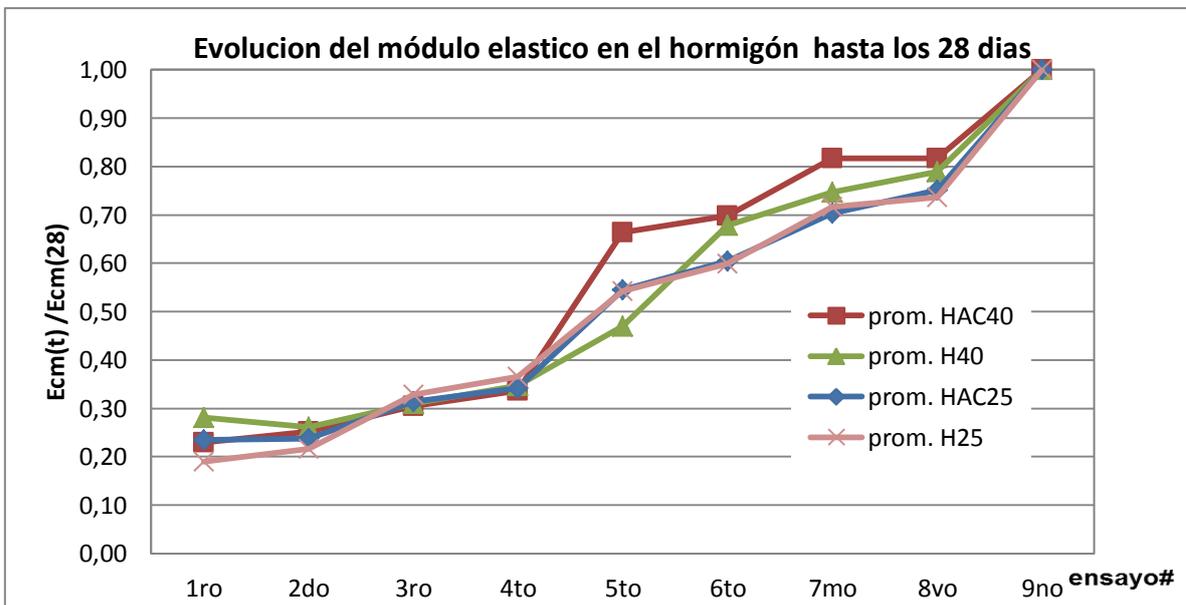
FIBRAS DE POLIELEFINA (Macro sintética)



Histograma de Módulo en función del tiempo FIBRAS DE POLIPROPILENO (Micro sintética)



Dosificaciones altas de aditivo y de fibras de polipropileno pueden causar bajos valores de módulo de elasticidad y afectar su evolución en el tiempo



La relación a/c, el % de aditivo y el tipo de fibras son influyentes en la evolución del módulo elástico. Graficamos el promedio todos los ensayos por tipo de hormigón e interpolando linealmente las horas de ensayo, apreciamos que a temprana edad los hormigones con porcentajes altos de aditivo tienen un retraso en la evolución del módulo elástico que a edades posteriores vuelve a recuperar.

En base a los resultados de las gráficas anteriores podemos observar lo siguiente:

- Todos los hormigones ensayados antes de las 24 horas (temprana edad) tienen un coeficiente del módulo de elasticidad por debajo al de la normativa.
- Los hormigones a edades posterior (>24 h) tienden a ajustarse cada vez más a la curva de la normativa sin embargo, inmediatamente después de las 24 horas retoman a ajustarse.
- El aumento de aditivo puede provocar retrasos en la evolución del módulo elástico del hormigón.
- Los hormigones con relación A/C inferiores alcanzan mayores magnitudes de módulo elástico a edad posterior, pueden alcanzar hasta un 70% en las primeras 24 horas.
- Los la ecuación teórica del código modelo es más conservadora y se ajusta más a los datos obtenidos.
- La ecuación del coeficiente de edad para el módulo de elasticidad del código modelo (Ecu.20) tiene un mejor ajuste a temprana edad a partir de las 15 horas.
- Es posible que el modulo elástico del hormigón a temprana edad sea directamente proporcional la resistencia a compresión e independiente del tiempo.

5.3.1 Resultados de ensayo de resistencia a tensión por flexión (flexo tracción)

Los resultados del flexotracción han sido clasificados debido a su comportamiento estructural en tres grupos, según el tipo de fibras a diferencia de los otros ensayos mecánicos. Debido a las dificultades físicas del hormigón a temprana edad para el ensayo de flexotracción, los primeros ensayos se realizaron posteriores a las 24 horas, que se presentan a continuación.

Nota:

- $f_{R,j}$ representa la resistencia a residual a la tracción por flexión, en N/mm^2 .
- El subíndice j es la abertura de fisura a: 0,5; 1,5; 2,5; 3,5 mm.
- f_L es la resistencia residual en el límite proporcional (LOP), en N/mm^2 .

FIBRAS METÁLICAS

H40 30kg/m3 ACERO	fL	fR	fR	fR	fR
		0,5	1,5	2,5	3,5
24 HR	2,43	1,34	1,51	1,69	1,75
48 HR	3,16	2,79	3,12	3,21	3,28
28 DIAS	4,92	4,37	5,03	4,95	4,91

H40 60kg/m3 ACERO	fL	fR	fR	fR	fR
		0,5	1,5	2,5	3,5
24 HR	2,21	1,18	1,26	1,32	1,33
48 HR	3,61	2,29	2,27	1,96	1,82
28 DIAS	3,79	2,40	2,38	2,06	1,92

HAC40 30kg/m3 ACERO	fL	fR	fR	fR	fR
		0,5	1,5	2,5	3,5
24 HR	2,40	1,19	1,14	1,24	1,30
48 HR	3,03	1,74	2,00	2,08	2,09
28 DIAS	5,84	5,03	5,45	5,05	4,84

HAC40 60kg/m3 ACERO	fL	fR	fR	fR	fR
		0,5	1,5	2,5	3,5
24 HR	2,46	1,21	1,17	1,27	1,33
48 HR	3,11	1,78	2,04	2,12	2,14
28 DIAS	5,98	5,14	5,57	5,16	4,95

H25 30kg/m3 ACERO	fL	fR	fR	fR	fR
		0,5	1,5	2,5	3,5
24 HR	1,38	0,97	0,97	1,03	1,00
48 HR	2,57	2,16	2,70	2,92	3,04
28 DIAS	4,81	4,29	4,60	4,50	4,06

H25 60kg/m3 ACERO	fL	fR	fR	fR	fR
		0,5	1,5	2,5	3,5
24 HR	1,38	4,17	4,84	4,65	4,71
48 HR	3,62	5,24	6,36	5,88	5,51
28 DIAS	4,56	7,76	9,22	9,22	8,61

HAC25 30kg/m3 ACERO	fL	fR	fR	fR	fR
		0,5	1,5	2,5	3,5
24 HR	2,28	1,73	2,02	1,72	1,69
48 HR	3,18	3,19	3,94	4,33	4,54
28 DIAS	5,84	4,59	5,66	5,50	5,25

HAC25 60kg/m3 ACERO	fL	fR	fR	fR	fR
		0,5	1,5	2,5	3,5
24 HR	2,96	5,32	5,25	4,64	4,26
48 HR	3,08	4,17	4,84	4,65	4,71
28 DIAS	5,27	7,76	9,22	9,22	8,61

FIBRAS DE POLIELEFINA

(Macro sintética)

H40 3kg/m3 MACRO	fL	fR	fR	fR	fR
		0,5	1,5	2,5	3,5
24 HR	2,97	0,43	0,37	0,42	0,48
48 HR	3,79	0,77	1,01	1,38	1,57
28 DIAS	4,87	0,72	0,95	1,17	1,35

H40 6kg/m3 MACRO	fL	fR	fR	fR	fR
		0,5	1,5	2,5	3,5
24 HR	1,48	0,79	0,85	0,89	0,89
48 HR	2,43	1,54	1,52	1,32	1,23
28 DIAS	5,12	0,76	1,00	1,23	1,42

HAC40 3kg/m3 MACRO	fL	fR	fR	fR	fR
		0,5	1,5	2,5	3,5
24 HR	2,45	1,34	1,79	2,09	2,34
48 HR	3,21	1,32	2,14	2,58	2,85
28 DIAS	5,28	1,32	2,14	2,58	2,85

HAC40 6kg/M3macro	fL	fR	fR	fR	fR
		0,5	1,5	2,5	3,5
24 HR	2,45	1,34	1,79	2,09	2,34
48 HR	3,29	1,60	2,43	2,71	2,94
28 DIAS	5,92	2,24	3,63	4,28	4,55

H25 3kg/m3 MACRO	fL	fR	fR	fR	fR
		0,5	1,5	2,5	3,5
24 HR	1,82	0,60	0,41	0,38	0,37
48 HR	2,79	0,59	0,25	0,05	0,00
28 DIAS	4,21	0,66	0,68	0,75	0,78

H25 6kg/m3 MACRO	fL	fR	fR	fR	fR
		0,5	1,5	2,5	3,5
24 HR	1,92	0,63	0,43	0,40	0,39
48 HR	2,94	0,62	0,26	0,05	0,00
28 DIAS	4,44	0,69	0,71	0,79	0,82

HAC25 3kg/m3 MACRO	fL	fR 0,5	fR 1,5	fR 2,5	fR 3,5
24 HR	1,50	0,49	0,62	0,76	0,83
48 HR	2,00	0,55	0,51	0,59	0,59
28 DIAS	4,11	0,59	0,69	0,75	0,76

HAC25 6kg/m3 MACRO	fL	fR 0,5	fR 1,5	fR 2,5	fR 3,5
24 HR	1,48	0,59	0,75	0,90	0,95
48 HR	2,51	1,39	1,79	2,14	2,26
28 DIAS	3,99	0,88	1,43	1,72	1,93

FIBRAS DE POLIPROPILENO

(Micro sintética)

H40 3kg/m3 MICRO	fL	fR 0,5	fR 1,5	fR 2,5	fR 3,5
24 HR	2,68	0,57	0,39	0,24	0,13
48 HR	3,14	1,18	1,26	1,32	1,33
28 DIAS	5,17	1,27	1,71	1,69	1,71

HAC40 3kg/m3 MICRO	fL	fR 0,5	fR 1,5	fR 2,5	fR 3,5
24 HR	1,97	0,61	0,48	0,33	0,22
48 HR	2,73	0,40	0,47	0,54	0,55
28 DIAS	5,05	0,51	0,41	0,21	0,10

H25 3kg/m3 MICRO	fL	fR 0,5	fR 1,5	fR 2,5	fR 3,5
24 HR	1,02	0,97	0,97	1,03	1,00
48 HR	2,79	0,59	0,25	0,05	0,00
28 DIAS	5,36	0,02	0,03	0,00	0,00

HAC25 3kg/m3 MICRO	fL	fR 0,5	fR 1,5	fR 2,5	fR 3,5
24 HR	1,97	0,61	0,41	0,21	0,10
48 HR	2,73	0,40	0,48	0,33	0,22
28 DIAS	4,05	0,51	0,47	0,54	0,55



Ilustración 52: sección central de vigas después del ensayo a flexotracción

5.3.2 Análisis de ensayo de resistencia a tensión por flexión (flexo tracción)

Análisis cualitativo:

Analizando los resultados obtenidos, se ha identificado diferentes comportamientos de acuerdo con el tipo de fibras utilizadas en el hormigón. Se presenta a continuación.

1) Fibras metálicas:

Primero se aprecia una rama ascendente constantemente antes de la primera fisura (aproximadamente 0,05 mm, donde se produce la carga LOP), posteriormente hay una ligera caída y una rápida recuperación por la absorción de las fibras metálicas que cosen el hormigón en estado fisurado, el hormigón sigue absorbiendo carga degradándose poco a poco por el deslizamiento de las fibras en la matriz de hormigón.

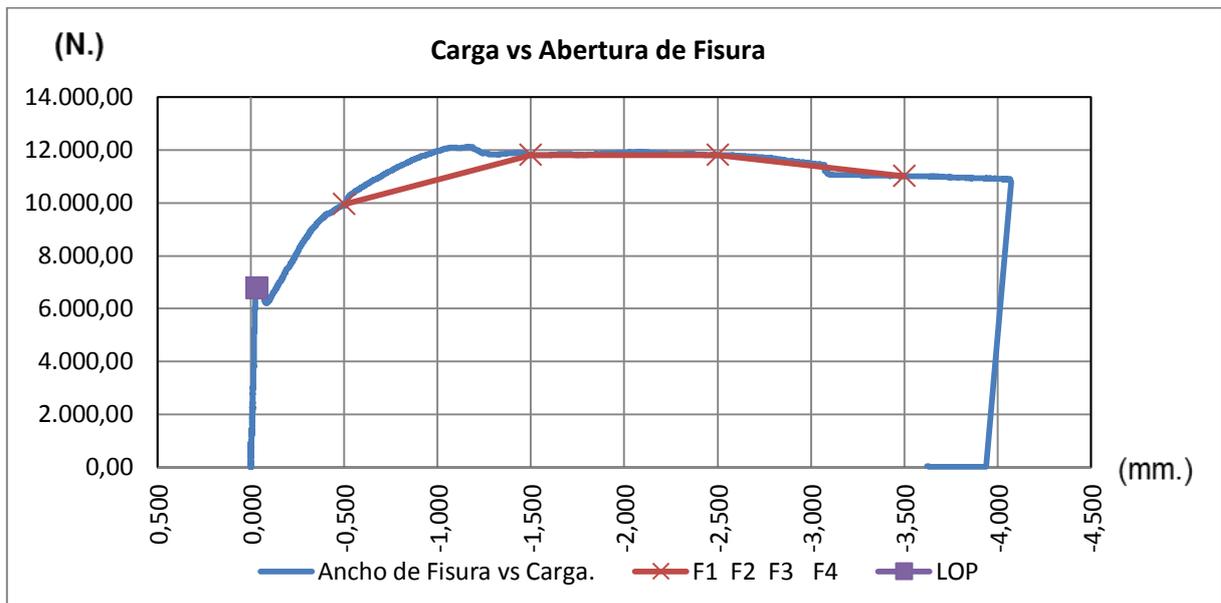


Ilustración 53: Gráfico típico de flexotracción con fibras metálicas

Su evolución en el tiempo va en aumento, incrementando la resistencia a la primera fisura y su resistencia a flexotracción pos fisurado. Se representa en el siguiente gráfico.

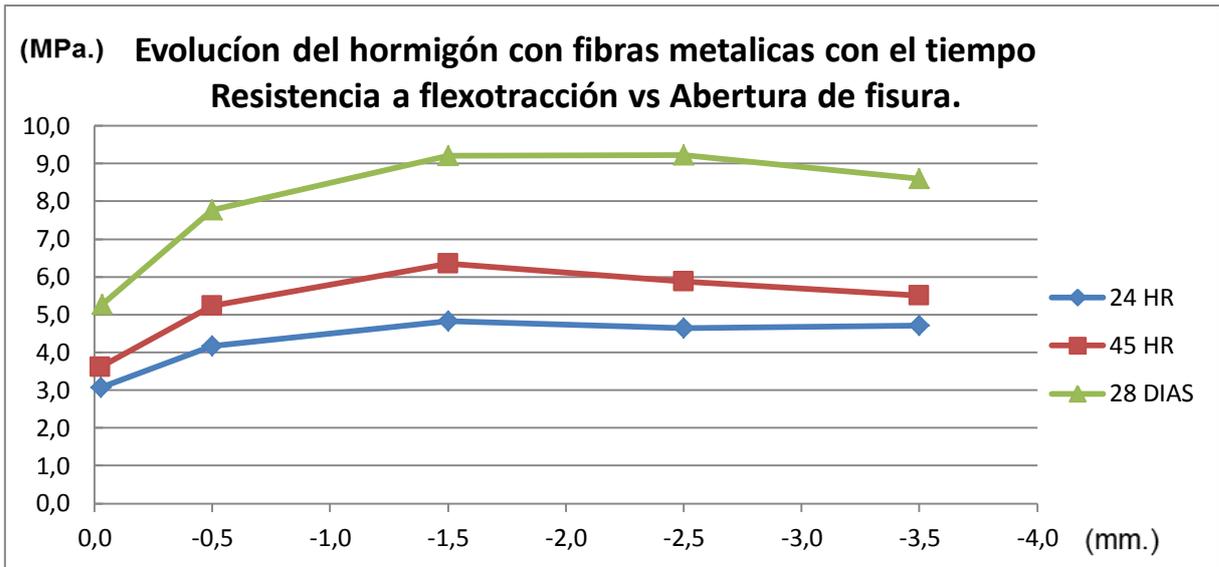


Ilustración 54: Grafico de evolución a flexotracción en fibras de metálicas

(nota: se transformado la carga (N) a resistencia residual (MPa) y se ha simplificado la gráfica representado solamente cinco puntos: f_{LOP} , $f_{R,0,5}$; $f_{R,1,5}$; $f_{R,2,5}$; $f_{R,3,5}$; sucesivamente)

2) Fibras macro sintéticas de polielefina

Su comportamiento varía en comparación a las fibras metálicas. Primero se aprecia una rama ascendente antes de la primera fisura similar a las fibras metálicas, posteriormente hay una gran caída de carga y las fibras tratan de coser el hormigón hasta que pierdan su elasticidad y se deformen juntos.

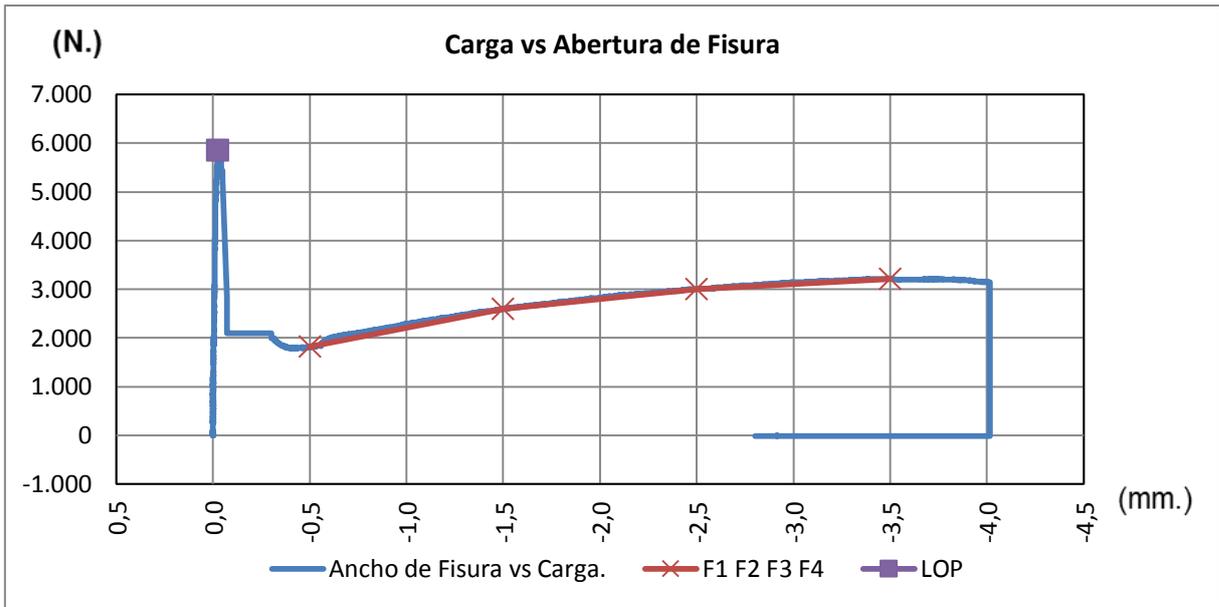


Ilustración 55: Gráfico típico de flexotracción con fibras

Su evolución en el tiempo va en aumento, incrementando la resistencia a la primera fisura y su resistencia a flexotracción pos fisurado. Se representa en el siguiente gráfico.

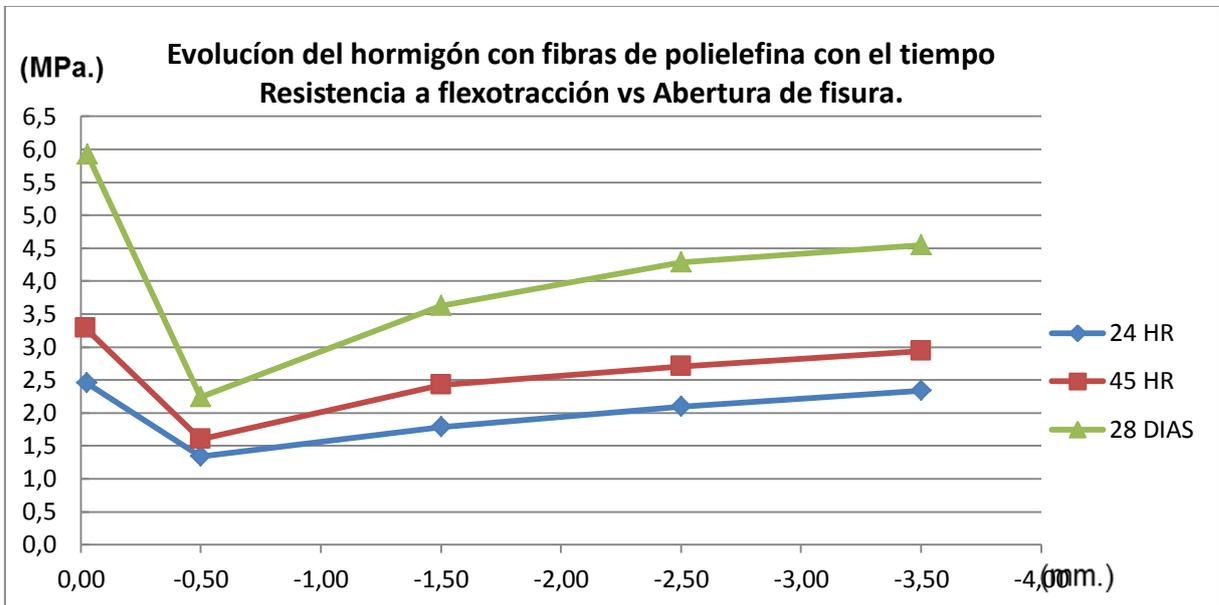


Ilustración 56: Gráfico de Evolución a flexotracción con fibras polielefina

3) Fibras micro sintéticas de polipropileno

Su comportamiento varía drásticamente en comparación con las fibras anteriores. Antes de la primera fisura es similar a las otras fibras, posteriormente hay una gran caída de carga y las fibras por su corta longitud y elasticidad no alcanzan a coser la fisura de una manera eficiente, su resistencia cae sin apenas recuperación elástica de las fibras.

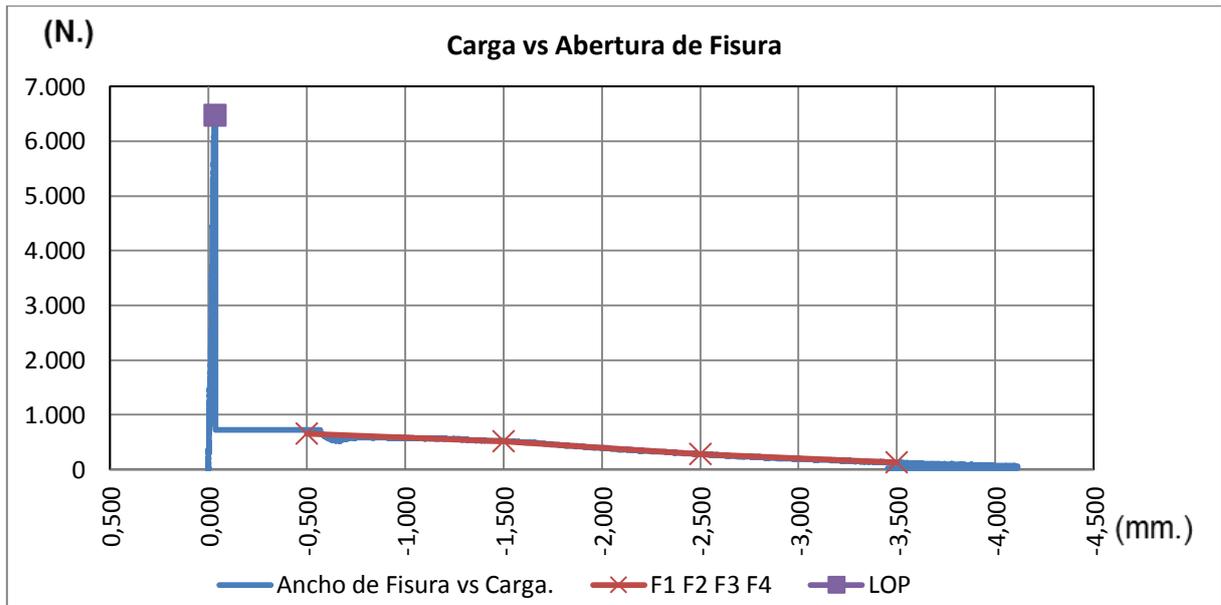


Ilustración 57: Grafico típico de resistencia a flexotracción en fibras de polipropileno

Su evolución en el tiempo antes de la primera fisura va en aumento como en los otros tipos de hormigón sin embargo, posteriores a la fisura es variable y no aporta resistencia estructural apreciable. A continuación se muestra su evolución en el siguiente gráfico.

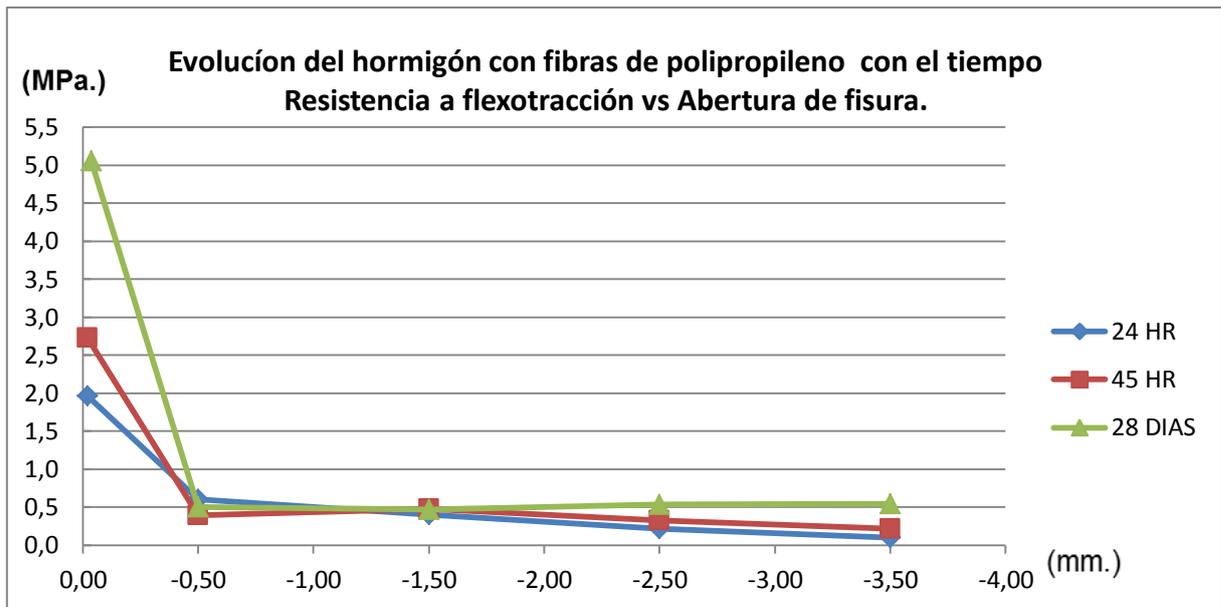


Ilustración 58: Grafico típico de evolución de resistencia a flexo tracción con fibras de polipropileno

Se aprecia que posterior la primera fisura hay una caída de hasta 90% y que la edad del hormigón no influye en la resistencia a flexotracción. Con los resultados presentados anteriormente, concluimos que este tipo de fibras cortas no tienen carácter estructural apreciable.

Análisis Cuantitativo:

1) Fibras metálicas.

Son el tipo de fibra mayor mente utilizado, debido a su efectividad de absorber carga post fisura, brinda mayor ductilidad y permite absorber más carga aun en estado fisurado. En los siguientes gráficos compararemos la resistencia a la primera fisura, la resistencia residual a 0,5 y 2,5 mm de abertura (f_L , $f_{R0,5}$, $f_{R2,5}$ sucesivamente) en función de su resistencia a 28 días.

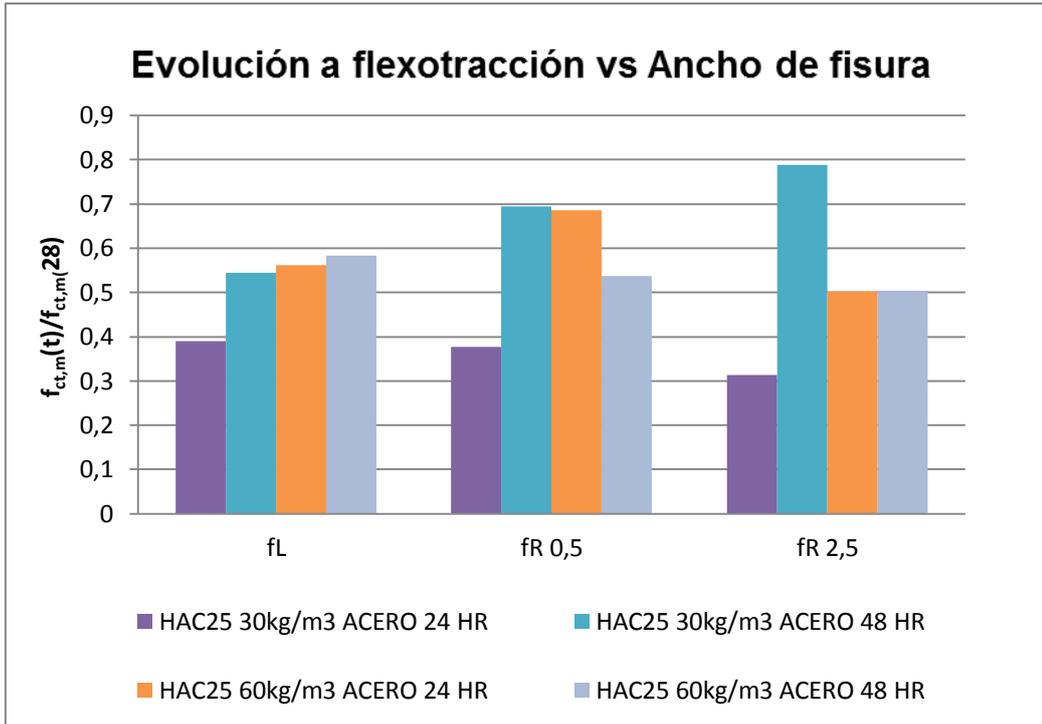


Ilustración 59: Grafico Resistencia a flexotracción vs Ancho de fisura

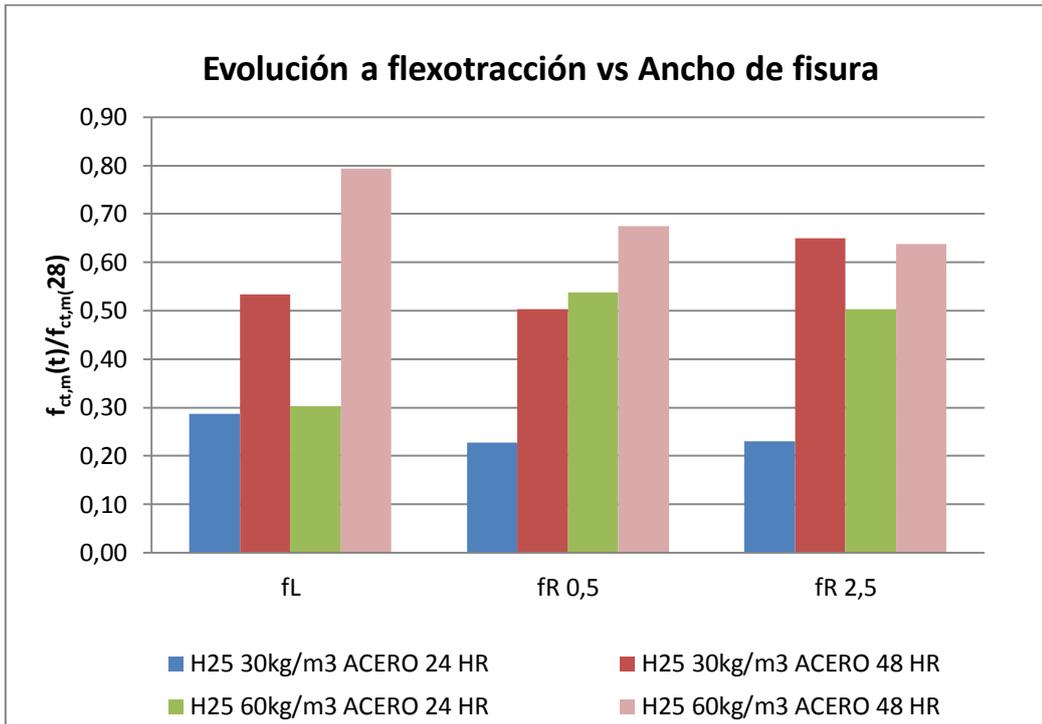


Ilustración 60: Grafico Resistencia a flexotracción vs Ancho de fisura

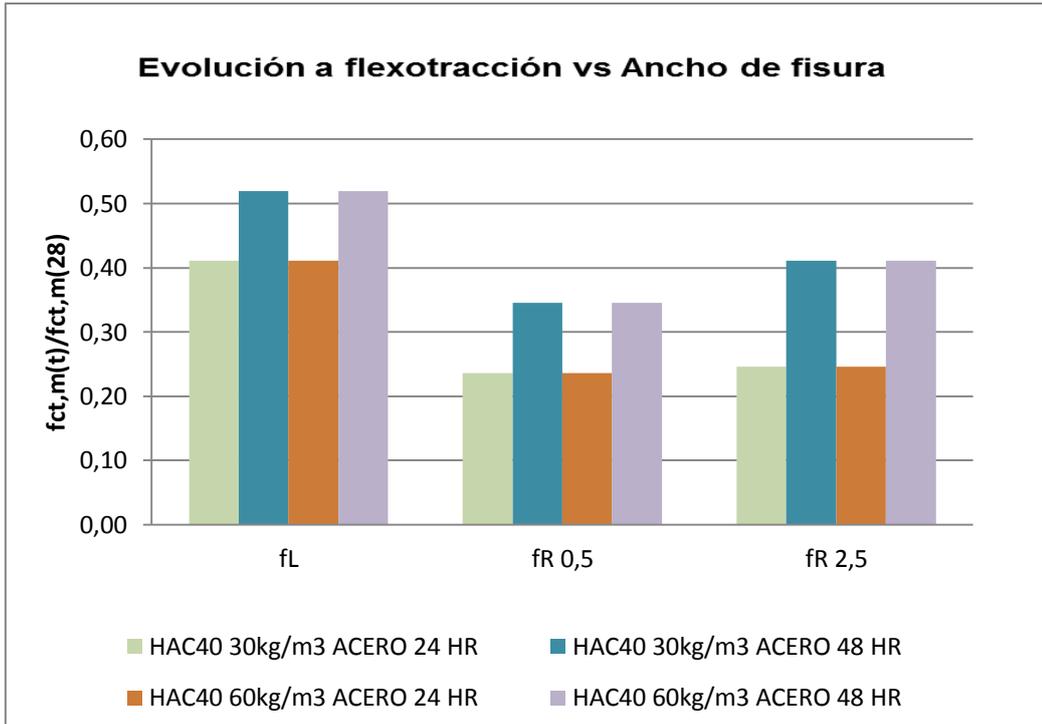


Ilustración 61: Grafico Resistencia a flexotracción vs Ancho de fisura

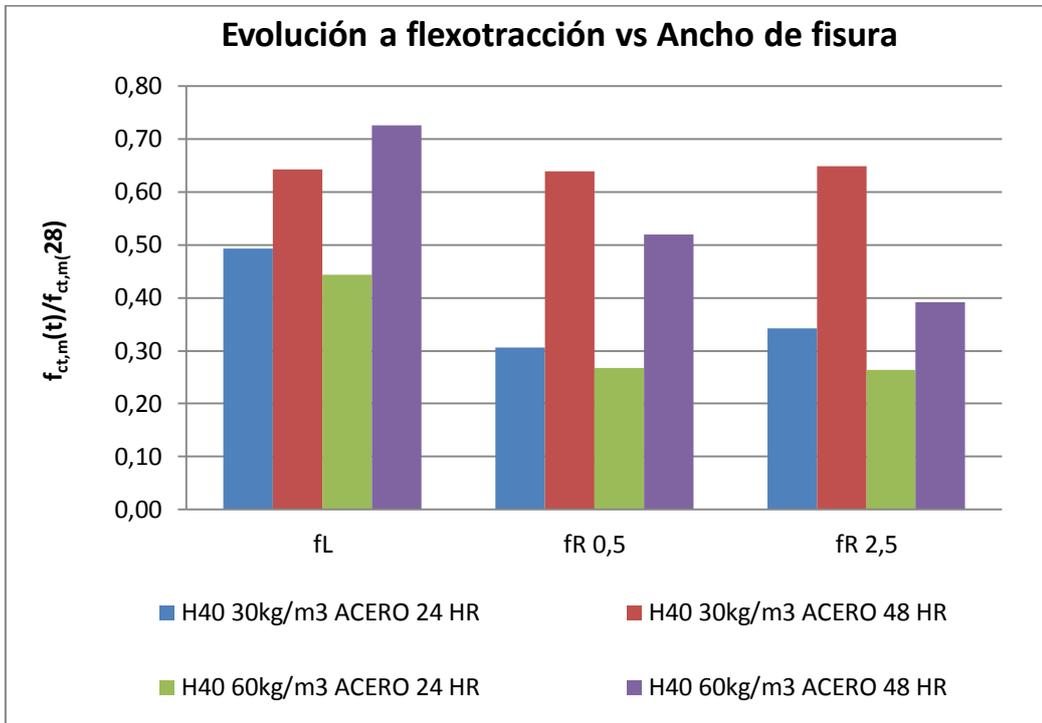


Ilustración 62: Grafico Resistencia a flexotracción vs Ancho de fisura

Los resultados pueden variar debido a que en la sección central fisurada tiene un número aleatorio de fibras que actúan en diferentes alturas.

En la siguiente grafica se muestra la evolución de la resistencia a tracción por flexión justo en el momento antes de la fisura (a 24 y 48 horas) medidos experimentalmente y teórica propuesta por la normativa EHE.

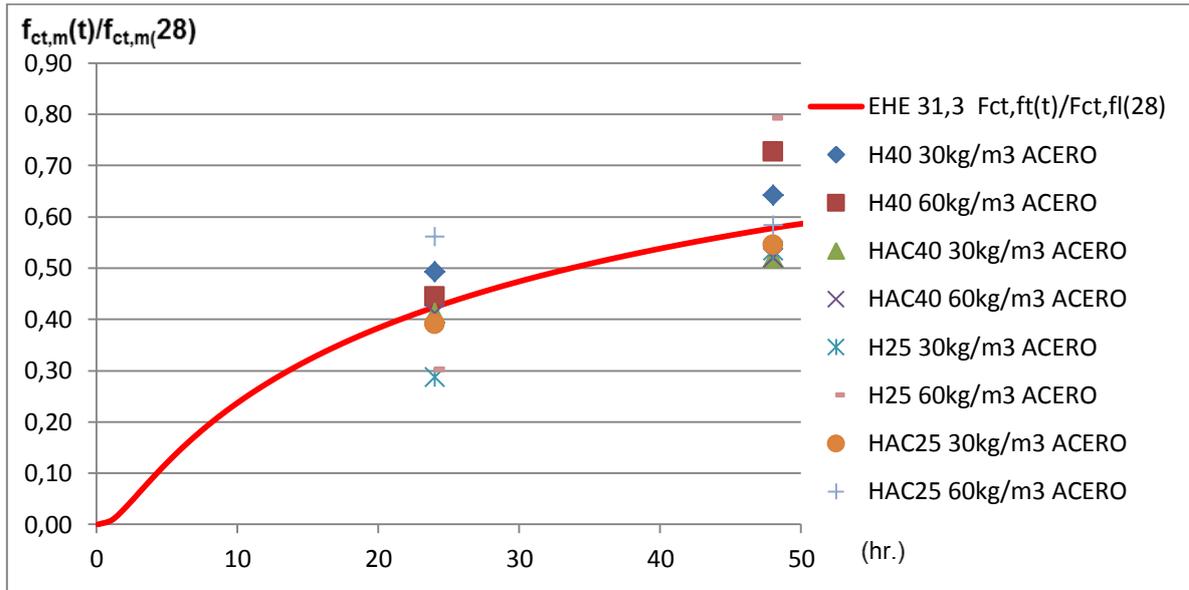


Ilustración 63: Grafico de Resistencia a Flexotracción vs Tiempo

Podemos apreciar que los resultados experimentales están muy bien ajustados a la curva teórica.

2) Fibras de polielefina

Las fibras de polielefina a diferencia que las de acero, estas tienen una caída de resistencia post fisura mucho mayor, en los siguientes gráficos compararemos la resistencia a la primera fisura, la resistencia residual a 0,5 y 2,5 mm de abertura (f_L , $f_{R0,5}$, $f_{R2,5}$ sucesivamente) en función de su resistencia a 28 días.

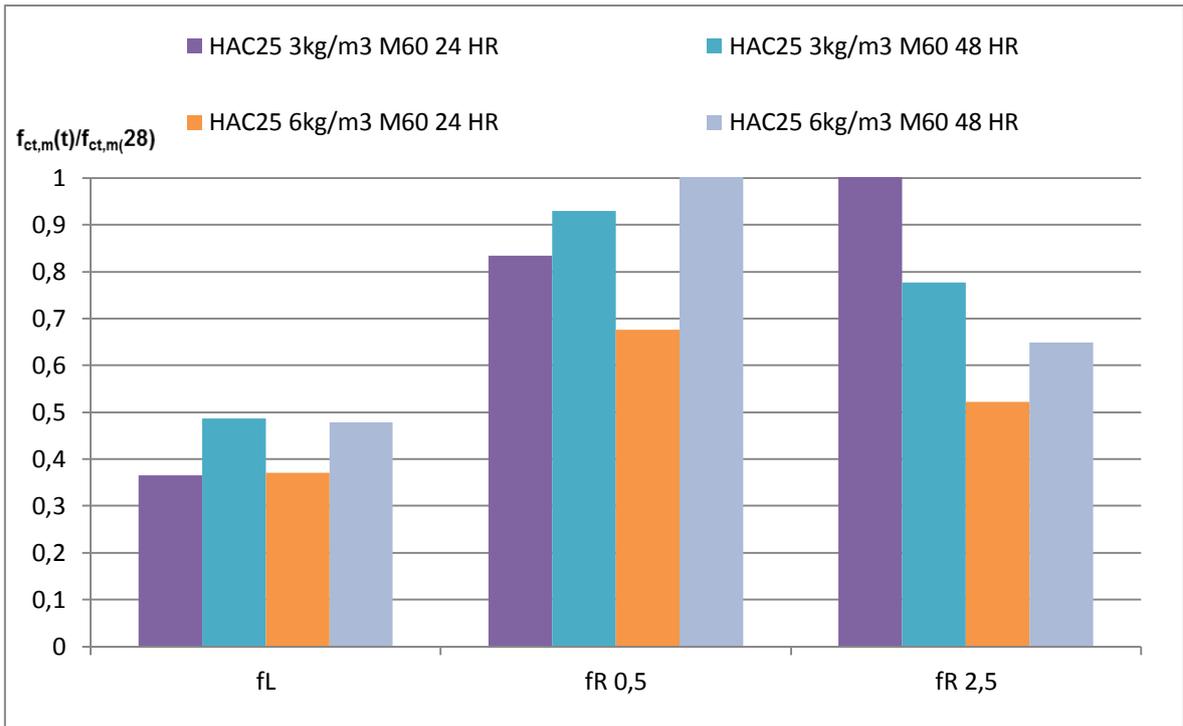


Ilustración 64: Grafico de Resistencia a Flexotracción vs Ancho de fisura

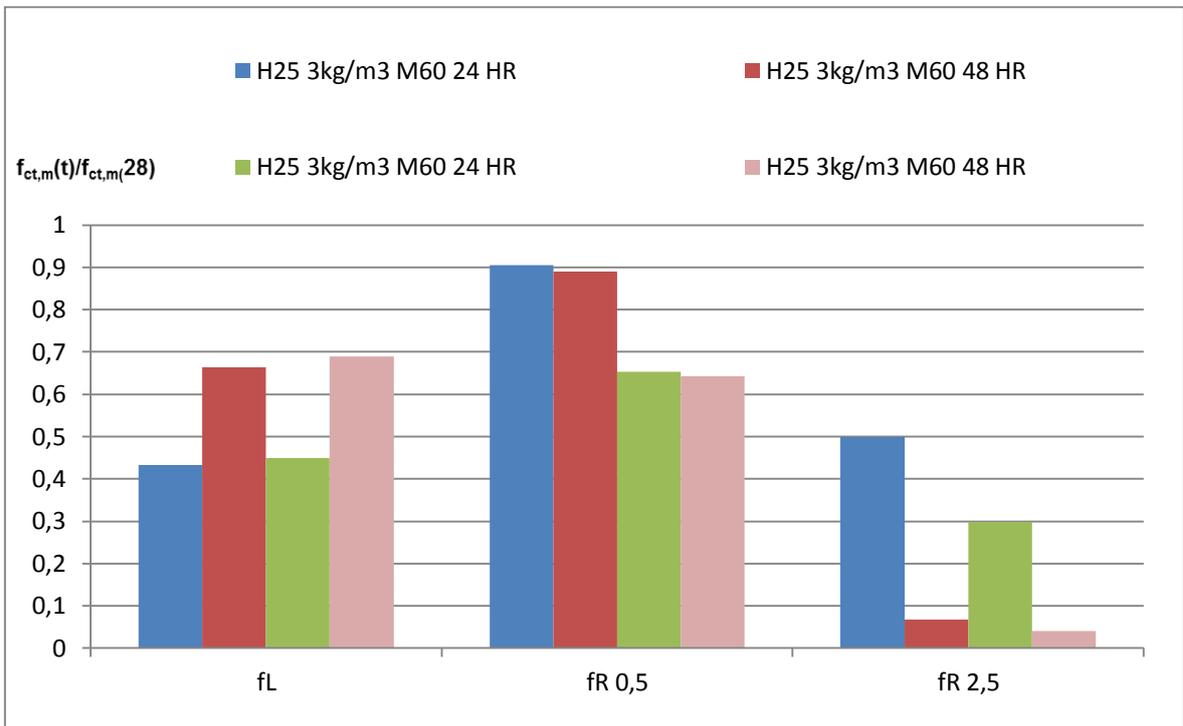


Ilustración 65: Grafico de Resistencia a Flexotracción vs Ancho de fisura

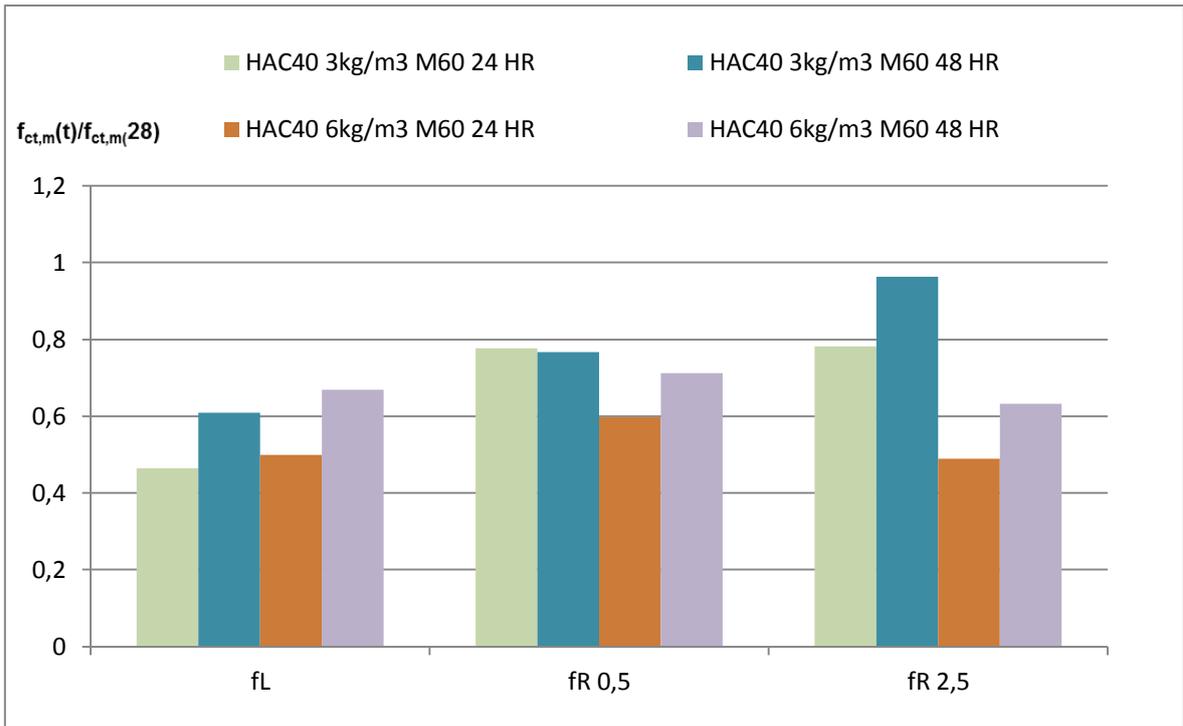


Ilustración 66: Grafico de Resistencia a Flexotracción vs Ancho de fisura

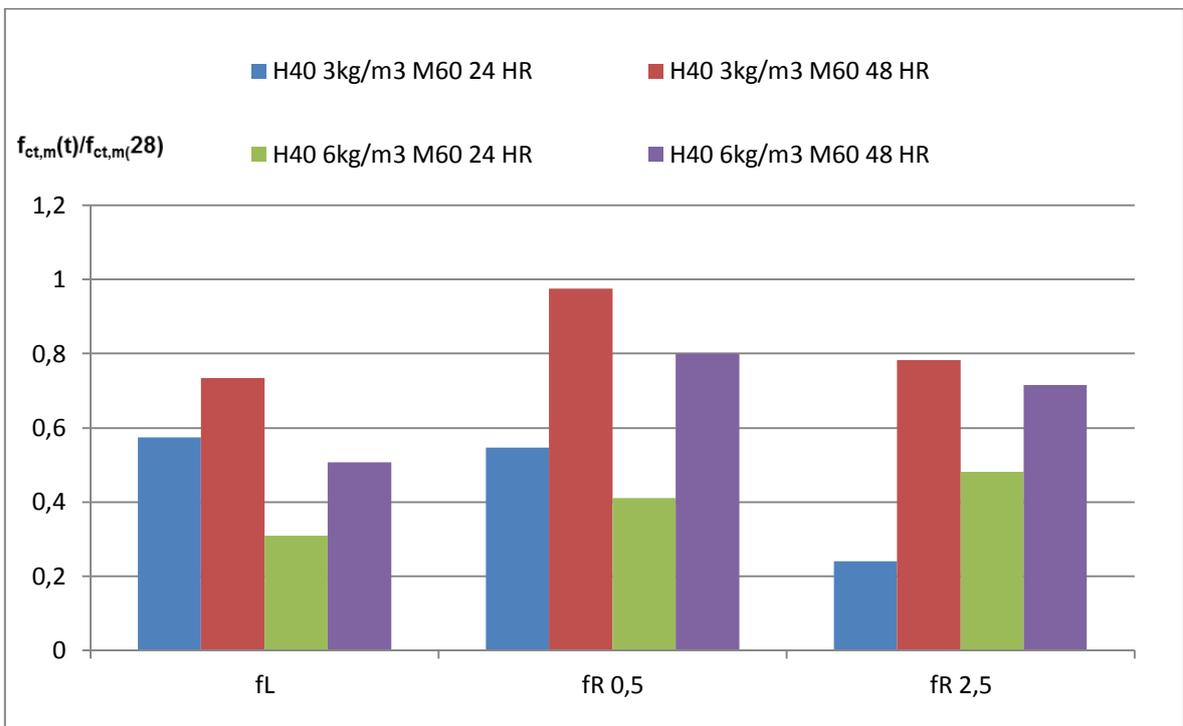


Ilustración 67: Grafico de Resistencia a Flexotracción vs Ancho de fisura

En la siguiente grafica se muestra la evolución de la resistencia a tracción por flexión justo en el momento antes de la fisura (a 24 y 48 horas) medidos experimentalmente y teórica propuesta por la normativa EHE.

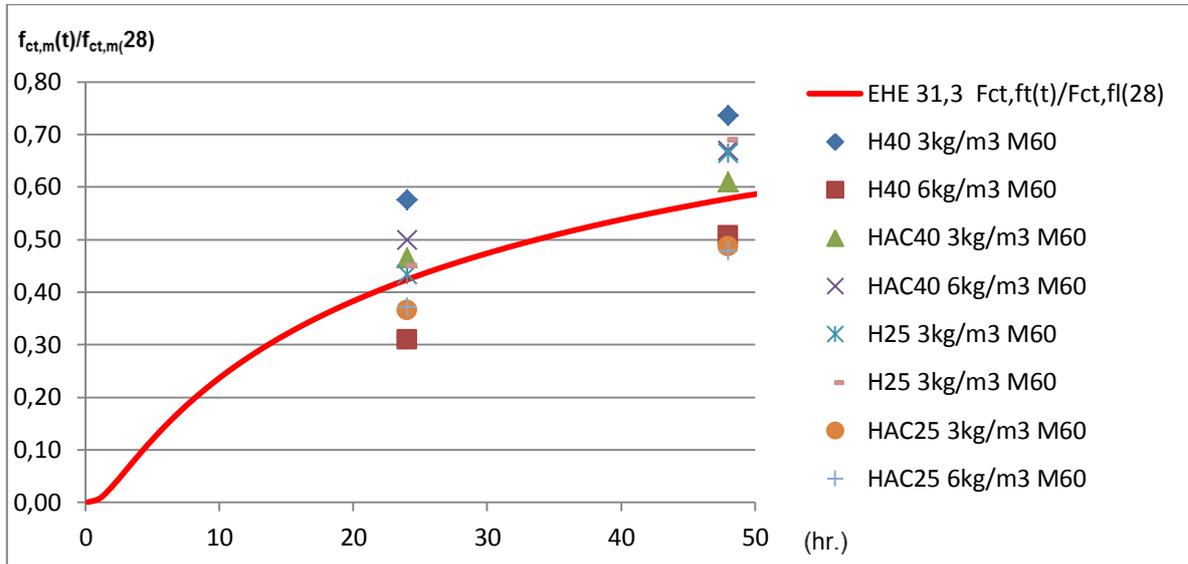


Ilustración 68: Grafico de Resistencia a Flexotracción vs tiempo

Podemos apreciar que los resultados experimentales están muy bien ajustados a la curva teórica al igual que las fibras metálicas.

3) Fibras de polipropileno

Las fibras de polipropileno no aportaron resistencia estructural pos fisura, por tal motivo solo analizaremos la evolución de la resistencia a tracción por flexión justo en el momento antes de la fisura (a 24 y 48 horas) medidos experimentalmente y teórica propuesta por la normativa EHE.

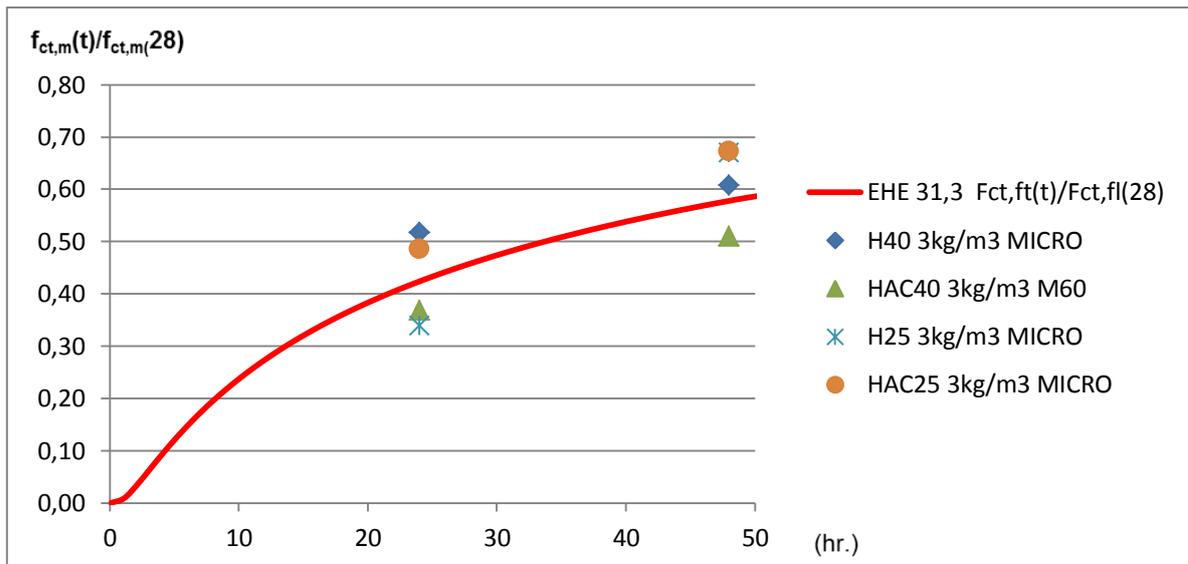


Ilustración 69: Grafico de Resistencia a Flexotracción vs tiempo

Podemos apreciar que los resultados experimentales están muy bien ajustados a la curva teórica al igual que las otras fibras ensayadas, podemos deducir que las fibras afectan muy poco en el comportamiento del hormigón a flexo tracción antes de la fisura.

Analizando el resultado obtenido se concluye lo siguiente:

- La resistencia a flexotracción aumenta con la edad, donde a temprana edad pueden adquirir hasta un 40% de su resistencia.
- El tipo de fibra contribuye a la resistencia post fisura y aumentar la ductilidad sin embargo, las características mecánicas del tipo de fibra así como la adherencia con la matriz del hormigón son las que determinan su desempeño estructural o el colapso.
- El tipo de fibra tiene poca influencia en el comportamiento antes de la fisura.

5.4.1 Resultados de ensayo de retracción restringida. (Anillo restringido)

Los resultados del ensayo de retracción restringida solo fueron realizados con hormigón sin adición de fibras y se presentan a continuación:

RETRACCIÓN RESTRINGIDA				
ANILLO RESTRINGIDO				
Ø int 305 mm. x Ø ext 400 mm. x 140 mm.				
MUESTRAS	#1		#2	
	aparición de fisura (días)	ancho de fisura (mm)	aparición de fisura (días)	ancho de fisura (mm)
H25	7	0,200	7	0,200
HAC25	7	0,400	7	0,300
H40	7	0,050	7	0,100
HAC40	7	0,300	7	0,300

Ilustración 70: Tabla resultado de Retracción Restringida

El ancho de fisura se midió con una regla de abertura de fisura

5.4.2 Análisis de ensayo de retracción restringida.

Los resultados del ensayo de anillo restringido dieron como resultado unánime que al final del séptimo día todos los tipos de hormigones fisuran. El menor ancho de fisura ocurre en los hormigones tradicionales.

A continuación realizamos un cálculo aproximado de la deformación unitaria el hormigón alcanzado al séptimo día.

muestra	retracción diámetro exterior por la fisura x 10 ⁻⁶ (ε)	
	#1	#2
H25	159	159
HAC25	318	239
H40	40	80
HAC40	239	239

Ilustración 71: Tabla estimación aproximada de esfuerzo antes de la fisura

Antes de fisurar el hormigón sufrió una retracciones superiores a 40x10⁻⁶ (ε)

5.5.1 Resultados de retracción libre total

Los ensayos de retracción libre total fueron realizados tomando como tiempo inicial la hora de desencofrado (20 horas) y colocación de puntos de DEMEK. En la siguiente tabla se presentan los resultados:

RETRACCIÓN LIBRE			
(ε) deformación unitaria x 10 ⁻⁶			TIPO DE HORMIGÓN
24horas	48horas	72horas	
-27	-33	-53	H25 sin fibras
0	-33	-60	H25 30 Kg./m3 metálica, Dramix 65/60
-7	-30	-73	H25 60 Kg./m3 metálica, Dramix 65/60
-3	-67	-97	H25 3 Kg./m3 macro sintética, polielefina, SIKA M – 60
-20	-53	-110	H25 6 Kg./m3 micro sintética, polielefina, SIKA M – 60
-23	-50	-107	H25 3 Kg./m3 micro sintética, polipropileno, CHRYSO Fibre-P31
0	-33	-127	HAC25 sin fibras
0	-30	-130	HAC25 30 Kg./m3 metálica, Dramix 65/60
-3	-13	-123	HAC25 60 Kg./m3 metálica, Dramix 65/60
-23	-37	-147	HAC25 3 Kg./m3 macro sintética, polielefina, SIKA M – 60
-17	-33	-143	HAC25 6 Kg./m3 macro sintética, polielefina, SIKA M – 60
-3	-13	-123	HAC25 3 Kg./m3 micro sintética, polipropileno, CHRYSO Fibre-P31
			HAC25 6 Kg./m3 micro sintética, polipropileno, CHRYSO Fibre-P31
-30	-60	-83	H40 sin fibras
-17	-47	-77	H40 30 Kg./m3 metálica, Dramix 65/60
-13	-33	-100	H40 60 Kg./m3 metálica, Dramix 65/60
-30	-53	-77	H40 3 Kg./m3 macro sintética, polielefina, SIKA M – 60
-3	-73	-137	H40 6 Kg./m3 micro sintética, polielefina, SIKA M – 60
-7	-67	-123	H40 3 Kg./m3 micro sintética, polipropileno, CHRYSO Fibre-P31
-7	-80	-150	HAC40 sin fibras
-30	-60	-137	HAC40 30 Kg./m3 metálica, Dramix 65/60
-23	-67	-163	HAC40 60 Kg./m3 metálica, Dramix 65/60
-7	-73	-157	HAC40 3 Kg./m3 macro sintética, polielefina, SIKA M – 60
-17	-43	-163	HAC40 6 Kg./m3 micro sintética, polielefina, SIKA M – 60
-27	-33	-127	HAC40 3 Kg./m3 micro sintética, polipropileno, CHRYSO Fibre-P31

Ilustración 72: Tabla Resultado de retracción libre

Gráfico general de ensayo de retracción libre total

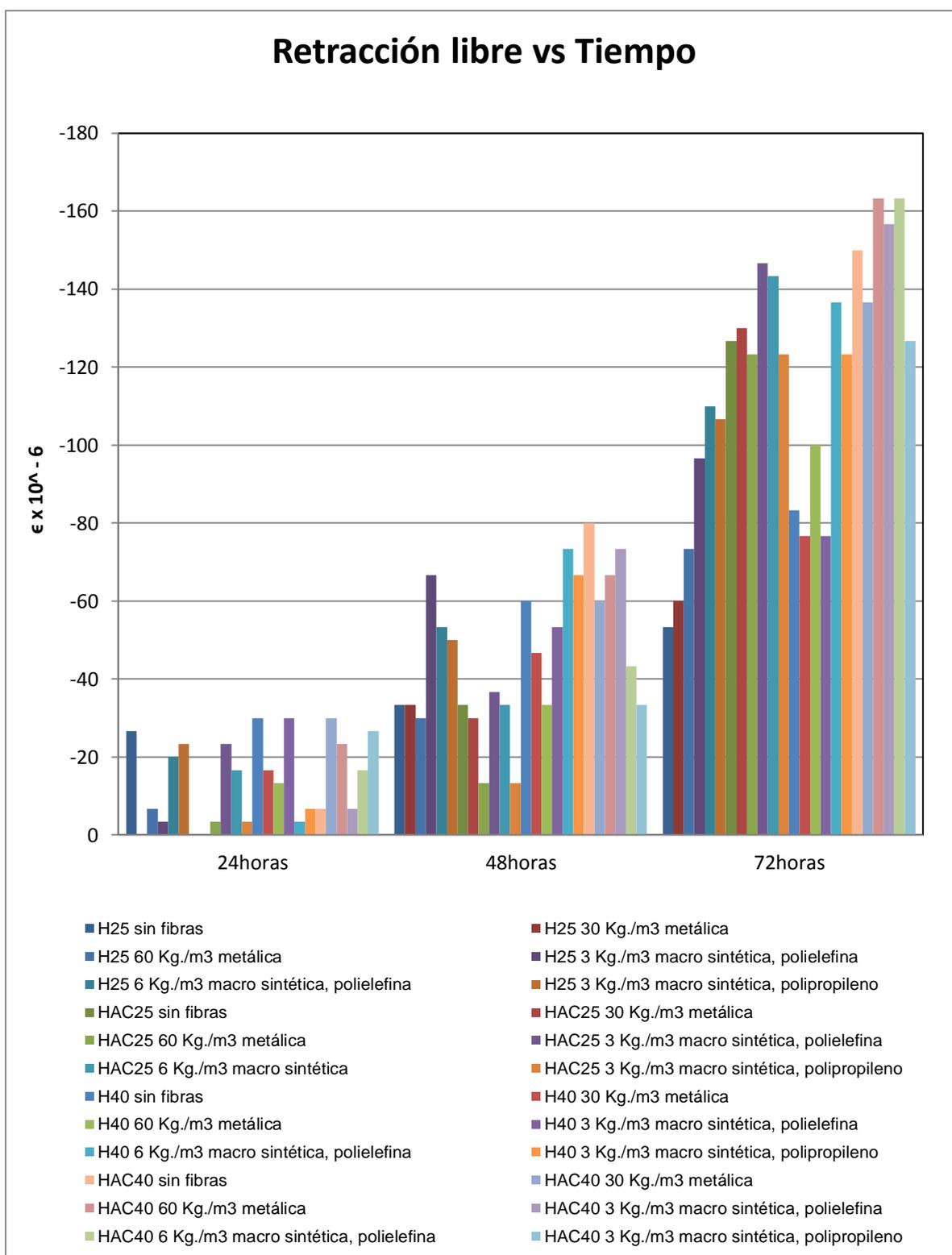


Ilustración 73: Grafico de Retracción libre vs Tiempo

5.5.2 Análisis de ensayo retracción libre total

Comenzamos analizando la retracción de los cuatro tipos de hormigones sin adición de fibras. Podemos observar que los dos hormigones autocompactantes a 72 horas tienen casi el doble de retracción en comparación con los tradicionales.

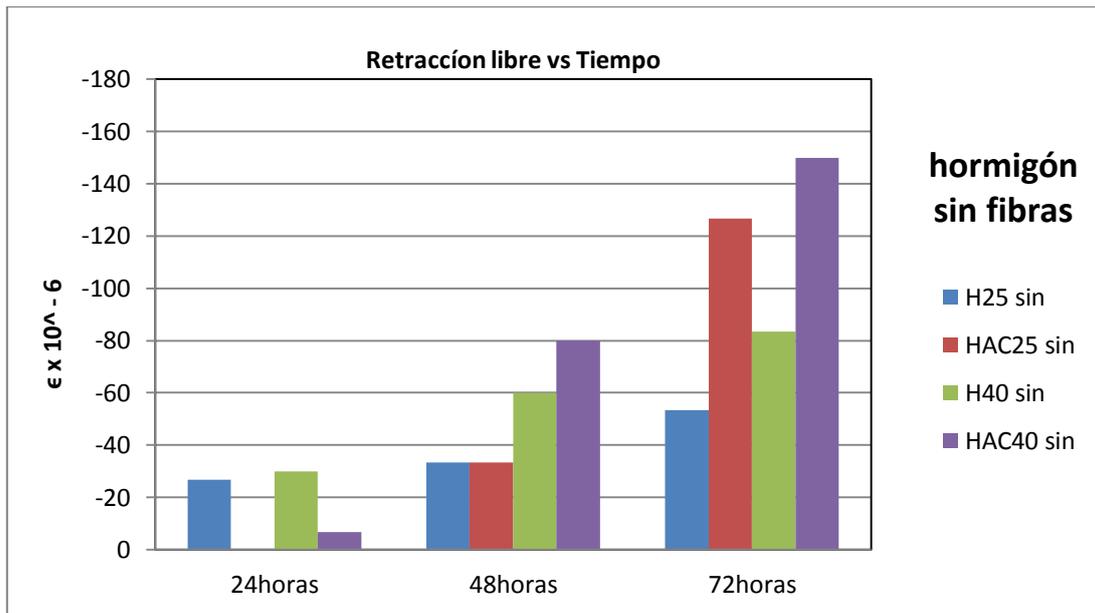


Ilustración 74: Grafico de Retracción libre en función de tiempo

Sabiendo que el tamaño de agregados y el tipo de fibras pueden restringir las retracciones en el hormigón a largo plazo, a continuación analizaremos si la adición de fibras contribuye a la retracción total a temprana edad.

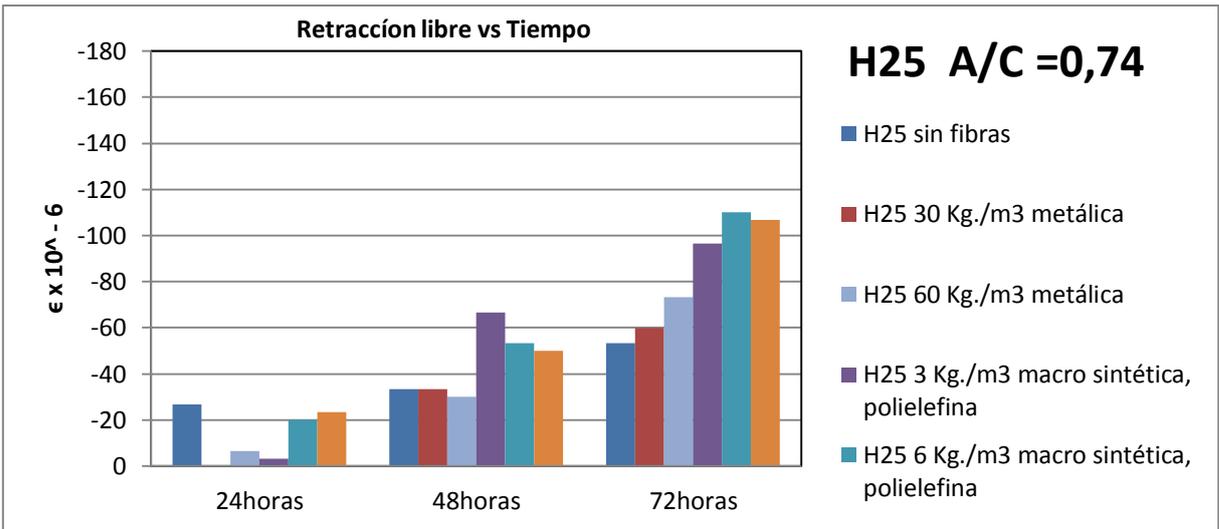


Ilustración 75: Grafico de Retracción libre en función de tiempo

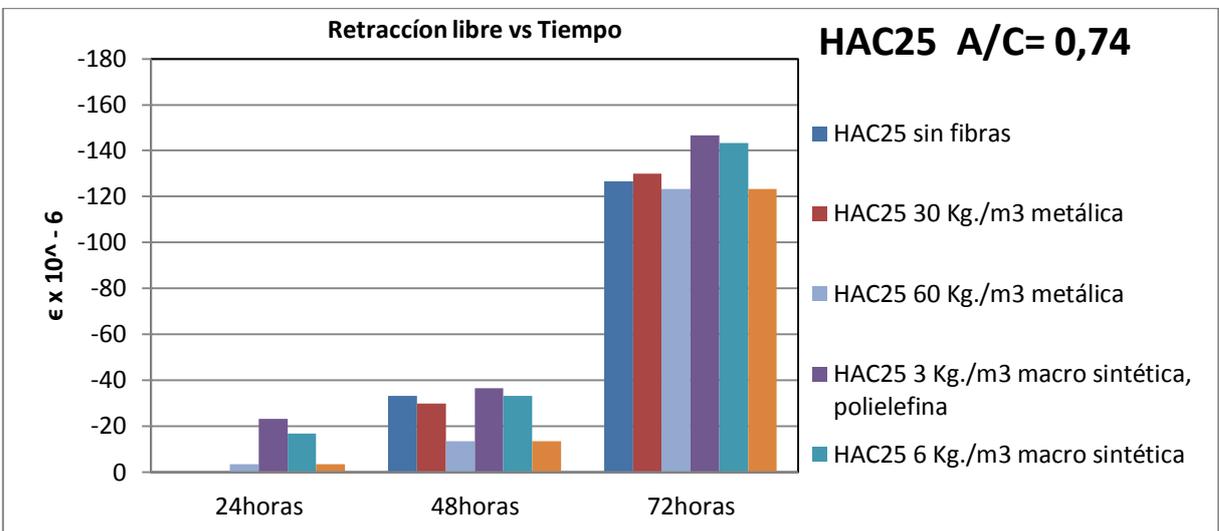


Ilustración 76: Grafico de Retracción libre en función de tiempo

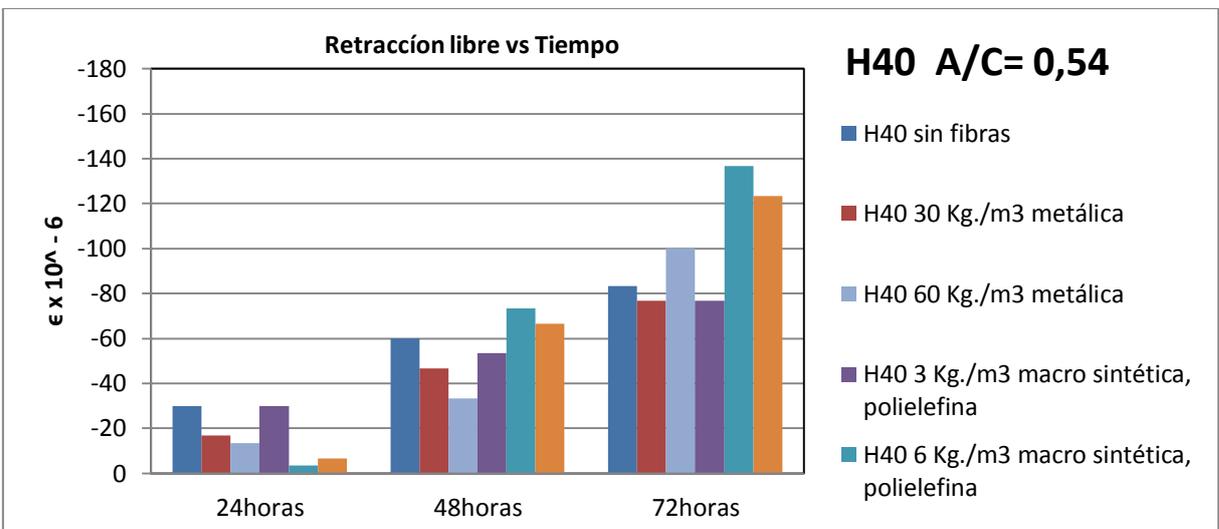


Ilustración 77: Grafico de Retracción libre en función de tiempo

Con excepción de pequeñas variaciones, no se aprecian resultados notables que las fibras contribuyan a la retracción antes de las 72 horas sin embargo, las fibras metálicas tiene una ligera mejoría en la restricción de la retracción total . Ahora analizaremos cada tipo de fibra por separado.

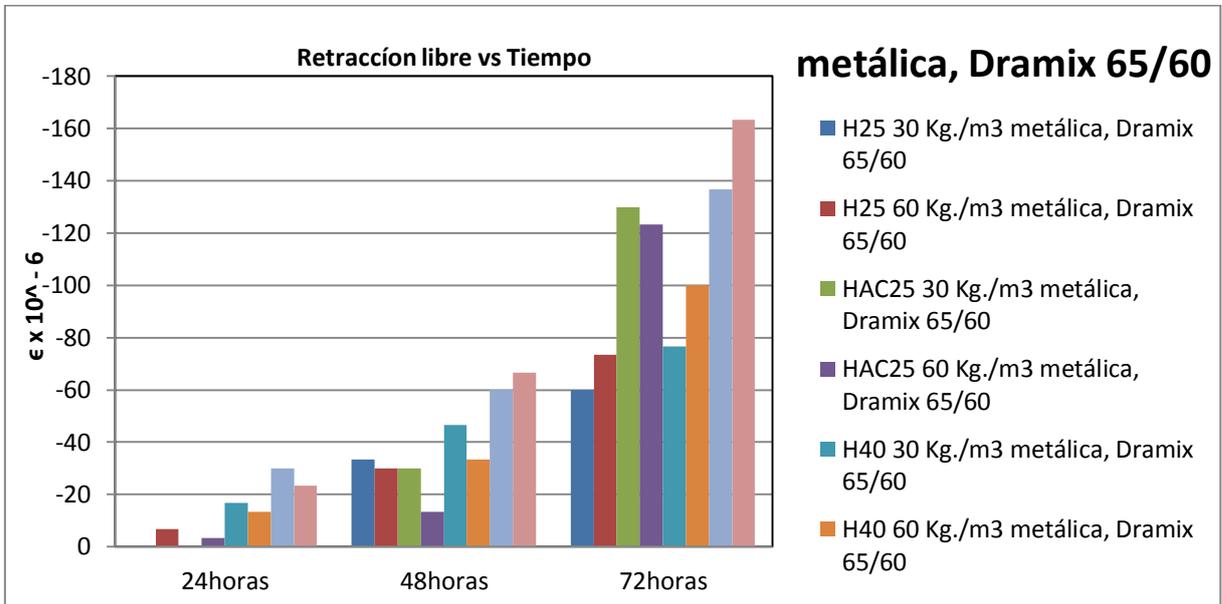


Ilustración 78: Grafico de Retracción libre en función de tiempo

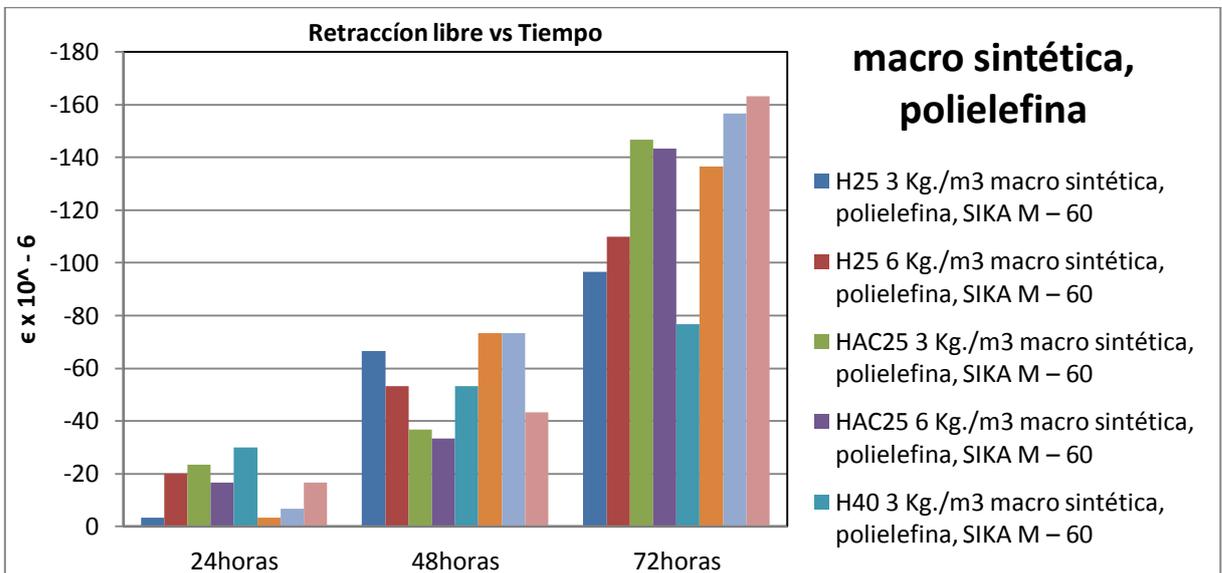


Ilustración 79: Grafico de Retracción libre en función de tiempo

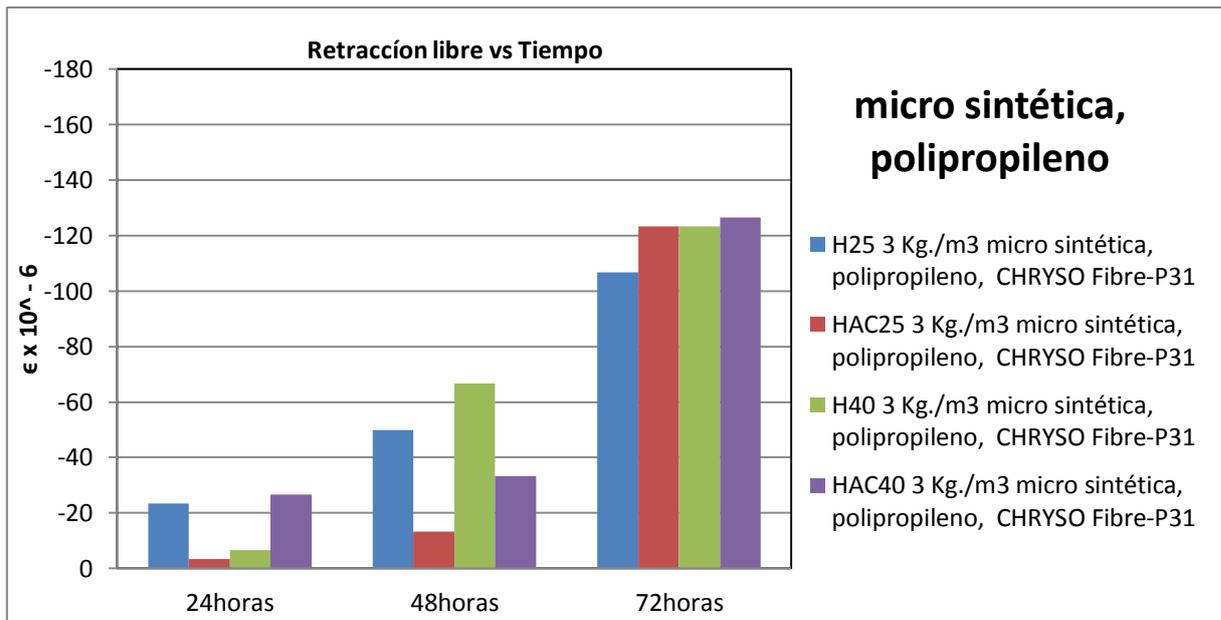


Ilustración 80: Grafico de Retracción libre en función de tiempo

Podemos notar que en todos los casos, los hormigones de tipo autocompactantes tienen mayor retracción comparando con los hormigones tradicionales, esto quiere decir que el uso aditivos superplastificantes en proporciones superiores al 1% del peso del cemento hasta un 200 % la retracción total a 72 horas.

En base a los resultados de las gráficas anteriores podemos resumir lo siguiente:

- El uso de aditivos para obtener hormigones autocompactantes pueden provocar aumento significativo en la retracción total antes de las 72 horas.
- La adición de fibras al hormigón contribuye ligeramente en la reducción de la retracción total, especialmente las fibras rígidas (metálicas).
- La relación A/C no influye de manera notable en la retracción durante las primeras 72 horas.

6 CAPÍTULO VI Análisis de datos experimentales y ajustes

6.1 Análisis paramétrico de compresión y módulo elástico por método de mínimos cuadrados

En función de los datos de ensayos mecánicos mostrados en el capítulo 5 y la diferencia en el cálculo del coeficiente de madurez del hormigón (Eurocodigo2; EHE y Código modelo; ver capítulo 2), Podemos apreciar una gran diferencia entre los valores teóricos y experimentales en el siguiente gráfico de dispersión.

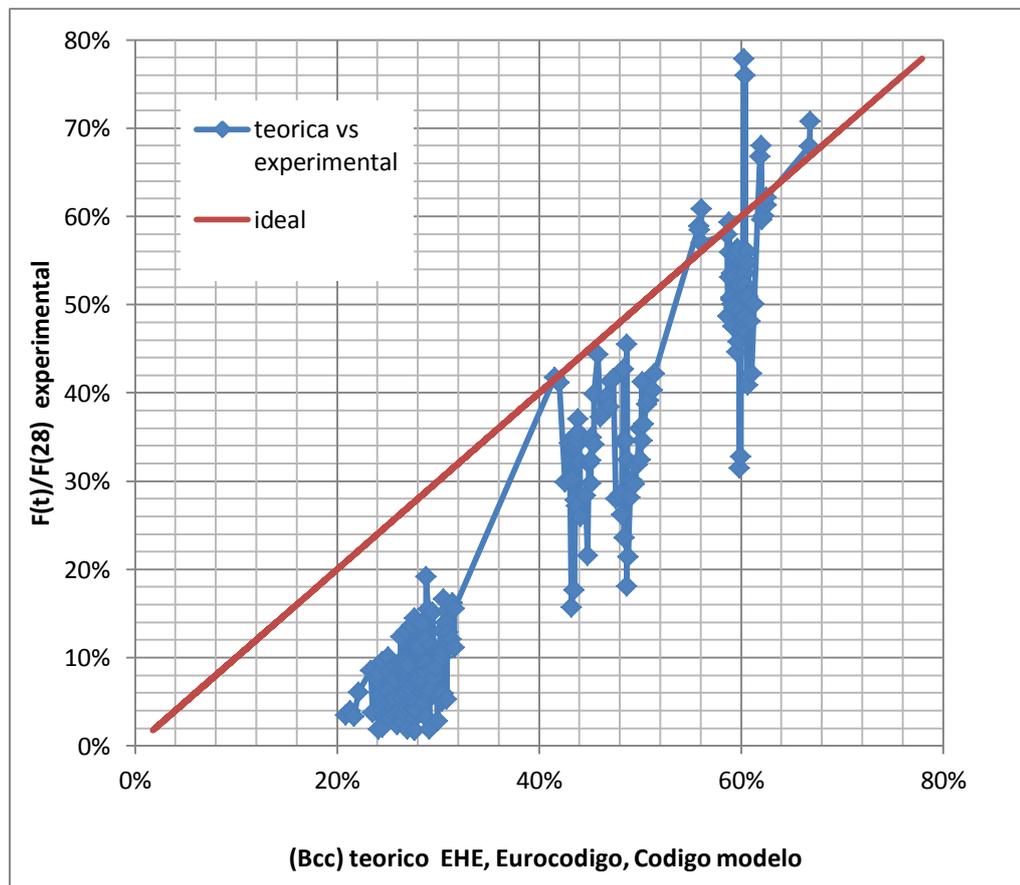


Ilustración 81: Grafico de dispersión (compresión). La línea roja (ideal) representa resultados experimental = cálculos teóricos; La Línea azul representa resultados experimentales /resultados teóricos (compresión).

Podemos apreciar que a tempranas edades, cuando el hormigón tiene menos del 50% de su resistencia, los resultados están por debajo de los valores teóricos con una desviación del 17%.

El 100 % de los valores registrados antes de las primeras 50 horas, tanto de compresión y módulo elástico son inferiores a los esperados con los cálculos de las normas. Estos resultados son alarmantes debido a que los valores de cálculos de las normas no son conservadoras a tempranas edades, por tal razón en este capítulo se realiza un análisis para ajustar los datos.

En la sección 2.4.1, se describió la ecuación del coeficiente de edad del hormigón, realizando una pequeña modificación podemos obtener:

Ecu.propuesta#1) ecuación de ajuste de 1 parámetro (coeficiente)

$$\beta_{cc} = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t-t_0} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad \text{Ecu. 23}$$

Ecu.propuesta#2) ecuación de ajuste de 2 parámetros

$$\beta_{cc} = \exp \left\{ s * k_{te} \left[1 - \left(\frac{28}{t-t_0} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad \text{Ecu. 24}$$

Coeficiente t_0 = tiempo de fin de fraguado (horas).

Coeficiente k_{te} = coeficiente modificador del cemento a temprana edad.

A continuación se procede a calibrar los coeficientes, utilizando el método de mínimos cuadrados, ajustando los datos experimentales con la mínima desviación estándar (DS), de forma similar se realiza el análisis del módulo de elasticidad.

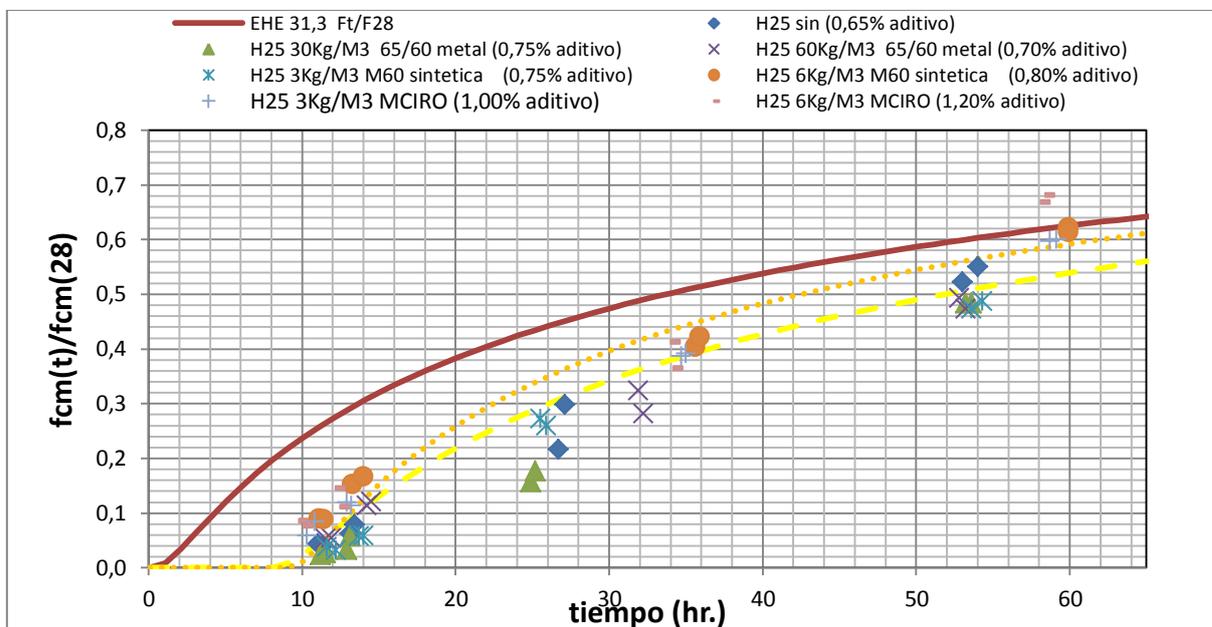
(Las tablas de los resultados se muestra en el anejo 3)

Ajuste por mínimos cuadrados (compresión)

H25 A/C= 0,74

1 parámetro: $t_0=8,82$ h. (DS= 0,067)

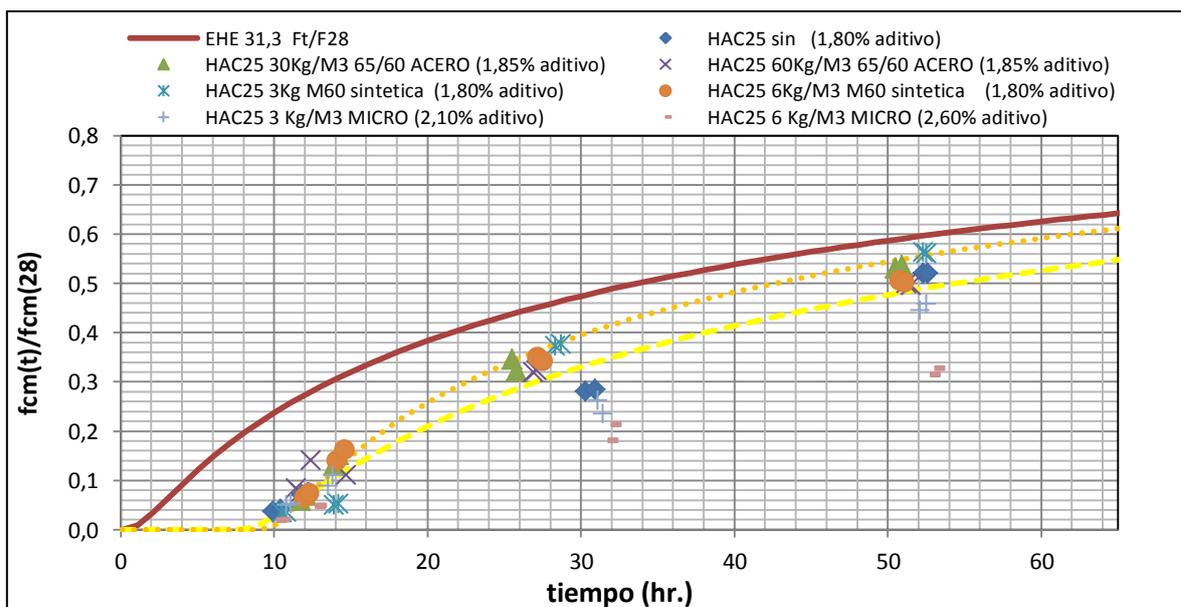
2 parámetro: $t_0=8,82$ h. $K_{te}=1,14$ (DS=0,056)



HAC25 A/C= 0,74

1 parámetro: $t_0=8,91$ h. (DS= 0,080)

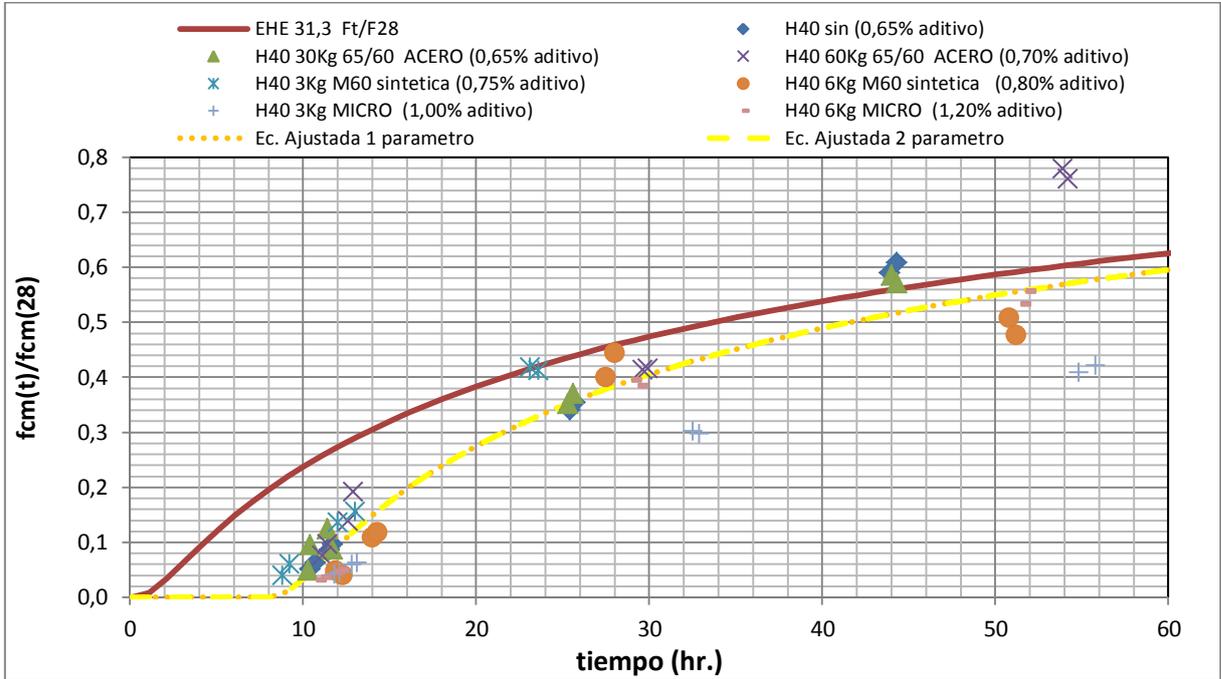
2 parámetro: $t_0=8,91$ h. $K_{te}=1,20$ (DS=0,063)



H40 A/C= 0,54

1 parámetro: $t_0=7,99$ h. (DS= 0,070)

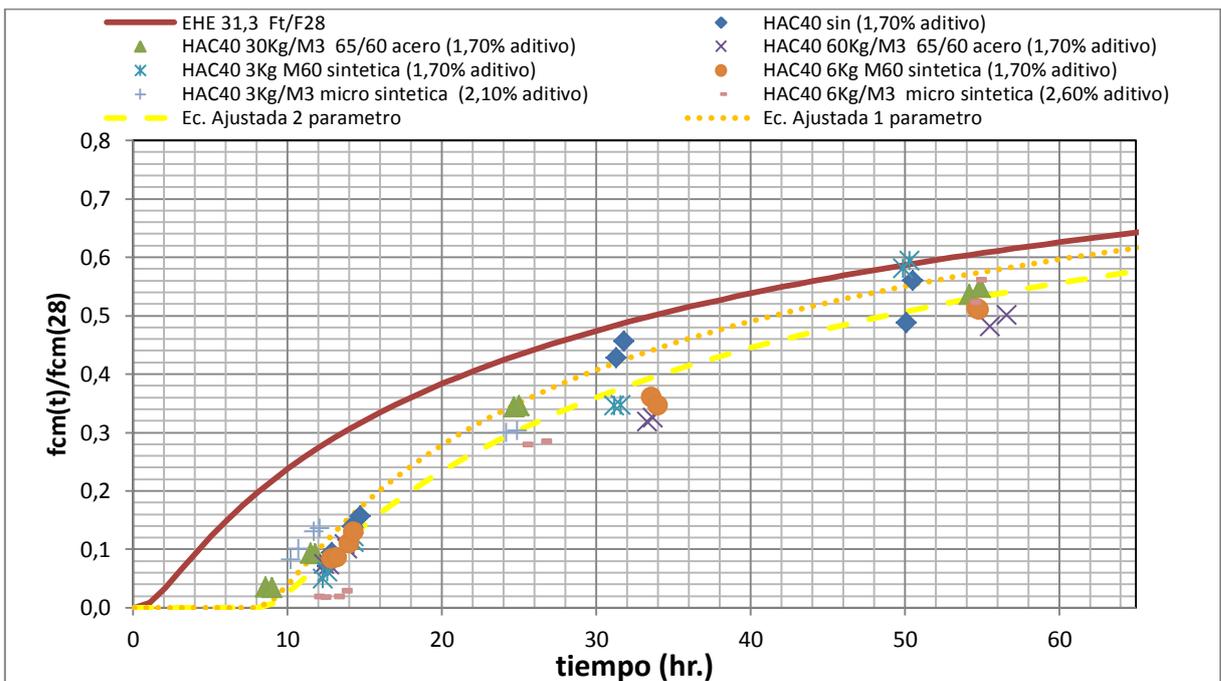
2 parámetro: $t_0=7,99$ h. $K_{te}=1,00$ (DS=0,070)



HAC40 A/C= 0,58

1 parámetro: $t_0=7,74$ h. (DS= 0,058)

2 parámetro: $t_0=7,74$ h. $K_{te}=1,14$ (DS=0,044)

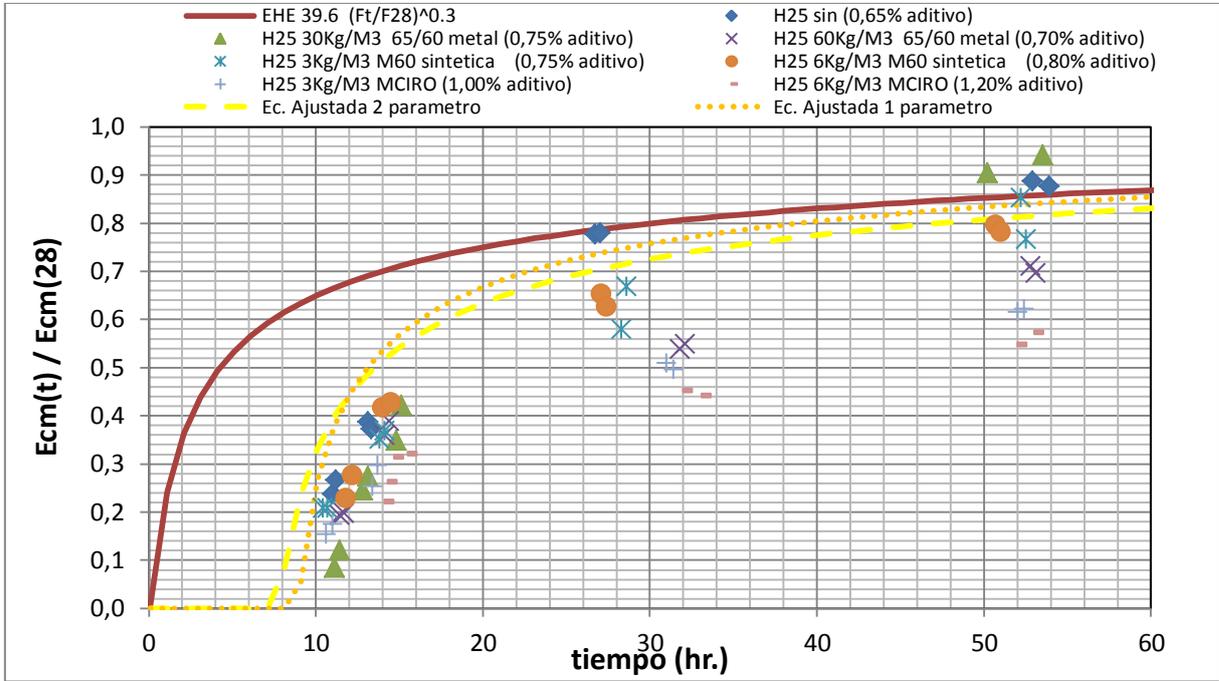


Ajuste por mínimos cuadrados (módulo elástico)

H25 A/C= 0,74

1 parámetro: $t_0=8,82$ h. (DS= 0,200)

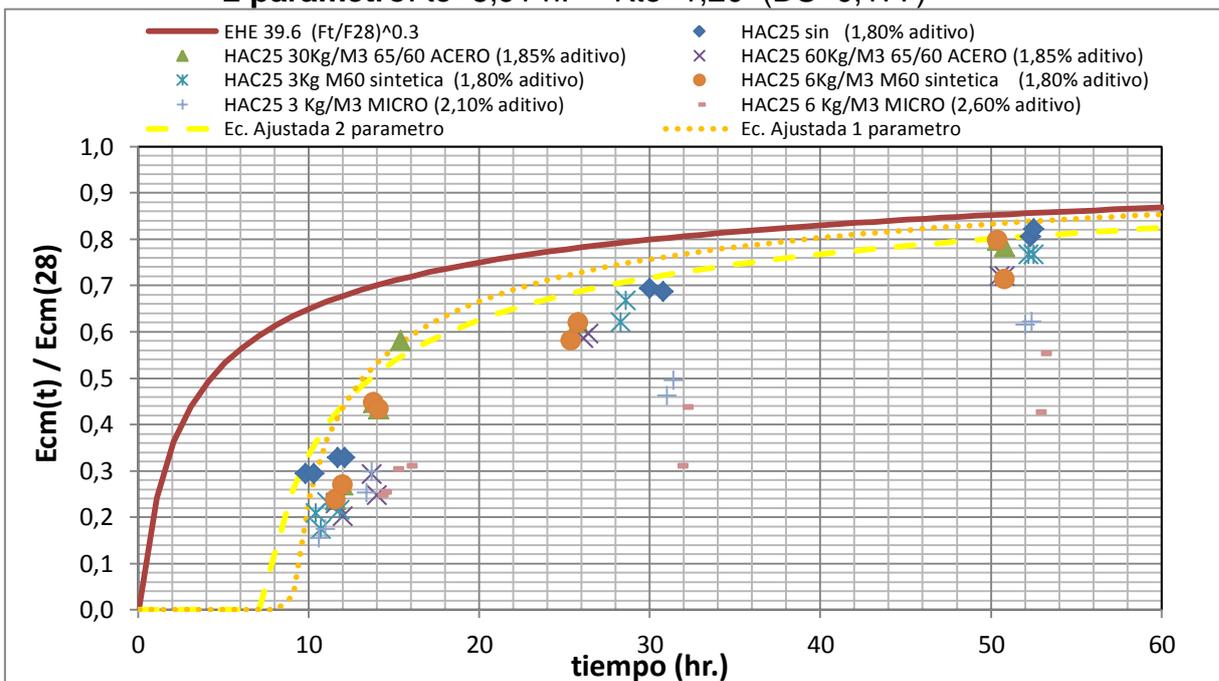
2 parámetro: $t_0=8,82$ h. $K_{te}=1,14$ (DS=0,188)



HAC25 A/C= 0,74

1 parámetro: $t_0=8,91$ h. (DS= 0,191)

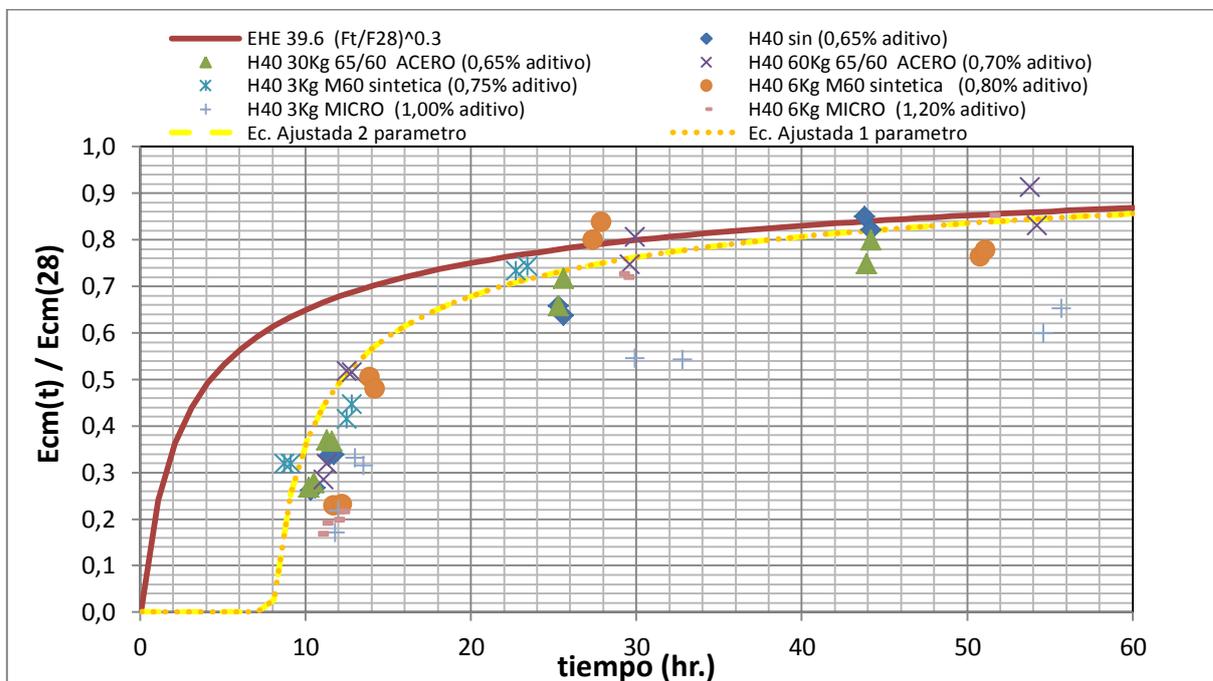
2 parámetro: $t_0=8,91$ h. $K_{te}=1,20$ (DS=0,177)



H40 A/C= 0,54

1 parámetro: $t_0=7,99$ h. (DS= 0,152)

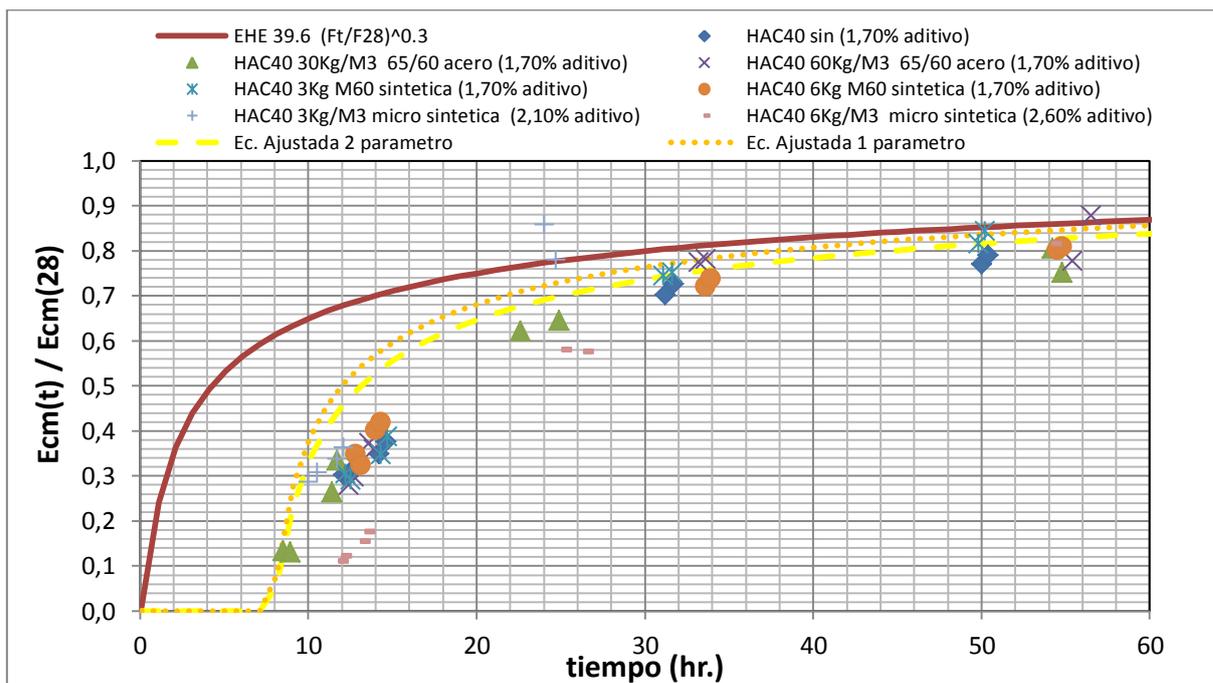
2 parámetro: $t_0=7,99$ h. $K_{te}=1,00$ (DS=0,146)



HAC40 A/C= 0,58

1 parámetro: $t_0=7,74$ h. (DS= 0,168)

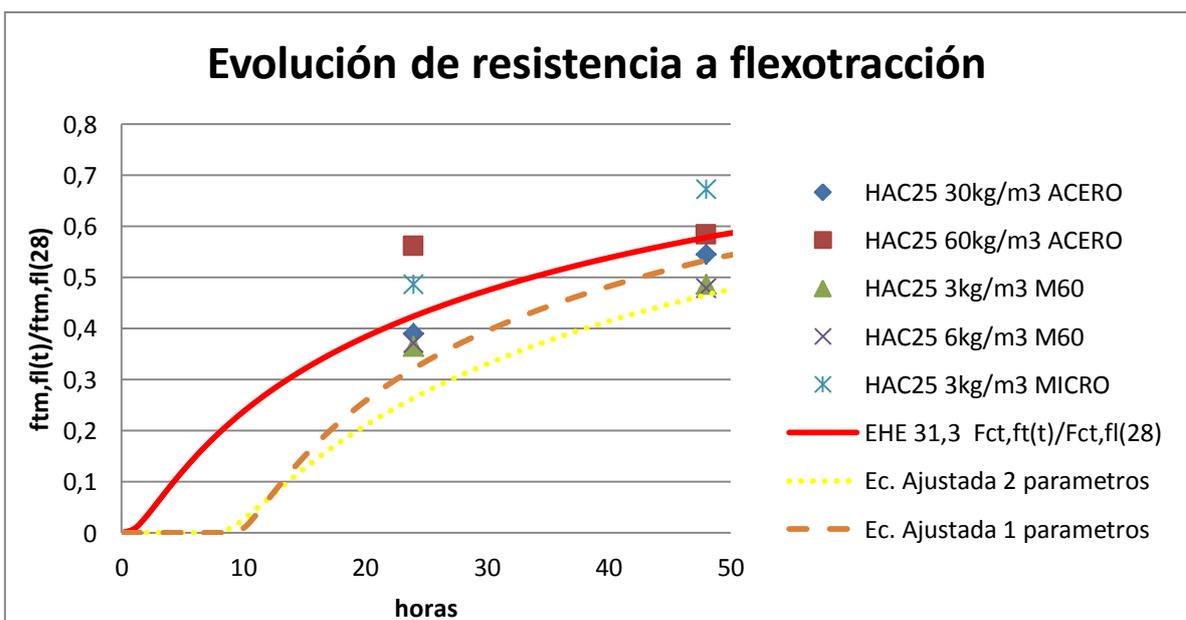
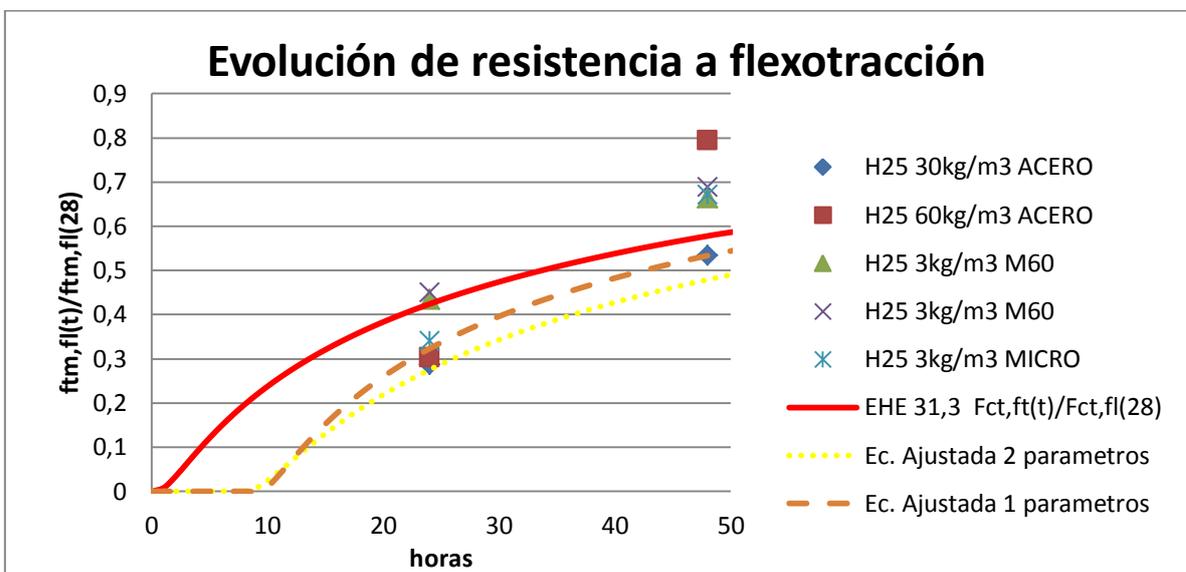
2 parámetro: $t_0=7,74$ h. $K_{te}=1,14$ (DS=0,139)

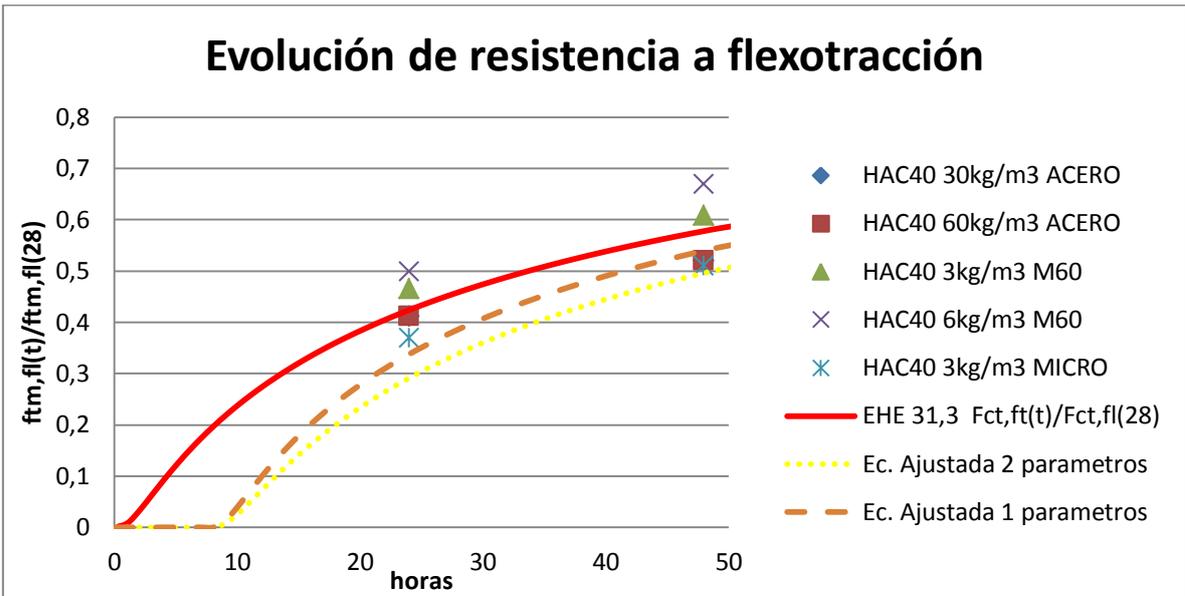
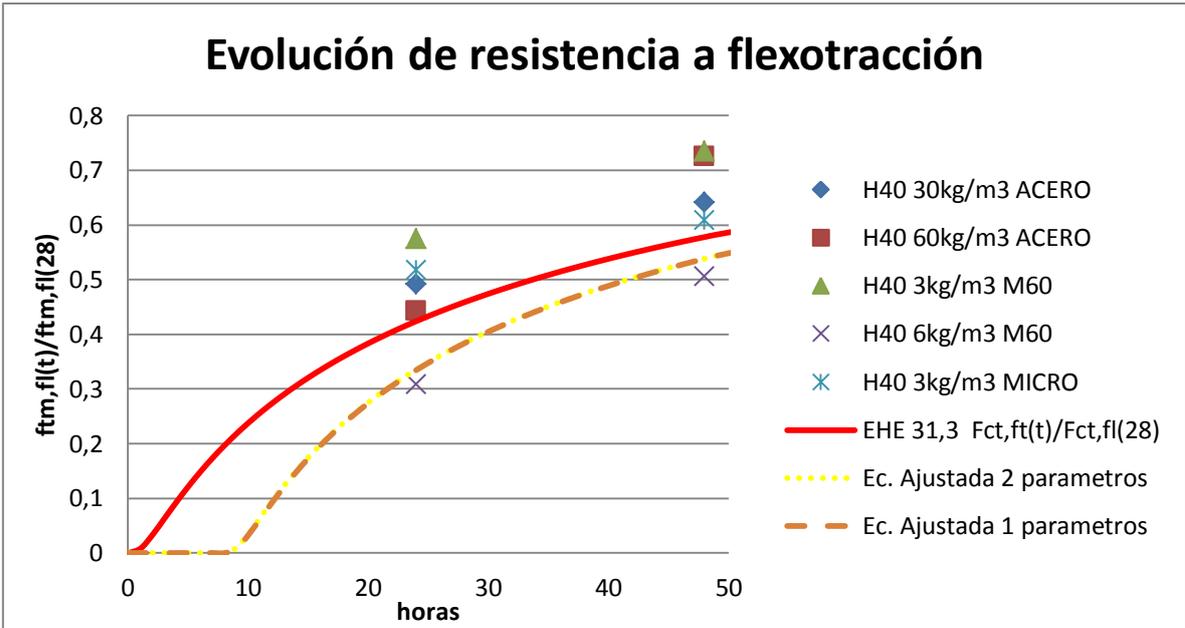


Utilizando la ecuación de ajuste de un parámetro, se ha mejorado la precisión en un 60% de los datos a compresión y un 40% en el módulo, con la de dos parámetros tenemos mejoras de 70% y 55% respectivamente.

6.2 Análisis paramétrico de resistencia a tracción por flexión

Utilizando las mismas ecuaciones y coeficientes anteriores, se grafica los ajuste sobre los resultados de flexotracción del capítulo anterior.





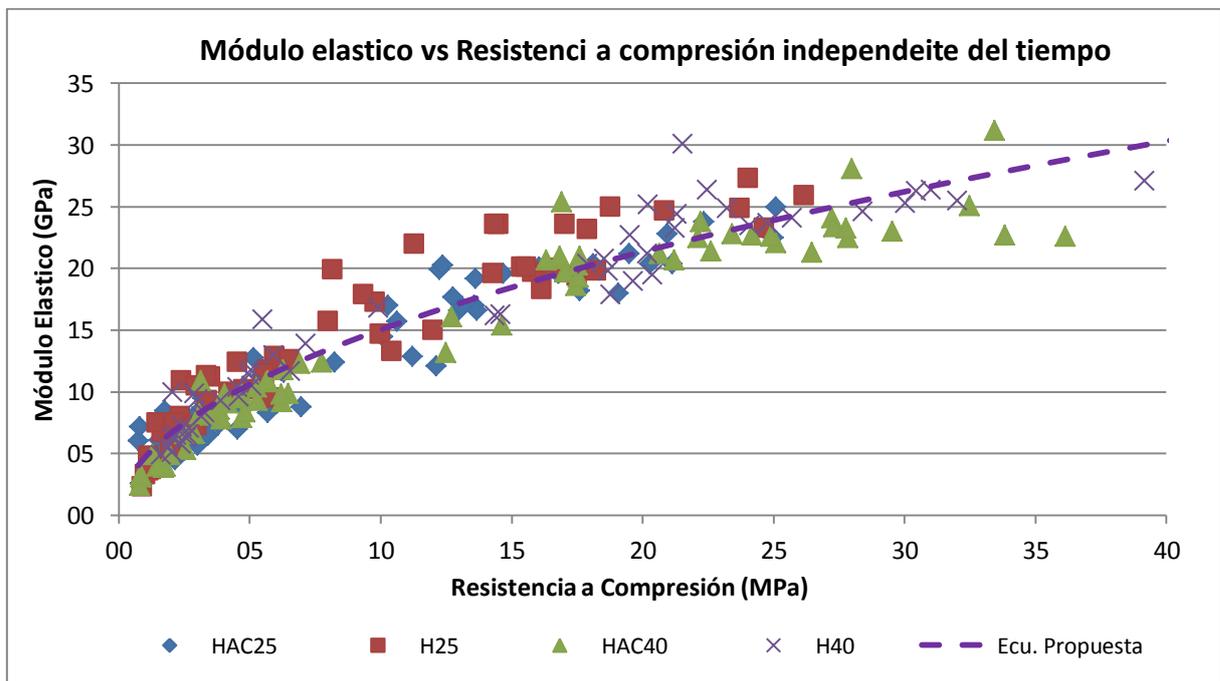
Se puede apreciar que con el modelo de ajuste, los cálculos tienden a ser más conservadores. La ecuación planteada para temprana edad tiene compatibilidad con la metodología de cálculo que se utiliza a edades posterior en el hormigón.

6.3 Calibración de una ecuación que relacione el módulo elástico en función de resistencia compresión independiente del tiempo a temprana edad.

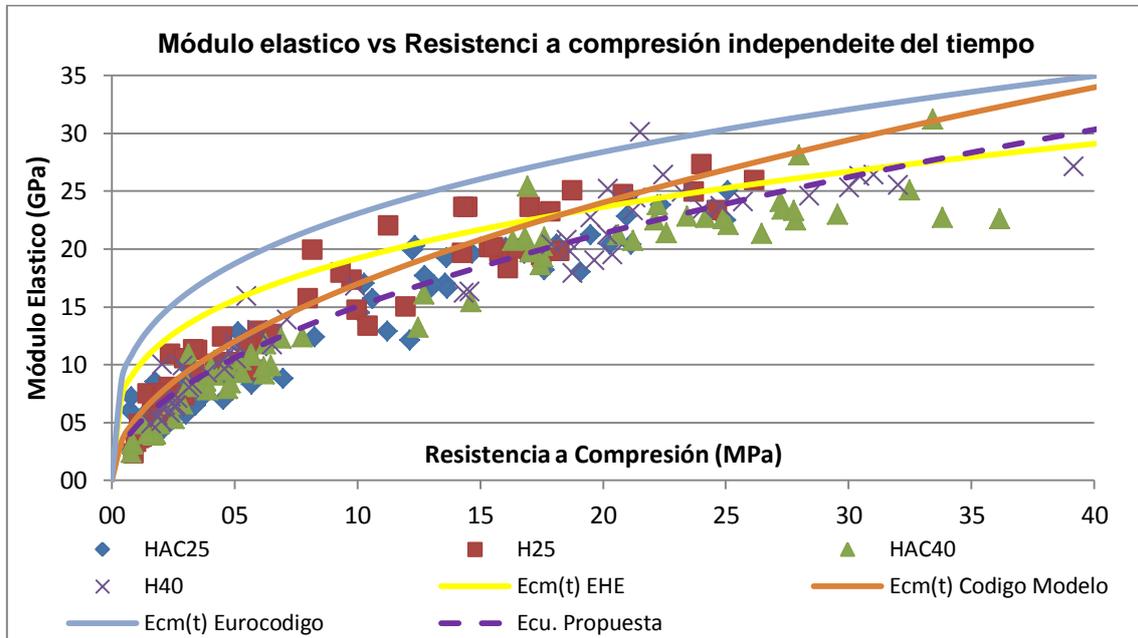
Tradicionalmente se calcula el módulo elástico a 28 días en función de la resistencia a compresión. La EHE, Eurocódigo 2 y Código modelo propone el cálculo del módulo elástico (a edades diferentes de 28 días) en función del tiempo con el múltiplo del coeficiente de edad del hormigón elevado a una raíz.

En capítulo 5.2.1 se puede apreciar una relación entre las dos variables que pueden ser independientes del tiempo, se ha hecho un análisis de datos por mínimos cuadrados para calibrar el cálculo de modulo elástico en función de la resistencia a compresión independiente del tiempo, se presenta a continuación:

$$E_{cm(fcm)} = 4692 * (fcm)^{0,51} \text{ (MPa.)} \quad \text{Ecu.propuesta\#3}$$



Se aprecia que en la ecuación propuesta tiene un mejor ajuste a los datos de ensayos realizados de módulo y compresión a temprana edad. A continuación se compara la ecuación propuesta con las del EHE, Eurocodigo2 y Código modelo.



Las ecuaciones de las normativas actuales no están pensadas para ser utilizadas para cálculos a temprana edades, razón por la cual se deben ser modificadas si se requiere que el hormigón tenga resistencia a estas edades.

Si se extrapola la Ecu.propuesta#3 para valores a edad posterior solo para comparar con los cálculos teóricos y experimentales a 28 días, se obtiene los valores de la siguiente tabla.

RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN (MPa.)				
$f_{cm(28)}$ experimental				
TIPO DE HORMIGÓN	HAC25	H25	HAC40	H40
$f_{cm(28)}$ experimental	41,1	38	49,3	51,2
MODULO ELASTICO TEORICO A 28 DÍAS (GPa.)				
EHE $E_{cm(28)}=8500*(f_{cm(28)})^{(1/3)}$	29,3	28,6	31,2	31,6
Código Modelo $E_{cm(28)}=21,5x10^3*(f_{cm(28)}/10)^{(1/3)}$	34,4	33,6	36,6	37,1
EUROCODIGO2 $E_{cm(28)}=22x10^3*(f_{cm(28)}/10)^{(1/3)}$	35,2	34,3	37,4	37,9
$E_{cm(f_{cm})}=4692*(f_{cm(t)})^{(0,51)}$	30,7	29,5	33,7	34,4
$E_{cm(28)}$ experimental	28,8	28,1	28,6	31,1

Los valores de módulo elástico con ecuación propuesta son cercanos a los valores experimentales, esto quiere decir que la ecuación tiene un ajuste razonablemente bueno.

(Esta página se ha dejado intencionalmente en blanco.)

7 CAPÍTULO VII Conclusión y futuras líneas de investigación

Con los resultados obtenidos en función de los objetivos planteados en el capítulo 1, se plantean las siguientes conclusiones. Estas conclusiones se han dividido en tres partes. Por un lado, se describen las conclusiones que hacen referencia a las pruebas mecánicas realizadas al hormigón a temprana edad. Por otro lado, se muestra un análisis un poco más conservador para los ensayos de retracción. Por último, se concluirá en el modelo de ajuste propuesto para correlacionar los fenómenos a temprana edad.

7.1 Conclusión de ensayos mecánicos:

El uso de aditivos superplastificantes y reductores de agua en hormigón, genera beneficios en la trabajabilidad, movimiento de las fibras durante el amasado, aumento de cohesión entre partículas, dando mayor fluidez sin tener la necesidad de añadir más agua a la mezcla y esta última genera mayor resistencia mecánica.

Los efectos a temprana edad de los aditivos pueden desviarse del comportamiento habitual, especialmente en la madurez de esfuerzos y resistencia del hormigón, acelerando o retardando en función del porcentaje utilizado y su reactividad química.

Las fibras de refuerzo son mayormente efectivas a tracción, especialmente en la rama post fisura, donde puede seguir absorbiendo carga cojiendo la abertura de fisura por adherencia, brindando mayor ductilidad al hormigón. Los resultados, tendencias y comportamientos en el hormigón, pueden variar dependiendo del material, la distribución aleatoria en la mezcla, longitud y esbeltez de la fibra.

Algunos tipos de fibras pueden absorber agua durante el amasado y en algunas ocasiones imposibilitar el estado autocompactante. Las dosificaciones con este tipo de fibras deben de estar limitadas.

7.2 Conclusión de ensayos de retracción:

En los ensayos de retracción libre total, se ha registrado que las fibras pueden variar la retracción habitual del hormigón. Las fibras más rígidas, como las de acero, restringen mejor el movimiento del hormigón en estado de hidratación, mientras que las fibras más flexibles pueden tener mayor holgura en el acortamiento de volumen.

El uso de los aditivos en hormigón autocompactante puede incrementar la retracción total en el hormigón a edad temprana y posterior en condiciones ideales de temperatura y humedad.

Algunos tipos de fibras sintéticas, pueden provocar un aumento en la retracción total a edades posteriores sin embargo, es difícil atribuirle que tipo de retracción es la que mayormente afectada en este estudio.

Los ensayos de retracción restringida realizados han registrado unánimemente la aparición de la fisura la misma cantidad de días en los cuatro tipos de hormigones, en base a esto podemos deducir que la retracción restringida en el hormigón puede ser independiente de la dosificación sin embargo, la capacidad resistente a tracción a la edad del cambio de volumen, puede evitar la aparición de esta fisura, aguantando las tensiones internas mientras el hormigón sigue madurando su resistencia.

7.3 Conclusión de modelo de ajuste propuesto

En base a los ensayos realizados en este trabajo, se ha observado que las resistencias a temprana edad en el hormigón son inferiores a las ecuaciones de edad del hormigón la normativa EHE, Eurocódigo y Código Modelo. Por tal motivo es necesario realizar algunos ajustes a esta edad.

Se han propuesto dos modelos de ajustes, modificando el coeficiente del cemento (s) del hormigón y la edad del hormigón (t), ambos modelos

incrementa la precisión en la predicción de los valores a compresión a temprana edad y se a su vez son conservadores en modulo elástico y resistencia a tracción por flexión.

Es necesario incorporar el parámetro de tiempo de inicio de endurecimiento (t_0) a la expresión actual del coeficiente de edad del hormigón (B_{cc}) en la normativa, este parámetro puede brindar una mayor precisión en la estimación a temprana edad del hormigón.

7.4 Futuras líneas de investigación

A continuación se presentan algunas propuestas para futuras líneas de investigación, en relación con la investigación desarrollada en esta tesis:

1. El estudio experimental y la calibración de un modelo matemático que pueda predecir el esfuerzo mecánico y deformaciones en el hormigón a edad temprana.
2. El estudio de tempranas edades en el hormigón a diferentes temperatura, humedad y tiempo de curado, desarrollo de un método de cálculo que pueda predecir los esfuerzos y deformaciones del hormigón a tiempo real y justo antes de una microfisura en condiciones restringidas.
3. Normalizar un método de ensayo a temprana edad que pueda garantizar la resistencia a tensión por la madurez de hormigón y la acumulación de esfuerzos por retracción en condición restringida.
4. La efectividad de la adherencia de la fibra a temprana edad.

(Esta página se ha dejado intencionalmente en blanco.)

Referencia y Bibliografía

- ACHE, “Manual de Tecnología del Hormigón Reforzado con Fibras de Acero”, Comisión 2, Grupo de Trabajo 2/2, Hormigones con Fibras, Junio 2000.
- ACI Committee 209.1R-05, “Report on Factors Affecting Shrinkage and Creep of Hardened Concrete”, 2005.
- ACI Committee 209R-92, “Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures”, 1992 (Reapproved 2008).
- ACI Committee 544.1R-96, “Report on Fibre Reinforced Concrete”, Ed. American Concrete Institute, 1996 (Reapproved 2009).
- ACI Committee 544.2R-89, “Measurement of Properties of Fibre Reinforced Concrete”, Ed. American Concrete Institute , 1989 (Reapproved 2009).
- ACI Committee 544.4R-88, “Design Considerations for Steel Fibre Reinforced Concrete”, Ed. American Concrete Institute, 1988 (Reapproved 2009).
- ACI Committee 544.5R-10, “Report on the Physical Properties and Durability of Fibrer Early Age”, ACI Materials Journal, Vol. 98 (5), 2001.
- Andresen, P., “Experiments with concrete in torsion”, Trans. Am. Soc. of Civil Engineers, pp. 949-983, 1935.8.1
- Aly T. y Sanjayan JG. 2010. Aly T, Sanjayan JG. (2010) Shrinkage-cracking behavior of OPC-fiber concrete at early-age. Materials and Structures (2010) 43:755–764.
- Anejo 14 de la Instrucción EHE 2008, “Recomendaciones para la utilización de hormigones con fibras”, 2008.
- Arango S., Tesis doctoral “Fluencia a flexión del hormigón reforzado con fibras de acero (SFRC) en estado fisurado”, junio 2010.
- ASTM A820/A820M-06, “Standard Specification for Steel Fibres for Fiber-Reinforced Concrete”, American Society for Testing Materials, 2006.
- ASTM C1116/C1116M-09, “Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete”, American Society for Testing Materials, 2009.

- ASTM C1399/C1399M-10, "Standard Test Method for Obtaining Average Residual- Strength of Fiber-Reinforced Concrete", American Society for Testing Materials, 2010.
- ASTM C143/C143M-09, "Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete", American Society for Testing Materials, 2009.
- ASTM C1550-08, "Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel)", American Society for Testing Materials, 2008.
- ASTM C1609/C1609M-07, "Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber- Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)", American Society for Testing Materials, 2007.
- ASTM C512-02, "Standard Test for Creep of Concrete in Compression", American Society for Testing Materials, 2002.
- Balaguru, P. y Ramakrishnan, V., "Properties of Fibre Reinforced Concrete: Workability, Behaviour under Long-Term Loading and Air-Void Characteristics", ACI Materials Journal, Vol. 85, No. 3, pp. 189-196, May 1988.
- Banthia, N. y Trottier, J. F., "Concrete reinforced with steel fibres. Part II: toughness characterization", ACI Materials Journal, 1995.
- Baron, J., y Lesage, R., "La composition du beton hydraulique du laboratoire au chantier", Ministere de l'equipment, Laboratoire central des ponts et chaussees, Paris, 1976.
- Barragán, B. E. y Zerbino, R. L., "Creep Behaviour of Cracked Steel Fibre Reinforce Concrete Beams", Seventh International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concrete: Design and Applications, pp. 577-586, September 2008.
- Barragán, B., "Failure and Toughness of Steel Fibre Reinforced Concrete Under Tension and Shear", Doctoral Thesis, Universitat Politecnica de Catalunya, March 2002.
- Chichester, 1978. "Fibre Cements and Fibre Contents", Ed. John Wiley & Sons, Ltd.

- Giménez, E. J., “Propiedades mecánicas y adherencia de hormigones con fibras de acero contaminados con cloruros”, Tesis Doctoral para la E.T.S. de Arquitectura de Valencia, 1993.
- Hannant, D. J., “Fibre Cements and Fibre Contents”, Ed. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, 1978.
- JSCE SFRC Research Subcommittee, “Recommendation for Design and Construction
- K.-H. Ming 2010. Kyung-Hwan Min, Hyung-Chul Jung , Jun-Mo Yang, , Young-Soo Yoon. Shrinkage characteristics of high-strength concrete for large underground space structures. *Tunnelling and Underground Space Technology* 25 (2010) 108–113.
- Naaman, Antoine E., “Fibre Reinforcements for Concrete: looking back, looking
- ahead”, *Rilem Proceedings* 15, BEFIB 2000.
- Neville, A. M., Dilger, W. H. y Brooks, J. J., “Creep of plain and structural concrete”, Construction Press, London and New York, 1983.
- Pelisser 2010. Fernando Pelisser, Almir Barros da S. Santos Neto, Henriette Lebre La Rovere, Roberto Caldas de Andrade Pinto. Effect of the addition of synthetic fibers to concrete thin slabs on plastic shrinkage cracking. *Construction and Building Materials* 24 (2010) 2171–2176
- Rossi, P., “Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPRFC): A General Vision”, *Rilem Proceedings* 15, BEFIB 2000.
- Serna, P. y Arango C., S. E., “Evolution of the Flexural Behaviour of Pre-Cracked SFRC in Marine Environment”, *Seventh International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concrete: Design and Applications*, pp. 595-605, September 2008.
- Serna, P., “Método para la formulación de hormigones de fibras metálicas”, *Materiales de Construcción*, Ed. Eduardo Torroja, Vol. 34, pp. 17-23, 19842.
- Sivakumar A. 2007. Sivakumar A, Santhanam M. (2007) A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete. *Cem Concr Compos* 29:575–581.

- UNE 83.501, “Hormigones con Fibras. Toma de Muestras de Hormigón Fresco”.
- UNE 83.502, “Hormigones con Fibras. Fabricación en Laboratorio”.
- UNE 83.504:2004, “Hormigones con Fibras. Fabricación y Conservación de Probetas para los Ensayos de Laboratorio”.
- UNE 83.506, “Hormigones con Fibras. Refrentado de Probetas con Mortero de Azufre”.
- UNE 83.507:2004, “Hormigones con Fibras. Rotura por Compresión”.
- UNE 83509:2004, “Hormigones con Fibras. Rotura por Flexotracción”.
- UNE-EN 12350-1:2009, “Ensayos de hormigón fresco. Parte 1: Toma de muestras”.
- UNE-EN 12350-2:2006, “Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento”.
- UNE-EN 1352:1997, “Determinación del módulo de elasticidad estática bajo compresión del hormigón curado en autoclave o de áridos ligeros con estructura abierta”.
- UNE-EN 14651:2007 + A1:2008; “Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual)”.
- UNE-EN 14889-1:2008, “Fibras para hormigón. Parte 1: Fibras de acero. Definiciones, especificaciones y conformidad”.
- UNE-EN 14889-2:2008, “Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras poliméricas. Definiciones, especificaciones y conformidad”.
- UNE-EN 933-1, “Ensayos para Determinar las Propiedades Geométricas de los Áridos. Parte 1: Determinación de la Granulometría de las Partículas, Tamices de Ensayo, Tamaño Nominal de las Aberturas”.
- UNE-EN 933-2, “Ensayos para Determinar las Propiedades Geométricas de los Áridos. Parte 2: Determinación de la Granulometría de las Partículas, Método del Tamizado”.

Anejo 1

Preliminares, Estudio granulométrico de los áridos

ARENA

LUZ DE TAMIZ (mm.)	peso de tamiz	ARENA + TAMIZ (Kg.)	MASA RETENIDO (Kg.)	% MASA RETENIDO (Kg.)	% MASA RETENIDO ACUMULADO(Kg.)	% ACUMULADO QUE PASAN (Kg.)
5	0,665	0,665	0,000	0	0	100
4	0,531	0,533	0,002	1	1	99
2	0,373	0,445	0,072	24	25	75
1	0,377	0,452	0,075	26	51	49
0,500	0,345	0,393	0,048	16	67	33
0,250	0,307	0,357	0,050	17	84	16
0,125	0,316	0,350	0,034	12	96	4
0,063	0,300	0,313	0,013	4	100	0
FONDO	0,371	0,371	0,000	0	100	0
$\Sigma =$			0,294			

GRAVA 7/12

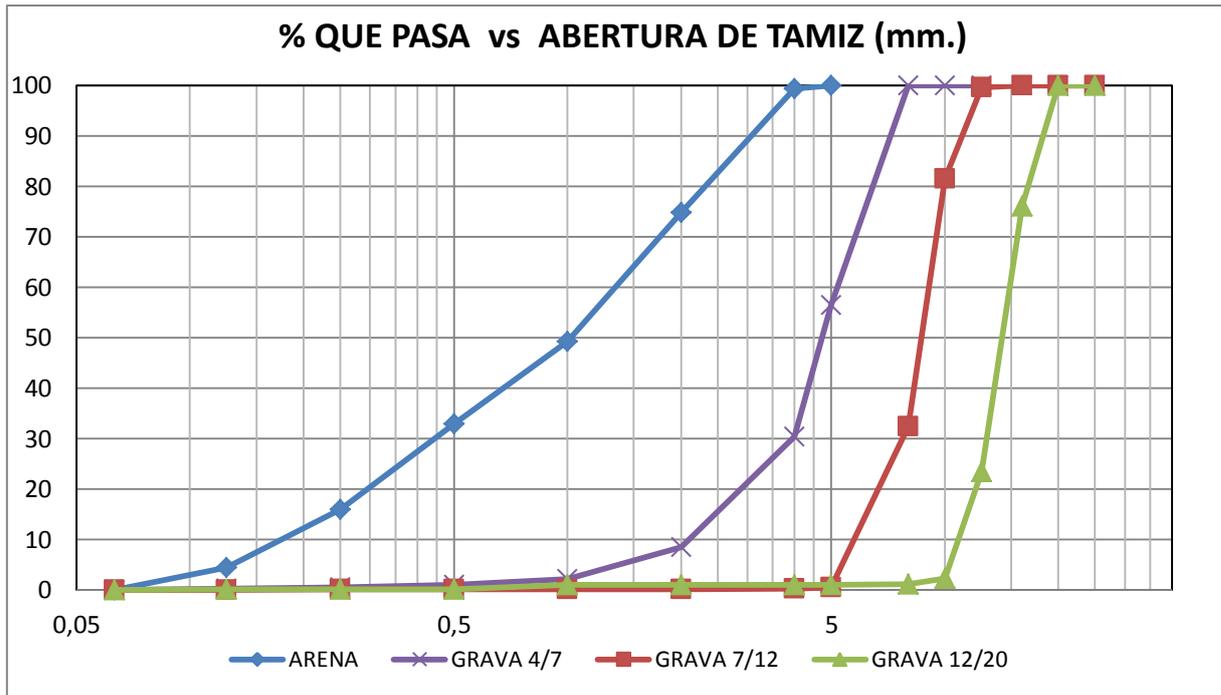
LUZ DE TAMIZ (mm.)	peso de tamiz	4/12 + TAMIZ (Kg.)	MASA RETENIDO (Kg.)	% MASA RETENIDO (Kg.)	% MASA RETENIDO ACUMULADO(Kg.)	% ACUMULADO QUE PASAN (Kg.)
25	1,502	1,502	0,000	0	0	100
20	1,394	1,394	0,000	0	0	100
16	1,739	1,739	0,000	0	0	100
12,5	1,601	1,610	0,009	0	0	100
10	1,368	1,908	0,540	18	19	81
8	1,627	3,082	1,455	49	68	32
5	0,665	1,611	0,946	32	99	1
4	0,531	0,539	0,008	0	100	0
2	0,373	0,375	0,002	0	100	0
1	0,377	0,377	0,000	0	100	0
0,500	0,345	0,346	0,001	0	100	0
0,250	0,307	0,308	0,001	0	100	0
0,125	0,316	0,317	0,001	0	100	0
0,063	0,300	0,301	0,001	0	100	0
FONDO	0,371	0,373	0,002	0	100	0
$\Sigma =$			2,966			

GRAVA 4/7

LUZ DE TAMIZ (mm.)	peso de tamiz	4/7 + TAMIZ (Kg.)	MASA RETENIDO (Kg.)	% MASA RETENIDO (Kg.)	% MASA RETENIDO ACUMULADO(Kg.)	% ACUMULADO QUE PASAN (Kg.)
25	1,502	1,502	0	0	0	100
20	1,394	1,394	0	0	0	100
16	1,739	1,739	0	0	0	100
12,5	1,601	1,601	0	0	0	100
10	1,368	1,368	0	0	0	100
8	0,447	0,447	0	0	0	100
5	0,665	0,958	0,293	44	44	56
4	0,531	0,706	0,175	26	70	30
2	0,373	0,521	0,148	22	92	8
1	0,377	0,419	0,042	6	98	2
0,500	0,345	0,353	0,008	1	99	1
0,250	0,307	0,310	0,003	0	99	1
0,125	0,316	0,318	0,002	0	100	0
0,063	0,300	0,302	0,002	0	100	0
FONDO	0,371	0,371	0,000	0	100	0
$\Sigma=$			0,673			

GRAVA 12/20

LUZ DE TAMIZ (mm.)	peso de tamiz	12/20 + TAMIZ (Kg.)	MASA RETENIDO (Kg.)	% MASA RETENIDO (Kg.)	% MASA RETENIDO ACUMULADO(Kg.)	% ACUMULADO QUE PASAN (Kg.)
25	1,502	1,502	0,000	0	0	100
20	1,394	1,394	0,000	0	0	100
16	1,739	2,665	0,926	24	24	76
12,5	1,601	3,635	2,034	53	77	23
10	1,368	2,187	0,819	21	98	2
8	1,627	1,673	0,046	1	99	1
5	0,665	0,669	0,004	0	99	1
4	0,531	0,531	0,000	0	99	1
2	0,373	0,374	0,001	0	99	1
1	0,377	0,377	0,000	0	99	1
0,500	0,345	0,377	0,032	1	100	0
0,250	0,307	0,307	0,000	0	100	0
0,125	0,316	0,318	0,002	0	100	0
0,063	0,300	0,303	0,003	0	100	0
FONDO	0,371	0,373	0,002	0	100	0
$\Sigma=$			3,869			



(PRONOSTICO) DE LOS RESULTADOS DE ESFUERZO A COMPRESIÓN A TEMPRANA EDAD.

COMPRESION MEDIA CALCULADA DE LA FORMA TRADICIONAL A 28 DIAS

$$f_{ct,m} = f_{ck} + 8$$

$f_{ck} =$	25	MPa	$f_{ct,m} =$	33	MPa
$f_{ck} =$	40	MPa	$f_{ct,m} =$	48	MPa

EVOLUCION DE LA RESISTENCIA A LA TRACCION ANTES DE LOS 28 DIAS (TRADICIONALMENTE)

Días	ENDURECIAMIENTO NORMAL	ENDURECIAMIENTO RAPIDO
3	0,4	0,55
7	0,65	0,75
28	1	1
90	1,2	1,15
360	1,35	1,2

EXTRAPOLANDO CON UNA REGRESION DE TIPO	
POTENCIAL	$y = 0,3686x^{0,2461}$ $R^2 = 0,8969$
POLINOMICA	$y = -2E-05x^2 + 0,0101x + 0,5387$ $R^2 = 0,88$
LOGARITMICA	$y = 0,2001\ln(x) + 0,249$ $R^2 = 0,9667$
LINEAL	$y = 0,002x + 0,7281$ $R^2 = 0,5736$

PRONOSTICO

HORAS	Días	%	POTENCIAL	POLINOMICA	LOGARITMICA	LINEAL
0	0		0	53,87		72,81
6	0,25		26	54,122	-2,84	72,86
8	0,33		28	54,206	2,917	72,877
9	0,38		29	54,248	5,274	72,885
10	0,42		30	54,29	7,382	72,893
12	0,5		31	54,375	11,03	72,91
24	1		37	54,878	24,9	73,01
48	2		44	55,882	38,77	73,21
	3	75	48	56,882	46,883	73,41
	7	85	60	60,842	63,838	74,21
	14	90	71	67,618	77,708	75,61
	28	100	84	80,582	91,577	78,41

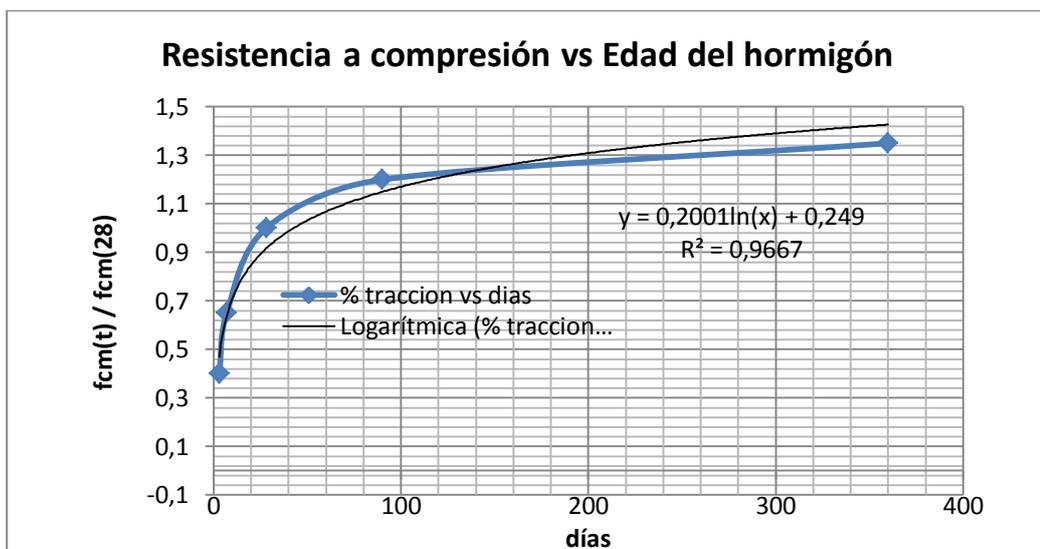
UTILIZANDO UNA REGRESIÓN POTENCIAL, EXTRAPOLAMOS NUESTROS RESULTADOS ESPERADOS

$$f_{ct,m} = f_{ck} + 8$$

$f_{ck} =$ 25 Mpa	$f_{ct,m} =$ 33 Mpa
$f_{ck} =$ 40 Mpa	$f_{ct,m} =$ 48 Mpa

fck 25 Mpa (28 días)	HORAS	EVOLUCION % x 100	$f_{ck} =$	$f_{CM} =$
	6	-2,84	-0,94	-0,94
	8	2,917	0,96	0,96
	9	5,274	1,74	1,74
	10	7,382	2,44	2,44
	12	11,03	3,64	3,64
	24	24,9	8,22	8,22
	48	38,77	12,79	12,79

fck 40 Mpa (28 días)	HORAS	EVOLUCION % x 100	$f_{ck} =$	$f_{CM} =$
	6	-2,84	-1,36	-1,36
	8	2,917	1,4	1,4
	9	5,274	2,53	2,53
	10	7,382	3,54	3,54
	12	11,03	5,29	5,29
	24	24,9	11,95	11,95
	48	38,77	18,61	18,61



RESULTADO DE TRACCION ESPERADOS

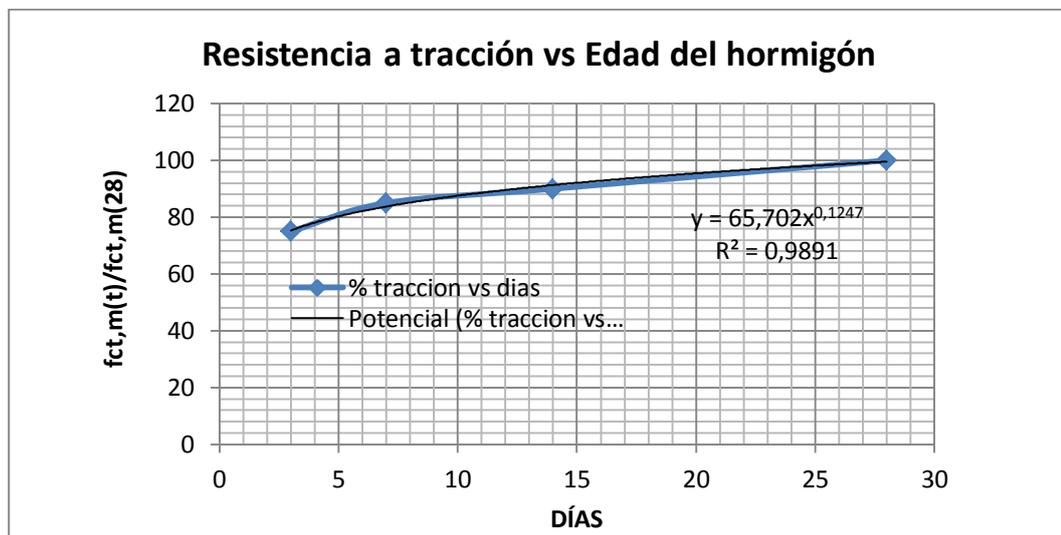
TRACCION MEDIA CALCULADA DE LA FORMA TRADICIONAL A 28 DIAS
TRACCION CARACTERISTICA CALCULADA

$f_{ct,m}=0,3*(f_{ck})^{(2/3)}$ para $f_{ck} \leq 50$ Mpa		$f_{ct,K}= 0,7 f_{ct,m}$			
$f_{ck} =$	25 Mpa	$f_{ct,m} =$	2,56 Mpa	$f_{ct,K} =$	1,8 Mpa
$f_{ck} =$	40 Mpa	$f_{ct,m} =$	3,51 Mpa	$f_{ct,K} =$	2,46 Mpa

(CEB) $f_{ct,m}=0,3*(f_{ck})^{(2/3)}$		$f_{ctK}= ,21 (f_k)^{(2/3)}$			
$f_{ck} =$	25 Mpa	$f_{ct,m} =$	2,56 Mpa	$f_{ctK} =$	1,8 Mpa
$f_{ck} =$	40 Mpa	$f_{ct,m} =$	3,51 Mpa	$f_{ctK} =$	2,46 Mpa

EVOLUCION DE LA RESISTENCIA A LA TRACCION ANTES DE LOS 28 DIAS (TRADICIONALMENTE)

Días	%
3	75
7	85
14	90
28	100



PRONOSTICO

HORAS	Días	%	POTENCIAL
0	0		0
6	0,25		55
12	0,5		60
24	1		66
48	2		72
	3	75	75
	7	85	84
	14	90	91
	28	100	100

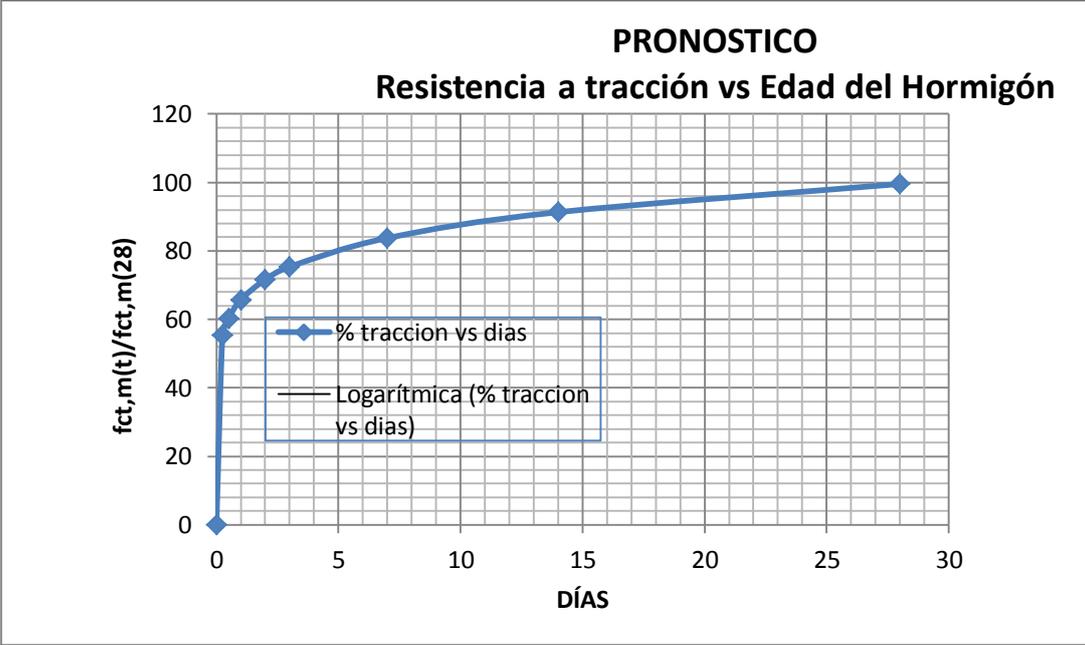
$f_{ct,m} = 0,3 * (f_{ck})^{2/3}$ para $f_{ck} \leq 50$ Mpa

$f_{ct,K} = 0,7 f_{ct,m}$

$f_{ck} = 25$ Mpa	$f_{ct,m} = 2,56$ Mpa	$f_{ct,K} = 1,8$ Mpa
$f_{ck} = 40$ Mpa	$f_{ct,m} = 3,51$ Mpa	$f_{ct,K} = 2,46$ Mpa

fck 25 Mpa (28 dias)	HORAS	EVOLUCION % x 100	$f_{ct,m} =$	$f_{ct,K} =$
	6	55	1,42	0,99
	12	60	1,55	1,08
	24	66	1,69	1,18
	48	72	1,84	1,29

fck 40 Mpa (28 dias)	HORAS	EVOLUCION % x 100	$f_{ct,m} =$	$f_{ct,K} =$
	6	55	1,94	1,36
	12	60	2,11	1,48
	24	66	2,31	1,61
	48	72	2,51	1,76



Anejo 2

Resultados de Ensayos de resistencia a rotura a compresión y módulo elástico

HAC25 sin (1,80% aditivo)			fcm (28 dias)	HAC25 sin (1,80% aditivo)			Ecm(28)
COMP	f(t)/fcm(28)	HORAS		modulo (GPa)	HORAS	Ecm(t)/Ecm(28)	
1,619	0,03773365	9,9	42,906	8,5	9,8	0,29360967	28,95
1,747	0,04071692	10,4		8,5	10,3	0,29360967	
3,064	0,07141192	11,8		9,5	11,7	0,32815199	
3,195	0,07446511	12,2		9,5	12,1	0,32815199	
12,032	0,28042698	30,3		20,1	30	0,69430052	
12,246	0,28541463	30,9		19,9	30,8	0,68739206	
22,351	0,52092947	52,3		23,3	52,3	0,80483592	
22,339	0,52064979	52,6		23,8	52,5	0,82210708	

HAC25 30Kg/M3 65/60 ACERO (1,85% aditivo)			fcm (28 dias)	HAC25 30Kg/M3 65/60 ACERO (1,85% aditivo)			Ecm(28)
COMP	f(t)/fcm(28)	HORAS		modulo (GPa)	HORAS	Ecm(t)/Ecm(28)	
2,351	0,05962616	11,7	39,429	6,8	11,6	0,23776224	28,6
2,774	0,07035431	12,1		7,7	12	0,26923077	
5,143	0,13043699	13,9		12,8	13,8	0,44755245	
6,032	0,15298384	14,2		12,4	14,1	0,43356643	
13,655	0,3463187	25,5		16,6	15,4	0,58041958	
12,743	0,32318852	25,8		17,7	25,8	0,61888112	
20,943	0,53115727	50,5		22,8	50,4	0,7972028	
21,13	0,53589997	50,9		22,4	50,8	0,78321678	

HAC25 60Kg/M3 65/60 ACERO (1,85% aditivo)			fcm (28 dias)	HAC25 60Kg/M3 65/60 ACERO (1,85% aditivo)			Ecm(28)
COMP	f(t)/fcm(28)	HORAS		modulo (GPa)	HORAS	Ecm(t)/Ecm(28)	
3,414	0,08432024	11,4	40,4885	6,5	11,6	0,2292769	28,35
3,012	0,07439149	11,7		5,7	12	0,2010582	
5,687	0,14045964	12,4		8,3	13,7	0,29276896	
4,521	0,11166134	14,7		7	14	0,24691358	
12,964	0,32018968	26,9		16,6	26,1	0,58553792	
13,096	0,32344987	27,1		16,9	26,4	0,59611993	
20,262	0,5004384	51,2		20,4	50,5	0,71957672	
20,109	0,49665955	51,5		20,4	50,8	0,71957672	

HAC25 3Kg M60 sintética (1,80% aditivo)			fcm (28 dias)
COMP	f(t)/fcm(28)	HORAS	
1,521	0,03419438	10,5	44,481
1,599	0,03594793	10,8	
2,251	0,05060588	13,9	
2,355	0,05294395	14,2	
16,574	0,37260853	28,3	
16,779	0,37721724	28,7	
25,074	0,56370136	52,3	
24,982	0,56163306	52,5	

HAC25 3Kg M60 sintética (1,80% aditivo)			Ecm(28)
modulo (GPa)	HORAS	Ecm(t)/Ecm(28)	
6,1	10,4	0,20783646	29,35
5,1	10,7	0,17376491	
6,3	11,8	0,21465077	
6,8	11,1	0,23168654	
18,2	28,3	0,62010221	
19,6	28,6	0,66780239	
22,5	52,2	0,76660988	
22,5	52,5	0,76660988	

HAC25 6Kg/M3 M60 sintética (1,80% aditivo)			fcm (28 dias)
COMP	f(t)/fcm(28)	HORAS	
2,497	0,06421582	12	38,8845
2,881	0,07409122	12,3	
5,431	0,13967005	14,1	
6,3	0,16201828	14,6	
13,61	0,35001093	27,2	
13,277	0,34144711	27,5	
19,666	0,50575422	50,8	
19,481	0,50099654	51,1	

HAC25 6Kg/M3 M60 sintética (1,80% aditivo)			Ecm(28)
modulo (GPa)	HORAS	Ecm(t)/Ecm(28)	
6,8	11,6	0,23776224	28,6
7,7	12	0,26923077	
12,8	13,8	0,44755245	
12,4	14,1	0,43356643	
16,6	25,4	0,58041958	
17,7	25,8	0,61888112	
22,8	50,4	0,7972028	
20,4	50,8	0,71328671	

HAC25 3 Kg/M3 MICRO (2,10% aditivo)			fcm (28 dias)
COMP	f(t)/fcm(28)	HORAS	
2,136	0,04998187	10,8	42,7355
2,262	0,05293023	11,1	
3,81		13,5	
4,761	0,11140621	13,8	
11,214	0,26240479	31,1	
10,078	0,23582268	31,4	
19,075	0,44635022	52,1	
19,591	0,45842449	52,5	

HAC25 3 Kg/M3 MICRO (2,10% aditivo)			Ecm(28)
modulo (GPa)	HORAS	Ecm(t)/Ecm(28)	
4,5	10,6	0,15384615	29,25
5,1	11	0,17435897	
7,4	13,4	0,25299145	
8,7	13,7	0,2974359	
13,5	31	0,46153846	
14,5	31,4	0,4957265	
18	52	0,61538462	
18,2	52,4	0,62222222	

HAC25 6 Kg/M3 MICRO (2,60% aditivo)			fcm (28 dias)
COMP	f(t)/fcm(28)	HORAS	
0,739	0,01920828	10,2	38,473
0,801	0,0208198	10,4	
1,825	0,04743586	12,7	
1,9	0,04938528	12,8	
6,958	0,18085411	31,8	
8,24	0,21417618	32	
12,118	0,31497414	52,8	
12,605	0,32763237	53,1	

HAC25 6 Kg/M3 MICRO (2,60% aditivo)			Ecm(28)
modulo (GPa)	HORAS	Ecm(t)/Ecm(28)	
7	14,1	0,24647887	28,4
7,2	14,3	0,25352113	
8,6	15	0,3028169	
8,8	15,8	0,30985915	
8,8	31,7	0,30985915	
12,4	32	0,43661972	
12,1	52,7	0,42605634	
15,7	53	0,5528169	

H25 sin (0,65% aditivo)			fcm (28 dias)
COMP	f(t)/fcm(28)	HORAS	
1,6	0,043	11,0	37,8
1,5	0,039	11,3	
2,4	0,063	13,1	
3,0	0,078	13,4	
8,2	0,216	26,7	
11,3	0,298	27,1	
19,8	0,522	53,0	
20,8	0,551	54,0	

H25 sin (0,65% aditivo)			Ecm28
modulo (GPa)	HORAS	Ecm(t)/Ecm(28)	
6,7	11	0,23758865	28,2
7,5	11,2	0,26595745	
10,9	13,1	0,38652482	
10,5	13,3	0,37234043	
21,9	26,7	0,77659574	
22	27	0,78014184	
25	52,9	0,88652482	
24,7	53,9	0,87588652	

H25 30Kg/M3 65/60 metal (0,75% aditivo)			fcm (28 dias)
COMP	f(t)/fcm(28)	HORAS	
0,9	0,024	11,2	37,2
1,0	0,027	11,5	
1,2	0,033	12,9	
2,1	0,058	13,1	
5,9	0,157	24,9	
6,6	0,177	25,2	
18,0	0,483	53,2	
18,0	0,484	53,6	

H25 30Kg/M3 65/60 metal (0,75% aditivo)			Ecm28
modulo (GPa)	HORAS	Et/Ecm28	
2,3	11,1	0,08424908	27,3
3,3	11,4	0,12087912	
6,7	12,8	0,24542125	
7,5	13,1	0,27472527	
9,5	14,8	0,34798535	
11,5	15,1	0,42124542	
24,7	50,2	0,9047619	
25,7	53,5	0,94139194	

H25 60Kg/M3 65/60 metal (0,70% aditivo)			fcm (28 dias)
COMP	f(t)/fcm(28)	HORAS	
2,0	0,053	11,5	37,0
2,0	0,054	11,9	
4,2	0,114	14,2	
4,5	0,121	14,5	
12,0	0,324	31,9	
10,4	0,282	32,2	
18,2	0,493	52,8	
17,5	0,473	53,2	

H25 60Kg/M3 65/60 metal (0,70% aditivo)			Ecm28
modulo (GPa)	HORAS	Et/Ecm28	
5,4	11,4	0,19389587	27,9
5,5	11,7	0,19748654	
10	14,1	0,35906643	
10,8	14,4	0,38779174	
15	31,8	0,53859964	
15,3	32,1	0,54937163	
19,8	52,8	0,71095153	
19,4	53,1	0,69658887	

H25 3Kg/M3 M60 sintética (0,75% aditivo)			fcm (28 dias)
COMP	f(t)/fcm(28)	HORAS	
1,3	0,037	11,6	36,0
1,1	0,032	12,2	
2,1	0,057	13,7	
2,1	0,059	14,0	
9,8	0,272	25,5	
9,3	0,260	25,9	
17,0	0,474	53,6	
17,5	0,487	54,3	

H25 3Kg/M3 M60 sintética (0,75% aditivo)			Ecm28
modulo (GPa)	HORAS	Et/Ecm28	
6,1	10,4	0,20783646	29,4
6,1	10,7	0,20783646	
10,3	13,8	0,35093697	
10,8	14,1	0,36797274	
17	28,3	0,57921635	
19,6	28,6	0,66780239	
25	52,2	0,85178876	
22,5	52,5	0,76660988	

H25 6Kg/M3 M60 sintética (0,80% aditivo)			fcm (28 dias)
COMP	f(t)/fcm(28)	HORAS	
3,5	0,089	11,1	39,2
3,4	0,088	11,4	
5,9	0,152	13,3	
6,5	0,166	14,0	
15,8	0,403	35,6	
16,5	0,422	35,9	
24,3	0,621	59,9	
24,0	0,613	59,9	

H25 6Kg/M3 M60 sintética (0,80% aditivo)			Ecm28
modulo (GPa)	HORAS	Et/Ecm28	
6,2	11,8	0,22836096	27,2
7,5	12,2	0,27624309	
11,3	14	0,41620626	
11,6	14,5	0,42725599	
17,7	27,1	0,6519337	
17	27,4	0,62615101	
21,6	50,7	0,79558011	
21,2	51	0,78084715	

H25 3Kg/M3 MCIRO (1,00% aditivo)			fcm (28 dias)
COMP	f(t)/fcm(28)	HORAS	
2,3	0,059	10,3	39,7
3,3	0,084	10,8	
4,8	0,120	12,9	
4,5	0,114	13,2	
15,4	0,387	34,7	
15,5	0,391	35,0	
23,7	0,597	58,7	
23,9	0,601	59,1	

H25 3Kg/M3 MCIRO (1,00% aditivo)			Ecm28
modulo (GPa)	HORAS	Et/Ecm28	
4,5	10,6	0,15384615	29,3
5,1	11	0,17435897	
7,4	13,4	0,25299145	
8,7	13,7	0,2974359	
14,9	31	0,50940171	
14,5	31,4	0,4957265	
18	52	0,61538462	
18,2	52,4	0,62222222	

H25 6Kg/M3 MCIRO (1,20% aditivo)		
COMP	f(t)/fcm(28)	HORAS
3,4	0,086	9,8
3,0	0,076	10,1
5,7	0,145	12,2
4,4	0,112	12,5
16,1	0,412	34,0
14,3	0,365	34,2
26,2	0,668	58,1
26,7	0,680	58,4

fcm (28 dias)
39,2

H25 6Kg/M3 MCIRO (1,20% aditivo)		
modulo (GPa)	HORAS	Et/Ecm28
6,06	14,1	0,22116788
7,2	14,3	0,26277372
8,6	14,7	0,31386861
8,8	15,5	0,32116788
12,4	32	0,45255474
12,1	33,1	0,44160584
15	52	0,54744526
15,7	53	0,5729927

Ecm28
27,4

HAC40 sin (1,70% aditivo)		
COMP	f(t)/fcm(28)	HORAS
3,505	0,07063731	12,6
4,643	0,09357177	12,9
6,897	0,13899731	14,2
7,743	0,156047	14,7
21,209	0,42743133	31,3
22,59	0,45526303	31,8
24,172	0,48714555	50,1
27,764	0,55953621	50,5

fcm (28 dias)
49,6

HAC40 sin (1,70% aditivo)		
modulo (GPa)	HORAS	Ecm(t)/Ecm(28)
8,9	12,1	0,30169492
9,1	12,5	0,30847458
10,3	14,2	0,34915254
11,1	14,6	0,37627119
20,7	31,2	0,70169492
21,4	31,7	0,72542373
22,7	50	0,76949153
23,3	50,4	0,78983051

Ecm28
29,5

HAC40 30Kg/M3 65/60 acero (1,70% aditivo)		
COMP	f(t)/fcm(28)	HORAS
1,8	0,035	8,6
1,7	0,034	9,0
4,7	0,093	11,5
4,7	0,092	11,8
17,4	0,343	24,7
17,5	0,345	25,0
27,2	0,536	54,2
27,8	0,548	54,9

fcm (28 dias)
50,8

HAC40 30Kg/M3 65/60 acero (1,70% aditivo)		
modulo (GPa)	HORAS	Ecm(t)/Ecm(28)
4	8,5	0,13355593
3,9	8,9	0,13021703
7,9	11,4	0,26377295
10	11,7	0,33388982
18,6	22,6	0,62103506
19,3	24,9	0,64440735
24,1	54,2	0,80467446
22,5	54,8	0,75125209

Ecm28
30,0

HAC40 60Kg/M3 65/60 acero (1,70% aditivo)		
COMP	Ft/F28	HORAS
3,9	0,074	12,4
3,8	0,074	12,7
5,6	0,108	13,7
5,3	0,101	13,9
16,6	0,319	33,3
16,9	0,324	33,7
25,1	0,481	55,5
26,1	0,501	56,6

fcm (28 dias)
52,2

HAC40 60Kg/M3 65/60 acero (1,70% aditivo)		
modulo (GPa)	HORAS	Ecm(t)/Ecm(28)
8,1	12,4	0,27979275
8,6	12,7	0,2970639
10,8	13,6	0,37305699
10,4	13,9	0,35924007
22,4	33,2	0,77374784
22,6	33,6	0,7806563
22,5	55,4	0,77720207
25,4	56,5	0,87737478

Ecm28
29,0

HAC40 3Kg M60 sintética (1,70% aditivo)		
COMP	Ft/F28	HORAS
2,5	0,049	12,3
3,1	0,061	12,6
6,2	0,122	14,3
5,7	0,112	14,3
17,6	0,346	31,2
17,6	0,346	31,6
29,5	0,580	49,9
30,2	0,593	50,3

fcm (28 dias)
50,9

HAC40 3Kg M60 sintética (1,70% aditivo)		
modulo (GPa)	HORAS	Ecm(t)/Ecm(28)
8,6	12,2	0,30496454
8,2	12,5	0,29078014
9,8	14,3	0,34751773
10,9	14,7	0,38652482
21	31,1	0,74468085
21,2	31,6	0,75177305
23	49,8	0,81560284
23,8	50,2	0,84397163

Ecm28
28,2

HAC40 6Kg M60 sintética (1,70% aditivo)		
COMP	Ft/F28	HORAS
4,0	0,083	12,9
4,2	0,086	13,2
5,3	0,109	14,0
6,3	0,129	14,3
17,5	0,360	33,6
16,8	0,346	34,0
24,9	0,511	54,7
24,8	0,510	54,8

fcm (28 dias)
48,7

HAC40 6Kg M60 sintética (1,70% aditivo)		
modulo (GPa)	HORAS	Ecm(t)/Ecm(28)
9,8	12,8	0,34751773
9,1	13,1	0,32269504
11,3	14	0,40070922
11,8	14,3	0,41843972
20,3	33,6	0,71985816
20,8	33,9	0,73758865
22,6	54,5	0,80141844
22,8	54,8	0,80851064

Ecm28
28,2

HAC40 3Kg/M3 micro sintética (2,10% aditivo)			fcm (28 dias)
COMP	Ft/F28	HORAS	
3,9	0,082	10,2	47,8
4,8	0,101	10,7	
6,2	0,130	11,7	
6,5	0,135	12,1	
14,3	0,299	24,2	
14,5	0,303	24,9	
32,5	0,680	73,6	
33,8	0,708	73,9	

HAC40 3Kg/M3 micro sintética (2,10% aditivo)			Ecm28
modulo (GPa)	HORAS	Ecm(t)/Ecm(28)	
7,8	10	0,28571429	27,3
8,4	10,5	0,30769231	
9,2	11,7	0,33699634	
9,9	12,1	0,36263736	
23,4	24	0,85714286	
21,3	24,7	0,78021978	
25,1	73,5	0,91941392	
22,7	73,8	0,83150183	

HAC40 6Kg/M3 micro sintética (2,60% aditivo)			fcm (28 dias)
COMP	Ft/F28	HORAS	
0,8	0,019	11,8	44,8
0,8	0,017	12,2	
0,8	0,019	13,1	
1,3	0,028	13,6	
12,5	0,279	25,3	
12,7	0,284	26,5	
23,4	0,523	54,3	
25,1	0,560	54,7	

HAC40 6Kg/M3 micro sintética (2,60% aditivo)			Ecm28
modulo (GPa)	HORAS	Ecm(t)/Ecm(28)	
3,1	11,8	0,11091234	28,0
3,4	12	0,1216458	
4,3	13,1	0,15384615	
4,9	13,4	0,17531306	
16,2	25,1	0,57960644	
16,1	26,4	0,57602862	
22,8	54,2	0,8157424	
22,1	54,7	0,79069767	

H40 sin (0,65% aditivo)			fcm (28 dias)
COMP	f(t)/fcm(28)	HORAS	
2,7	0,051	10,4	52,6
3,3	0,062	10,7	
4,5	0,086	11,5	
5,1	0,096	11,7	
17,9	0,340	25,4	
18,7	0,355	25,7	
31,0	0,590	43,9	
32,0	0,608	44,3	

H40 sin (0,65% aditivo)			Ecm28
modulo (GPa)	HORAS	Ecm(t)/Ecm(28)	
8,1	10,3	0,261	31,1
8,3	10,6	0,267	
10,4	11,4	0,335	
10,5	11,7	0,338	
20,4	25,3	0,657	
19,8	25,6	0,638	
26,4	43,8	0,850	
25,5	44,2	0,821	

H40 30Kg 65/60 ACERO (0,65% aditivo)		
COMP	f(t)/fcm(28)	HORAS
2,6	0,049	10,3
5,0	0,096	10,4
6,5	0,124	11,4
4,6	0,087	11,7
18,5	0,352	25,3
19,5	0,371	25,6
30,8	0,585	44
30,0	0,571	44,3

fcm (28 dias)
52,6

H40 30Kg 65/60 ACERO (0,65% aditivo)		
modulo (GPa)	HORAS	Ecm(t)/Ecm(28)
8,5	10,2	0,269
8,8	10,5	0,278
11,7	11,3	0,370
11,6	11,6	0,367
20,8	25,3	0,657
22,7	25,6	0,717
23,7	43,9	0,749
25,3	44,2	0,799

Ecm28
31,7

H40 60Kg 65/60 ACERO (0,70% aditivo)		
COMP	f(t)/fcm(28)	HORAS
3,9	0,075	11,1
5,0	0,097	11,4
7,1	0,138	12,6
9,9	0,192	12,9
21,3	0,414	29,6
21,4	0,416	29,9
40,1	0,779	53,9
39,2	0,760	54,2

fcm (28 dias)
51,5

H40 60Kg 65/60 ACERO (0,70% aditivo)		
modulo (GPa)	HORAS	Ecm(t)/Ecm(28)
9,3	11,1	0,285
10,4	11,3	0,319
16,9	12,5	0,518
16,8	12,8	0,515
24,4	29,6	0,747
26,3	29,9	0,806
29,8	53,8	0,913
27,1	54,2	0,830

Ecm28
32,7

H40 3Kg M60 sintética (0,75% aditivo)		
COMP	f(t)/fcm(28)	HORAS
2,1	0,040	8,8
3,1	0,061	9,2
7,0	0,136	12
8,0	0,155	13
21,5	0,418	23,1
21,2	0,412	23,6

fcm (28 dias)
51,5

H40 3Kg M60 sintética (0,75% aditivo)		
modulo (GPa)	HORAS	Ecm(t)/Ecm(28)
10,0	8,7	0,319
10,0	9,1	0,319
13,0	12,5	0,415
14,0	12,8	0,447
23,0	22,7	0,734
23,3	23,4	0,743

Ecm28
31,4

H40 6Kg M60 sintética (0,80% aditivo)		
COMP	f(t)/fcm(28)	HORAS
2,4	0,048	11,9
2,0	0,040	12,3
5,5	0,108	14
5,9	0,117	14,3
20,2	0,399	27,5
22,4	0,444	28
25,7	0,508	50,8
24,1	0,476	51,2

fcm (28 dias)
50,6

H40 6Kg M60 sintética (0,80% aditivo)		
modulo	HORAS	Et/Ecm28
7,2	11,7	0,228
7,3	12,2	0,231
15,9	13,9	0,504
15,1	14,2	0,480
25,2	27,4	0,799
26,4	27,9	0,837
24,1	50,8	0,764
24,5	51,1	0,777

Ecm28
31,6

Anejo 3

Análisis da datos, un parámetro

	to	DS	DS modulo	DS INICIAL	DS INICIAL MODULO
HAC40 sin (1,70% aditivo)	8,69	0,029	0,141	0,148	0,279
HAC40 30Kg/M3 65/60 acero (1,70% aditivo)	7,41	0,021	0,143	0,146	0,343
HAC40 60Kg/M3 65/60 acero (1,70% aditivo)	9,97	0,069	0,09	0,192	0,279
HAC40 3Kg M60 sintética (1,70% aditivo)	9,73	0,039	0,102	0,175	0,276
HAC40 6Kg M60 sintética (1,70% aditivo)	9,78	0,049	0,084	0,177	0,252
HAC40 3Kg/M3 micro sintética (2,10% aditivo)	6,79	0,04	0,143	0,131	0,262
HAC40 6Kg/M3 micro sintética (2,60% aditivo)	10,62	0,031	0,17	0,22	0,427
TODOS LOS HAC40	7,74	0,058	0,168	0,162	0,291

	to	DS	DS modulo	DS INICIAL	DS INICIAL MODULO
HAC25 sin (1,80% aditivo)	8,91	0,068	0,076	0,189	0,274
HAC25 30Kg/M3 65/60 ACERO (1,85% aditivo)	8,69	0,015	0,122	0,155	0,279
HAC25 60Kg/M3 65/60 ACERO (1,85% aditivo)	8,69	0,046	0,211	0,161	0,359
HAC25 3Kg M60 sintética (1,80% aditivo)	9,45	0,034	0,104	0,185	0,358
HAC25 6Kg/M3 M60 sintética (1,80% aditivo)	8,88	0,029	0,134	0,158	0,288
HAC25 3 Kg/M3 MICRO (2,10% aditivo)	9,72	0,099	0,223	0,212	0,41
HAC25 6 Kg/M3 MICRO (2,60% aditivo)	9,72	0,168	0,342	0,277	0,448
TODOS LOS HAC25	8,91	0,08	0,191	0,184	0,331

	to	DS	DS modulo	DS INICIAL	DS INICIAL MODULO
H40 sin (0,65% aditivo)	7,47	0,044	0,131	0,148	0,285
H40 30Kg 65/60 ACERO (0,65% aditivo)	6,86	0,035	0,134	0,133	0,268
H40 60Kg 65/60 ACERO (0,70% aditivo)	6,25	0,106	0,129	0,148	0,218
H40 3Kg M60 sintética (0,75% aditivo)	5,93	0,042	0,12	0,136	0,255
H40 6Kg M60 sintética (0,80% aditivo)	9,33	0,045	0,111	0,172	0,268
H40 3Kg MICRO (1,00% aditivo)	10,62	0,099	0,162	0,226	0,367
H40 6Kg MICRO (1,20% aditivo)	9,15	0,011	0,14	0,176	0,363
TODOS LOS H40	7,99	0,07	0,152	0,157	0,278

	to	DS	DS modulo	DS INICIAL	DS INICIAL MODULO
H25 sin (0,65% aditivo)	9,9	0,056	0,053	0,2	0,278
H25 30Kg/M3 65/60 metal (0,75% aditivo)	10,08	0,091	0,149	0,24	0,42
H25 60Kg/M3 65/60 metal (0,70% aditivo)	10,1	0,07	0,16	0,194	0,35
H25 3Kg/M3 M60 sintética (0,75% aditivo)	10,44	0,053	0,122	0,215	0,329
H25 6Kg/M3 M60 sintética (0,80% aditivo)	7,47	0,029	0,164	0,131	0,287
H25 3Kg/M3 MCIRO (1,00% aditivo)	7,93	0,035	0,275	0,147	0,404
H25 6Kg/M3 MCIRO (1,20% aditivo)	6,75	0,059	0,343	0,135	0,409
TODOS LOS H25	8,82	0,067	0,2	0,174	0,341

Análisis de datos, dos parámetros (sin restricción numérica)

	to	kte	DS	DS modulo	DS INICIAL	DS INICIAL MODULO
HAC40 sin (1,70% aditivo)	8,69	1	0,029	0,141	0,148	0,279
HAC40 30Kg/M3 65/60 acero (1,70% aditivo)	6,55	1,09	0,011	0,163	0,146	0,343
HAC40 60Kg/M3 65/60 acero (1,70% aditivo)	7,76	1,25	0,023	0,111	0,192	0,279
HAC40 3Kg M60 sintética (1,70% aditivo)	9,61	1,01	0,039	0,103	0,175	0,276
HAC40 6Kg M60 sintética (1,70% aditivo)	7,17	1,25	0,011	0,097	0,177	0,252
HAC40 3Kg/M3 micro sintética (2,10% aditivo)	6,55	1,02	0,04	0,145	0,131	0,262
HAC40 6Kg/M3 micro sintética (2,60% aditivo)	10,62	1,1	0,017	0,142	0,22	0,427
TODOS LOS HAC40	7,74	1,14	0,044	0,139	0,162	0,291

	to	kte	DS	DS modulo	DS INICIAL	DS INICIAL MODULO
HAC25 sin (1,80% aditivo)	7,25	1,25	0,034	0,066	0,189	0,274
HAC25 30Kg/M3 65/60 ACERO (1,85% aditivo)	8,18	1,05	0,011	0,127	0,155	0,279
HAC25 60Kg/M3 65/60 ACERO (1,85% aditivo)	6,09	1,22	0,02	0,22	0,161	0,359
HAC25 3Kg M60 sintética (1,80% aditivo)	9,45	1,03	0,033	0,096	0,185	0,358
HAC25 6Kg/M3 M60 sintética (1,80% aditivo)	7,43	1,13	0,015	0,142	0,158	0,288
HAC25 3 Kg/M3 MICRO (2,10% aditivo)	8,34	1,25	0,052	0,206	0,212	0,41
HAC25 6 Kg/M3 MICRO (2,60% aditivo)	9,18	1,25	0,112	0,306	0,277	0,448
TODOS LOS HAC25	7,23	1,25	0,058	0,177	0,184	0,331

	to	kte	DS	DS modulo	DS INICIAL	DS INICIAL MODULO
H40 sin (0,65% aditivo)	7,47	1	0,044	0,131	0,148	0,285
H40 30Kg 65/60 ACERO (0,65% aditivo)	6,86	1	0,035	0,134	0,133	0,268
H40 60Kg 65/60 ACERO (0,70% aditivo)	6,25	1	0,106	0,129	0,148	0,218
H40 3Kg M60 sintética (0,75% aditivo)	5,93	1	0,042	0,12	0,136	0,255
H40 6Kg M60 sintética (0,80% aditivo)	9,33	1	0,045	0,111	0,172	0,268
H40 3Kg MICRO (1,00% aditivo)	9,37	1,25	0,049	0,144	0,226	0,367
H40 6Kg MICRO (1,20% aditivo)	9,12	1	0,011	0,141	0,176	0,363
TODOS LOS H40	7,92	1	0,07	0,146	0,157	0,278

	to	kte	DS	DS modulo	DS INICIAL	DS INICIAL MODULO
H25 sin (0,65% aditivo)	8,53	1,21	0,036	0,083	0,2	0,278
H25 30Kg/M3 65/60 metal (0,75% aditivo)	10,08	1,25	0,042	0,097	0,24	0,42
H25 60Kg/M3 65/60 metal (0,70% aditivo)	7,81	1,25	0,028	0,234	0,194	0,35
H25 3Kg/M3 M60 sintética (0,75% aditivo)	9,11	1,25	0,01	0,113	0,215	0,329
H25 6Kg/M3 M60 sintética (0,80% aditivo)	6,9	1,05	0,027	0,176	0,131	0,287
H25 3Kg/M3 MCIRO (1,00% aditivo)	6,92	1,11	0,027	0,273	0,147	0,404
H25 6Kg/M3 MCIRO (1,20% aditivo)	6,75	1	0,059	0,343	0,135	0,409
TODOS LOS H25	7,58	1,2	0,054	0,188	0,174	0,341

(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)