



TESIS DOCTORAL

**DISEÑO DE HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES
EXPANSIVOS PARA EL REFUERZO POR
CONFINAMIENTO DE PILARES CILÍNDRICOS DE
HORMIGÓN**

PEDRO CARBALLOSA DE MIGUEL

INGENIERÍA MECÁNICA, ENERGÍA Y MATERIALES

2016



TESIS DOCTORAL

**DISEÑO DE HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES
EXPANSIVOS PARA EL REFUERZO POR
CONFINAMIENTO DE PILARES CILÍNDRICOS DE
HORMIGÓN**

PEDRO CARBALLOSA DE MIGUEL

INGENIERÍA MECÁNICA, ENERGÍA Y MATERIALES

Conformidad de los Directores:

Dr. José Pedro Gutiérrez Jiménez; Dr. David Revuelta Crespo; Dr. Antonio Macías García

2016

AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo de investigación ha sido posible gracias a la contribución de numerosas personas y entidades, pero es necesario particularizar aun sabiendo que uno siempre se deja a alguien sin mencionar.

Agradecer a las instituciones y empresas que han permitido mediante su aportación de medios humanos, materiales y económicos el llevar a cabo esta tesis:

Al Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción (IETcc) por posibilitar y facilitar la realización de este trabajo de investigación contando con sus profesionales y sus instalaciones.

Al Ministerio de Ciencia e Innovación de España, actualmente Ministerio de Economía y Competitividad, la financiación para desarrollar el proyecto BIA2007-62464: "*Empleo De Micro-Hormigón Autocompactable Y De Retracción Compensada Para Sistemas De Refuerzo Estructural De Pilares De Hormigón Armado Por Técnicas De Confinamiento*", a través de la convocatoria de Ayudas a Proyectos de I+D 2007 y el proyecto BIA2013-49103-C2-1-R: "*Diseño y Caracterización De Hormigones Especia Estructurales De Infraestructuras Viarias (DyCHEPEE)*" a través de la convocatoria de Ayudas a Proyectos de I+D 2013.

A la empresa SIKA, S.A.U. por ceder gran parte de los medios materiales empleados en esta investigación.

Así mismo, en el ámbito personal, me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento:

A José Pedro, por aceptar mi solicitud de primera estancia y darme a conocer el IETcc, por contribuir a mi desarrollo profesional con sus consejos y disponibilidad, por dotarme de sentido crítico y rigor en mi trabajo y, principalmente, por ayudarme en momentos no tan fáciles que hubo que pasar durante el desarrollo de esta investigación.

A David, por acordarse de mí y ofrecerme mi primera oportunidad laboral, introducirme en el mundo de los hormigones y enseñarme a interpretar "su" lenguaje, gracias por confiar en mi capacidad para sacar el trabajo adelante y servir como modelo profesional; incluso gracias por dejarme de regalo algún "marroncete" que me sirvió para crecer profesionalmente.

A Antonio, por tutelarme en la Universidad y ofrecerme, además de sus conocimientos técnicos y consejos personales, su total disposición para llevar a cabo la ardua tarea burocrática que implica la presentación de esta Tesis. Gracias también, por "engañarme" con los plazos, lo que puso la presión necesaria para acabar de una vez este documento.

A Luis, por permitirme seguir con una línea de trabajo, en su momento, en ciernes y ofrecerme su ayuda aunque la distancia fuera larga.

A Alfredo y David, por su trabajo en la sombra, su disposición a “mancharse” y capacidad profesional. En particular, a Alfredo gracias por su humildad, sus consejos “pitu” en mano y, sobre todo, por su manera de ser y apoyo cuando las cosas se torcieron en alguna ocasión. A ambos os responsabilizo de gran parte de la consecución de este trabajo.

A los “Joses”, por introducirme en el mundillo a escala de grises de la microestructura localizando fases y analizando compuestos en sesiones de SEM divertidas a la par que instructivas.

A Gabriel y Javier, por su disposición a echar siempre una mano a un neófito en la instrumentación, solventando con paciencia dudas y preguntas.

A mis amigos, a aquellos que desde que nos conocimos en párvulos seguimos juntos y a aquellos que a lo largo de los años se han ido incorporando haciendo crecer esa otra familia, a vosotros, gracias por estar siempre ahí.

A Juan Antonio, por su apoyo constante, sus consejos siempre acertados y los viajes y tertulias departiendo de esas otras “cosas”.

A mi “nana” Pilar, por ser ejemplo de capacidad de trabajo y sacrificio llevados con aptitud y discreción, cualidades todas ellas que me quedan bastante lejos.

A Aurélie, mi pareja y compañera durante este viaje de investigación, por apoyarme, aguantarme y hacerme disfrutar del día a día dándome un enfoque nuevo y distinto de las cosas.

A mis padres, Pedro y Marisol, a vosotros en particular, gracias. Gracias por vuestra educación, apoyo y cariño, por darme la oportunidad a la que no pudisteis tener acceso y por ser ejemplo continuo en todas las facetas de la vida, sobre todo, la humana.

A todos, GRACIAS!

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	I
ÍNDICE DE TABLAS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Novedades propuestas	4
2 ESTADO DEL ARTE	7
2.1 Refuerzo y reparación de estructuras. Sistemas de confinamiento	7
2.1.1 Introducción.....	7
2.1.2 Encamisado o recrecido de hormigón.....	8
2.1.3 Encamisado metálico	13
2.1.4 Encamisados de materiales compuestos.....	17
2.1.5 Sistemas Concrete Filled Tube (CFT).....	23
2.2 Hormigones expansivos.....	27
2.2.1 Introducción.....	27
2.2.2 Historia y evolución de los cementos expansivos	28
2.2.3 Cementos expansivos.....	30
2.2.4 Aditivos expansivos.....	31
2.2.5 Definiciones y tipos de hormigones expansivos	32
2.2.6 Mecanismo de expansión e hidratación.....	34
2.2.7 Factores que afectan a la magnitud y velocidad de la expansión.....	38
2.2.8 Composición y dosificación de los cementos expansivos.....	49
2.2.9 Guías de uso y métodos de ensayo.....	50
2.3 Hormigón autocompactante	54
2.3.1 Definición	54
2.3.2 Historia y evolución	54
2.3.3 Características del HAC.....	55
2.3.4 Diseño de mezclas de HAC	56
2.3.5 Métodos de ensayo en fresco	57
2.3.6 Fabricación y puesta en obra.....	60
2.3.7 Sostenibilidad.....	61
2.3.8 Reglamentación	61
3 DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE DOSIFICACIONES DE HACE	65
3.1 Introducción.....	65
3.2 Objetivos	65
3.3 Materiales y equipos	65
3.3.1 Materiales.....	66
3.3.2 Equipos de ensayo y medición	68
3.4 Metodología	72
3.4.1 Identificación de la composición básica y fases mineralógicas de los elementos de partida y los HACE.....	72
3.4.2 Diseño teórico y definición de dosificaciones de HACE.....	76

3.4.3	Caracterización del estado fresco de los HACE	77
3.4.4	Caracterización del estado endurecido. Propiedades mecánicas	78
3.5	Resultados y discusión	80
3.5.1	Análisis químico elemental y determinación de la composición mineralógica	80
3.5.2	Caracterización del estado fresco de los HACE	91
3.5.3	Caracterización del estado endurecido. Propiedades mecánicas	96
3.6	Conclusiones capítulo 3	103
4	DETERMINACIÓN DEL GRADO DE EXPANSIÓN EN PROBETAS PRISMÁTICAS SEGÚN MÉTODOS DE ENSAYO NORMALIZADOS.....	107
4.1	Introducción.....	107
4.2	Objetivos	108
4.3	Materiales y equipos	109
4.3.1	Materiales.....	109
4.3.2	Equipos de ensayo y medición	109
4.4	Metodología	110
4.4.1	Determinación del grado de expansión libre en probetas prismáticas de hormigón.....	110
4.4.2	Determinación del grado de expansión restringido en probetas prismáticas de hormigón	111
4.5	Resultados y discusión	113
4.5.1	Determinación del grado de expansión lineal libre en probetas prismáticas de hormigón	114
4.5.2	Determinación del grado de expansión lineal restringido en probetas prismáticas de hormigón	120
4.5.3	Análisis de resultados	124
4.6	Conclusiones capítulo 4	130
5	DETERMINACIÓN DEL GRADO DE EXPANSIÓN EN DISPOSITIVO TIPO ANILLO.....	133
5.1	Introducción.....	133
5.2	Objetivos	135
5.3	Materiales y equipos	136
5.3.1	Materiales.....	136
5.3.2	Equipos de ensayo y medición	137
5.4	Metodología	139
5.4.1	Determinación del grado de expansión circunferencial y restricción en elementos cilíndricos. Propuesta de método de ensayo en elementos tipo anillo	139
5.4.2	Determinación del grado de correlación existente entre las deformaciones registradas a primeras edades en elementos tipo viga y tipo anillo.....	143
5.5	Resultados y discusión	144
5.5.1	Determinación del grado de expansión restringido en dispositivo de doble anillo.....	144
5.5.2	Determinación del grado de correlación existente entre las deformaciones registradas a primeras edades en elementos tipo viga y tipo anillo.....	152
5.5.3	Análisis de resultados	154
5.6	Conclusiones capítulo 5.....	163
6	DETERMINACIÓN DEL GRADO DE EXPANSIÓN Y CONTRIBUCION MECÁNICA DEL HACE DISEÑADO SOBRE ELEMENTOS TIPO PROBETA Y TIPO PILAR CILÍNDRICO DE HORMIGÓN ARMADO	165

6.1	Introducción.....	165
6.2	Objetivos	165
6.3	Materiales y equipos	166
6.3.1	Materiales.....	166
6.3.2	Equipos de ensayo y medición	166
6.4	Metodología	167
6.4.1	Determinación del grado de expansión y contribución resistente en elementos cilíndricos de hormigón tipo probeta y tipo pilar armado.....	167
6.4.2	Consideraciones previas al vertido del HACE-15%	176
6.5	Resultados y discusión	178
6.5.1	Determinación del grado de expansión en elementos cilíndricos de hormigón tipo probeta y tipo pilar armado	178
6.5.2	Determinación de la contribución mecánica en elementos cilíndricos de hormigón tipo probeta y tipo pilar armado.....	179
6.5.3	Análisis de resultados	185
6.6	Conclusiones capítulo 6	197
7	CONCLUSIONES	201
8	LINEAS FUTURAS DE TRABAJO	209
9	BIBLIOGRAFIA	211

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Método de ensayo según la guía de uso utilizada.....	50
Tabla 2.2 Dimensiones del dispositivo “Restraining Cage”.....	53
Tabla 2.3 Clases de escurrimiento, EHE-08.....	62
Tabla 2.4 Clases de viscosidad, EHE-08.....	62
Tabla 2.5 Clases de resistencia al bloqueo, EHE-08.....	62
Tabla 2.6 Clases de escurrimiento.....	63
Tabla 2.7 Clases de viscosidad – t_{500}	63
Tabla 2.8 Clases de viscosidad. Embudo en V.....	63
Tabla 2.9 Clases de capacidad de paso. Caja en L.....	63
Tabla 2.10 Clases de capacidad de paso – Anillo J.....	63
Tabla 3.1 Características físicas hormigón predosificado SIKACRETE-08 SCC (obtenidas de la ficha técnica del fabricante).....	66
Tabla 3.2 Composición química nominal del aditivo expansivo DENKA CSA 20 (obtenidas de la ficha técnica del fabricante).....	67
Tabla 3.3 Características físicas del aditivo expansivo DENKA CSA 20 (obtenidas de la ficha técnica del fabricante).....	68
Tabla 3.4 Características de la mezcladora DZ 120V.....	70
Tabla 3.5 Características de la instalación de ensayos MEH-3000-W.....	72
Tabla 3.6 Análisis químicos - Métodos de ensayo.....	73
Tabla 3.7 Fases mineralógicas y patrones referencia.....	74
Tabla 3.8 Muestras para ensayo DRX.....	74
Tabla 3.9 Dosificación de componentes para 1m^3 de hormigón.....	77
Tabla 3.10 Ensayos de caracterización de la autocompactabilidad.....	78
Tabla 3.11 Ensayos de caracterización de la densidad y contenido de aire.....	78
Tabla 3.12 Ensayos de caracterización de las propiedades mecánicas.....	80
Tabla 3.13 Composición química elemental del aditivo expansivo y del hormigón predosificado.....	80
Tabla 3.14 Caracterización del hormigón autocompactante en el estado fresco.....	91
Tabla 3.15 Requisitos generales para la autocompactabilidad, EHE-08.....	92
Tabla 3.16 Clases de escurrimiento, EHE-08.....	92
Tabla 3.17 Clases de viscosidad, EHE-08.....	92
Tabla 3.18 Resultados resistencia a flexión según UNE-EN 1015-11.....	97
Tabla 3.19 Resultados resistencia a compresión sobre probetas cúbicas según UNE-EN 1015-11.....	98

Tabla 3.20 Resultados resistencia a compresión sobre probetas cilíndricas según UNE EN 12390-3.....	99
Tabla 3.21 Resultados de módulo de elasticidad estático en compresión.	99
Tabla 4.1 Ambientes de curado de probetas prismáticas.....	108
Tabla 4.2 Métodos de ensayo para determinar cambios de longitud en régimen libre de prismas de hormigón.....	111
Tabla 4.3 Métodos de ensayo para determinar la expansión restringida en prismas de hormigón.....	111
Tabla 4.4 Características de las varillas roscadas.....	112
Tabla 4.5 Resultados de variación de longitud y peso en régimen libre – HACE-0%.	114
Tabla 4.6 Resultados de variación de longitud y peso en régimen libre – HACE-10%.	116
Tabla 4.7 Resultados de variación de longitud y peso en régimen libre – HACE-15%.	118
Tabla 4.8 Resultados de variación de longitud y peso en régimen restringido – HACE-10%.	120
Tabla 4.9 Resultados de variación de longitud y peso en régimen restringido – HACE-15%.	122
Tabla 5.1 Propiedades de la fibra de carbono SIKAWRAP 530 C.	136
Tabla 5.2 Propiedades del sistema epóxico SIKADUR 300.	137
Tabla 5.3 Propiedades de la fibra de carbono SIKAWRAP 530 C antes y después de la aplicación del sistema epoxídico SIKADUR 300.	137
Tabla 5.4 Características de las bandas extensométricas utilizadas.	138
Tabla 5.5 Características del Equipo de adquisición de datos Data Logger Agilent 34970 ^a	138
Tabla 5.6 Dimensiones del dispositivo de ensayo diseñado en el IETcc.	140
Tabla 5.7 Regímenes de curado de los elementos tipo anillo.	141
Tabla 5.8 Resultados de deformación circunferencial del HACE-15% en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de acero.	145
Tabla 5.9 Resultados de deformación circunferencial del HACE-10% en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de acero.	146
Tabla 5.10 Resultados de deformación circunferencial del HACE-15% en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de fibra de carbono (CFRP).	147
Tabla 5.11 Resultados de deformación circunferencial del HACE-10% en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de fibra de carbono (CFRP).	148
Tabla 5.12 Resultados de deformación circunferencial del HACE-15% en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de acero.	149
Tabla 5.13 Resultados de deformación circunferencial del HACE-10% en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de acero.	150
Tabla 5.14 Resultados de deformación circunferencial del HACE-15% en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de fibra de carbono (CFRP).	151

Tabla 5.15 Resultados de deformación circunferencial del HACE-10% en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de fibra de carbono (CFRP).	152
Tabla 5.16 Datos de influencia de la temperatura en régimen de expansión en anillos con cobertura de film y dosis de aditivo expansivo 15%.	156
Tabla 5.17 Porcentaje de deformación perdido al retrasar el registro de deformaciones 24 horas.	159
Tabla 5.18 grado de correlación lineal y exponencial.	162
Tabla 6.1 Elementos objeto de ensayo tipo probeta.....	176
Tabla 6.2 Elementos objeto de ensayo tipo pilar.	176
Tabla 6.3 Expansión circunferencial promedio – Elementos tipo probeta 150 x 300 mm	178
Tabla 6.4 Expansión circunferencial promedio – Elementos tipo pilar 900 x 240 mm.....	179
Tabla 6.5 Resultados de resistencia a compresión, módulo de elasticidad y deformación determinados sobre probetas de dimensiones 150 x 300 mm con diferentes configuraciones de refuerzo.....	180
Tabla 6.6 Resultados de resistencia a compresión, módulo de elasticidad y deformación determinados sobre pilares armados de dimensiones 240 x 900 mm con diferentes configuraciones de refuerzo.....	183

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Vertido de hormigón - encamisados de hormigón armado.....	9
Figura 2.2 Esquema del refuerzo de pilares mediante encamisados de hormigón armado.....	10
Figura 2.3 Esquema del refuerzo de pilares mediante encamisados prefabricados de hormigón armado.....	10
Figura 2.4 Esquema del refuerzo de pilares mediante encamisados de acero.....	13
Figura 2.5 Pilares reparados mediante encamisados metálicos en Los Ángeles y San Francisco.....	14
Figura 2.6 Técnica de refuerzo basada en encamisados prefabricados ¹	18
Figura 2.7 a) esquema de refuerzo de bobinado automático, b) Robot de bobinado automático.....	19
Figura 2.8 Diagrama tensión-deformación, para diferentes FRPs de carácter unidireccional y el acero. CFRP= FRP carbono, AFRP= FRP de aramida, GFRP= FRP de vidrio.....	19
Figura 2.9 Diagrama de aditivos expansivos (Nagataki y Gomi, 1998).....	32
Figura 2.10 Muestra del comportamiento resistente de hormigones con cemento o aditivo tipo K a la fisuración por retracción plástica (Mehta y Monteiro, 2006) ⁶²	33
Figura 2.11 Régimen de deformaciones de un hormigón convencional basado en cemento Portland tipo CEM I y de un hormigón fabricado con cemento expansivo tipo K (Mehta y Monteiro, 2006) ⁶²	33
Figura 2.12 Swelling Theory - Reacción por precipitación.....	35
Figura 2.13 Crystal Growth Theory - Reacción topoquímica ⁸⁸	35
Figura 2.14 Sistema de hidratación de los compuestos CSA ⁸⁸	36
Figura 2.15 Esquema de formación de microfisuras por la acción expansiva del aditivo expansivo ⁸⁸	37
Figura 2.16 Efecto del contenido de sulfatos.....	39
Figura 2.17 Influencia de la superficie específica del cemento en el desarrollo de expansiones... 40	40
Figura 2.18 Influencia de la superficie específica del cemento en el desarrollo de expansiones en régimen restringido.....	40
Figura 2.19 Influencia en la magnitud de la expansión de la proporción adicionada de material expansivo.....	41
Figura 2.20 Efecto del contenido de cemento en la expansión.....	41
Figura 2.21 Efecto de la relación agua/cemento en el % de expansión para contenidos de cementos constantes y un grado de restricción determinado.....	42
Figura 2.22 Efecto del tipo de curado en la expansión.....	43
Figura 2.23 Efecto del tipo de curado en la expansión.....	43

Figura 2.24 Efecto de la temperatura de curado y humedad relativa sobre la expansión en hormigones de retracción compensada sin restricción.....	44
Figura 2.25 Efecto de la temperatura de curado sobre la expansión en hormigones pretensados químicamente con y sin restricción.....	44
Figura 2.26 Efecto de la temperatura de curado sobre la expansión en hormigones de retracción compensada con restricción.	45
Figura 2.27 Efecto del tiempo de mezclado sobre la expansión en hormigones expansivos.....	47
Figura 2.28 Efecto del tipo de aditivo superplastificante sobre la expansión de hormigones expansivos.....	47
Figura 2.29 Efecto del tipo de árido sobre la expansión en hormigones de retracción compensada sin restricción.....	48
Figura 2.30 influencia del envejecimiento en la reactividad del cemento o aditivo expansivo.....	49
Figura 2.31 Estimación ACI 223 de la expansión de un elemento estructural a partir de la expansión de prismas basados en sistemas de Etringita.....	51
Figura 2.32 Molde ASTM C490-Probeta HACE, ensayo ASTM C157.....	52
Figura 2.33 Índices para ensayo ASTM C157.....	52
Figura 2.34 Comparador de longitud.....	52
Figura 2.35 Configuración del dispositivo “Restraining Cage” montado.....	53
Figura 2.36 Molde ASTM C490-Probeta ensayo ASTM C878.....	53
Figura 2.37 Parámetros reológicos según el modelo de fluido Bingham.....	55
Figura 2.38 Comparación reológica entre hormigón autocompactante, hormigón convencional y hormigón fluido.....	56
Figura 2.39 Tensión de flujo frente a viscosidad para diferentes tipos de hormigones.....	56
Figura 2.40 Ensayo de escurrimiento.....	58
Figura 2.41 Ensayo del embudo en V.....	58
Figura 2.42 Ensayo de caja en L.....	58
Figura 2.43 Ensayo del anillo japonés.....	59
Figura 2.44 Ensayo de estabilidad en tamiz.....	59
Figura 2.45 Ejemplo de acabado del mismo HAC pero con diferente desencofrante.....	61
Figura 3.1 SIKACRETE-08 SCC.....	66
Figura 3.2 DENKA CSA 20.....	67
Figura 3.3 Equipo FRX, S8 TIGER de Bruker.....	68
Figura 3.4 Equipo DRX, D8 ADVANCE de Bruker.....	69
Figura 3.5 Equipo FESEM, HITACHI S-4800.....	69
Figura 3.6 Mezcladora DZ-120V.....	70
Figura 3.7 Esquema dimensional de la mezcladora DZ-120V.....	71

Figura 3.8	Instalación de ensayos MEH-3000-W.	71
Figura 3.9	Muestra obtenida por machaqueo (izquierda). Conservación en isopropílico (derecha).	75
Figura 3.10	Muestra ensayo DRX (izquierda). Muestra ensayo BSEM/EDS (derecha).	76
Figura 3.11	Probeta cilíndrica instrumentada con compresómetro ASTM C469.	79
Figura 3.12	Difractograma del hormigón predosificado SIKACRETE SCC08.	81
Figura 3.13	Difractograma del aditivo expansivo DENKA CSA 20.	81
Figura 3.14	Difractograma de las mezclas de HACE sin film a la edad de hidratación de 1 día. ...	82
Figura 3.15	Difractograma mezcla HACE-10% con film – evolución con la edad de hidratación..	83
Figura 3.16	Difractograma mezcla HACE-15% con film – evolución con la edad de hidratación..	83
Figura 3.17	Difractograma mezcla HACE-50% con film – evolución con la edad de hidratación..	84
Figura 3.18	Comparativa del % de Etringita estimado mediante DRX y % de expansión desarrollada en ambiente A1.	85
Figura 3.19	Comparativa del % de Etringita estimado mediante DRX y % de expansión desarrollada en ambiente A2.	85
Figura 3.20	Comparativa de % de Ye'elemita detectado mediante DRX y % de expansión desarrollada en ambiente A1 y A2 para las muestras de HACE-15%.	86
Figura 3.21	Microfisuración de la matriz cemento a edades iniciales.	87
Figura 3.22	Microfisuras rellenándose con nuevos productos de hidratación tipo Etringita (izquierda). Matriz cementicia HACE-10% a 28 días (derecha).	87
Figura 3.23	Matriz con presencia de microfisuras de la muestra HACE-15% a la edad de 28 días.	88
Figura 3.24	Muestra HACE-15% - Núcleos de Ye'elemita- $C_4A_3\check{S}$ distribuidos en la matriz cementicia con distinto nivel de hidratación a las edades de 1 día (izquierda) y 3 días (derecha). 88	88
Figura 3.25	Núcleo de Ye'elemita- $C_4A_3\check{S}$ en proceso de hidratación y disposición de los compuestos hidratados a su alrededor. Análisis EDS realizados.	89
Figura 3.26	Etringita convencional en poro de la matriz cementicia. Análisis EDS realizado.	90
Figura 3.27	HACE-15% - Zona de concentración de anhídros tipo Ye'elemita, anhídrita y magnesio a la edad de 1 día (izquierda). Detalle de una zona de la muestra (derecha). Análisis EDS correspondientes a estos anhídros.	90
Figura 3.28	HACE-15% - Zona de concentración de anhídros parcialmente hidratados a la edad de 28 días. EDS sobre perímetro alrededor de la concentración de anhídros.	91
Figura 3.29	Escurrimiento dosificación HACE-15%.	93
Figura 3.30	Comparativa del escurrimiento determinado según UNE EN 12350-8.	93
Figura 3.31	Comparativa del tiempo de flujo determinado según UNE EN 12350-9.	94
Figura 3.32	Comparativa del contenido de aire determinado según UNE EN 12350-7.	95

Figura 3.33 Presencia de burbujas superficiales.	95
Figura 3.34 Comparativa de la densidad determinada según UNE EN 12350-6.	96
Figura 3.35 Comparativa resistencia a flexión sobre probetas 160 x 40 x 40 mm a las edades de 7 y 28 días.	100
Figura 3.36 Resistencia a flexión conforme UNE EN 1015-11.	100
Figura 3.37 Comparativa resistencia a compresión sobre semiprismas obtenidos de probetas de 160 x 40 x 40 mm a las edades de 7 y 28 días.	101
Figura 3.38 Resistencia a compresión conforme UNE-EN 1015-11.	101
Figura 3.39 Comparativa resistencia a compresión sobre probetas 300 x 150 mm a las edades de 7 y 28 días.	102
Figura 3.40 Comparativa del valor promedio de módulo de elasticidad estático en compresión a la edad de 28 días.	103
Figura 4.1 Deformaciones y tensiones en un hormigón expansivo restringido linealmente.	107
Figura 4.2 Comparador de longitud.	109
Figura 4.3 Prensa Ibertest IBM-UA-1000-MDW.	110
Figura 4.4 Extensómetro DD1.	110
Figura 4.5 Gráfica comparativa Carga-Deformación.	112
Figura 4.6 Probeta prismática con 50% de aditivo expansivo.	114
Figura 4.7 Curvas variación de longitud HACE-0%.	115
Figura 4.8 Curvas variación de peso HACE-0%.	115
Figura 4.9 Curvas variación de longitud HACE-10%.	117
Figura 4.10 Curvas variación de peso HACE-10%.	117
Figura 4.11 Curvas variación de longitud HACE-15%.	119
Figura 4.12 Curvas variación de peso HACE-15%.	119
Figura 4.13 Curvas variación de longitud HACE-10%.	121
Figura 4.14 Curvas variación de peso HACE-10%.	121
Figura 4.15 Curvas variación de longitud HACE-15%.	123
Figura 4.16 Curvas variación de peso HACE-15%.	123
Figura 4.17 HACE-15% - Relación entre la expansión a 3 días y a 7.	125
Figura 4.18 HACE-10% - Relación entre la expansión a 3 días y a 7.	125
Figura 4.19 Ambiente de curado A1 - Influencia de la dosis de aditivo expansivo en la magnitud de la expansión máxima y remanente en régimen libre.	127
Figura 4.20 Ambiente de curado A1 - Influencia de la dosis de aditivo expansivo en la magnitud de la expansión máxima y remanente en régimen restringido.	127
Figura 4.21 Ambiente de curado A2 - Influencia de la dosis de aditivo expansivo en la magnitud de la expansión máxima y remanente en régimen libre.	128

Figura 4.22 Ambiente de curado A2 - Influencia de la dosis de aditivo expansivo en la magnitud de la expansión máxima y remanente en régimen restringido.	129
Figura 5.1 Comportamiento del sistema de confinamiento por encamisados exteriores con HAC convencional.	133
Figura 5.2 Comportamiento del sistema de confinamiento por encamisados exteriores con HAC expansivo (HACE) pretensado químicamente.	134
Figura 5.3 Retracción del HAC de relleno convencional sin efecto tensional sobre la camisa (izquierda). Efecto de la solución de refuerzo por confinamiento con HAC expansivo (derecha).	134
Figura 5.4 Fibra de carbono SIKAWRAP 530 C. Sistema epoxídico SIKADUR 300.	136
Figura 5.5 Bandas extensométricas.	137
Figura 5.6 Equipo de adquisición de datos Data Logger Agilent 34970A.	138
Figura 5.7 Esquema de elementos que componen el sistema de refuerzo real y la disposición del elemento de ensayo diseñado en el IETcc.	139
Figura 5.8 Galga para el registro de deformaciones en los anillos interior y exterior.	140
Figura 5.9 Disposición del elemento de ensayo diseñado en el IETcc.	142
Figura 5.10 Anillo relleno destinado a curado en ambiente A2.	143
Figura 5.11 Resultados de expansión del HACE-15% registrados en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de acero.	145
Figura 5.12 Resultados de expansión del HACE-10% registrados en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de acero.	146
Figura 5.13 Resultados de expansión del HACE-15% registrados en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de fibra de carbono (CFRP).	147
Figura 5.14 Resultados de expansión del HACE-10% registrados en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de fibra de carbono (CFRP).	148
Figura 5.15 Resultados de expansión del HACE-15% registrados en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de acero.	149
Figura 5.16 Resultados de expansión del HACE-10% registrados en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de acero.	150
Figura 5.17 Resultados de expansión del HACE-15% registrados en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de fibra de carbono (CFRP).	151
Figura 5.18 Resultados de expansión del HACE-10% registrados en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de fibra de carbono (CFRP).	152
Figura 5.19 Correlación lineal de la expansión registrada en los anillos con camisa de acero y CFRP en ambiente A1 y la de probetas prismáticas ASTM C878 en ambiente A1.	153
Figura 5.20 Correlación lineal de la expansión registrada en los anillos con camisa de acero y CFRP en ambiente A2 y la de probetas prismáticas ASTM C878 en ambiente A2.	153

Figura 5.21 Ambiente A1: Cambio en la velocidad del desarrollo de la expansión para el HACE-15%.....	155
Figura 5.22 Ambiente A1: Cambio en la velocidad del desarrollo de la expansión para el HACE-10%.....	155
Figura 5.23 Comparativa influencia de la temperatura en régimen de expansión en anillos con cobertura de film y dosis de aditivo expansivo 15%.	157
Figura 5.24 Efecto de la restricción en la deformación circunferencial para la dosis del 15% y diferentes ambientes de curado.....	158
Figura 5.25 Efecto de la restricción en la deformación circunferencial para la dosis del 10% y diferentes ambientes de curado.....	158
Figura 5.26 HACE-15%-Anillo Acero. Comparativa del régimen de expansión considerando la medida de referencia inicial o transcurridas 24 horas.	160
Figura 5.27 HACE-15%-Anillo CFRP. Comparativa del régimen de expansión considerando la medida de referencia inicial o transcurridas 24 horas.	160
Figura 5.28 HACE-10%-Anillo Acero. Comparativa del régimen de expansión considerando la medida de referencia inicial o transcurridas 24 horas.	161
Figura 5.29 HACE-10%-Anillo CFRP. Comparativa del régimen de expansión considerando la medida de referencia inicial o transcurridas 24 horas.	161
Figura 6.1 LVDT.....	166
Figura 6.2 Prensa ICON 1000.	167
Figura 6.3 Disposición de armadura en pilar.	168
Figura 6.4 Disposición de las galgas en elementos sin reforzar.....	169
Figura 6.5 Disposición de las galgas en elementos con refuerzo directo de CFRP.	170
Figura 6.6 Ejecución de refuerzo directo de FRP, paso 1.	171
Figura 6.7 Ejecución de refuerzo directo de FRP, paso 2.	171
Figura 6.8 Ejecución de refuerzo directo de FRP, paso 3.	172
Figura 6.9 Disposición de las galgas en elemento con refuerzo prefabricado de CFRP y HACE de relleno.	173
Figura 6.10 Molde utilizado para fabricar las camisas prefabricadas de CFRP.	173
Figura 6.11 Fabricación de encamisados exteriores de CFRP, paso 1.....	174
Figura 6.12 Fabricación de encamisados exteriores de CFRP, paso 2.....	174
Figura 6.13 Fabricación de encamisados exteriores de CFRP. Curado (izquierda) y desmoldado (derecha).....	175
Figura 6.14 Ejecución de refuerzo indirecto por Vertido y llenado del espacio entre camisa CFRP y elemento a reforzar, tipo probeta (izquierda) y tipo pilar armado (derecha).....	175
Figura 6.15 Operaciones de humedecido Probetas - Pilares.	177

Figura 6.16	Expansión circunferencial promedio – Elementos tipo probeta 150 x 300 cm.	178
Figura 6.17	Expansión circunferencial promedio – Elementos tipo pilar 900 x 240 mm.....	179
Figura 6.18	Comparativa deformación transversal/longitudinal en probetas sin refuerzo.	181
Figura 6.19	Comparativa deformación transversal/longitudinal en probetas con refuerzo directo CFRP.	181
Figura 6.20	Comparativa deformación transversal/longitudinal en probetas con refuerzo CFRP + HACE-15%.....	182
Figura 6.21	Comparativa deformación transversal/longitudinal en pilares sin refuerzo.....	184
Figura 6.22	Comparativa deformación transversal/longitudinal en pilares con refuerzo directo CFRP **pilar refuerzo simple vs refuerzo en doble.	184
Figura 6.23	Comparativa deformación transversal/longitudinal en pilares con refuerzo CFRP + HACE-15%.....	185
Figura 6.24	Expansión circunferencial - Comparativa régimen de expansión inducido por HACE-15% en encamisado CFRP de probetas y dispositivo de doble anillo.....	186
Figura 6.25	Expansión circunferencial - Comparativa valores medios de elementos tipo probeta y pilar.	187
Figura 6.26	Resistencia a compresión en probetas – Comparativa de la contribución resistente de las diferentes tipologías de refuerzo.	189
Figura 6.27	Resistencia a compresión en pilares – Comparativa de la contribución resistente de las diferentes tipologías de refuerzo.	189
Figura 6.28	Módulo de elasticidad estático en compresión – Comparativa de las diferentes tipologías de refuerzo en elementos tipo probeta.....	190
Figura 6.29	Módulo de elasticidad estático en compresión – Comparativa de las diferentes tipologías de refuerzo en elementos tipo pilar.	191
Figura 6.30	Curvas tensión-deformación de elementos tipo probeta (sin refuerzo y refuerzo directo de CFRP).....	192
Figura 6.31	Curvas tensión-deformación de elementos tipo pilar (sin refuerzo y refuerzo directo de CFRP).....	192
Figura 6.32	Curvas tensión-deformación de elementos tipo probeta. Cambio de pendiente inicial que identifica el incremento de rigidez que aporta la solución de refuerzo de CFRP y HACE de relleno.	193
Figura 6.33	Curvas tensión-deformación de elementos tipo pilar. Cambio de pendiente inicial que identifica el incremento de rigidez que aporta la solución de refuerzo de CFRP y HACE de relleno.	194
Figura 6.34	Curvas tensión-deformación circunferencial de elementos tipo pilar con refuerzo simple (izquierda) y refuerzo doble en cabeza y base (derecha).	194

Figura 6.35	Modos de fallo registrados en probetas. Hormigón sin refuerzo (1), con refuerzo simple directo de CFRP (2), con refuerzo simple prefabricado CFRP + HACE-15 (3).....	196
Figura 6.36	Modos de fallo registrados en pilares. Hormigón sin refuerzo (1), con refuerzo simple directo de CFRP (2), con refuerzo directo de CFRP doble en cabeza y base (3), con refuerzo simple prefabricado CFRP + HACE-15 (4) y con refuerzo prefabricado CFRP + HACE-15% + refuerzo doble en cabeza y base del pilar (5).....	196

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad el hormigón armado es el principal material empleado en la mayor parte de las estructuras civiles y de edificación. Estas estructuras están diseñadas, proyectadas y calculadas de tal forma que, con un margen de seguridad suficiente, son capaces de aguantar las solicitaciones y acciones ambientales a las que se supone van a estar sometidas a lo largo de toda su vida útil.

Ocurre en ocasiones que debido a defectos del proyecto o de la ejecución, cambios de uso de la propia estructura, incremento de las solicitaciones actuantes, aparición de acciones no consideradas en el cálculo, deterioro de los materiales o la manifestación de desastres naturales, la capacidad resistente de la estructura se ve comprometida de tal forma que rebasa el umbral de seguridad que garantiza la integridad de la misma. Por ello son numerosos los casos en los que es obligada una intervención para adecuar, reforzar y mejorar la capacidad resistente de la estructura de manera que se garantice la seguridad y adecuada respuesta ante las nuevas acciones, mecánicas y ambientales, intervinientes.

En las últimas décadas los ingenieros han usados diferentes métodos y técnicas de refuerzo y reparación de la estructura existente, siendo una de las más utilizadas, sobre todo en el campo del refuerzo de pilares de hormigón, el confinamiento por encamisados exteriores realizados en materiales como hormigón, acero y fibras de última generación.

El confinamiento por encamisados exteriores, a pesar de ser un refuerzo pasivo, se presenta como un sistema de refuerzo que mejora de forma efectiva las propiedades mecánicas y de durabilidad del elemento reforzado, quedando esto de manifiesto en las numerosas investigaciones de laboratorio y aplicaciones de campo que han sido llevadas a cabo durante los últimos años con las diferentes tipologías de refuerzo por confinamiento existentes.

A continuación se enumeran las diferentes técnicas de confinamiento por encamisado exterior:

- Confinamiento por encamisado exterior de hormigón con o sin refuerzo de barras.
- Confinamiento por encamisado exterior de acero.
- Confinamiento por encamisado exterior de fibra por aplicación directa, denominado FRP (Fiber Reinforced Polymer) wrapping.
- Confinamiento por encamisados exteriores de acero o fibra prefabricados con interposición de hormigón o mortero de relleno.

Esta última técnica de confinamiento por encamisados prefabricados se basa en la técnica constructiva del sistema CFT (Concrete-Filled Tube), consistente en tubos de acero (u otro material) rellenos de hormigón cuyas características de alta resistencia, buena ductilidad y óptima resistencia a la fatiga hacen que tengan un uso cada vez más generalizado, siendo especialmente utilizado en las realizaciones concernientes a puentes de arco y pilares de estructuras de entidad, como pueden ser los pilares de edificios altos en zonas de sismo.

El problema que presenta este refuerzo o sistema constructivo es que el hormigón de relleno convencional experimenta una pérdida de volumen con el tiempo (retracción), que impide la correcta transmisión de esfuerzos del pilar objeto de refuerzo y el encamisado exterior, por lo que la acción de confinamiento se puede ver bastante limitada.

Como se ha dicho, son numerosas las investigaciones llevadas a cabo sobre los sistemas de refuerzo basados en encamisados exteriores analizando de manera exhaustiva las propiedades adicionales, mecánicas y durables, que aportan estos al elemento objeto de refuerzo. Sin embargo, son escasas las investigaciones referentes a los materiales que se disponen entre la camisa exterior y el pilar objeto de refuerzo. La ausencia de referencias es aún más notable en el caso de la técnica de confinamiento por camisas exteriores prefabricadas, donde en la mayor parte de las ocasiones se obvia un elemento tan importante como el diseño y caracterización del hormigón que conecta el encamisado exterior y el pilar a reforzar.

En este trabajo se intenta ofrecer una alternativa mejorada del refuerzo por confinamiento con encamisados exteriores prefabricados de fibra o acero, a través del diseño y caracterización de un novedoso hormigón autocompactante expansivo de relleno. La característica de autocompactabilidad asegura el correcto llenado del espacio interior y la característica de expansivo (Self-Stressing concrete) garantiza una correcta transmisión de tensiones del pilar a la camisa de refuerzo prefabricada, haciendo además que ésta entre en tensión desde el instante inicial de puesta en obra y consiguiéndose por tanto pasar de un refuerzo pasivo a un refuerzo activo.

1.1 Objetivos

Esta investigación presenta una técnica alternativa y novedosa de refuerzo de pilares y columnas de hormigón armado mediante la utilización de un encamisado exterior prefabricado y un Hormigón AutoCompactante Expansivo (en adelante, HACE) de relleno colado entre la columna a reforzar y el encofrado que constituye el encamisado exterior. Este sistema de confinamiento, donde el encamisado prefabricado exterior de refuerzo no se aplica directamente sobre el elemento a reforzar, sino que actúa mediante la acción de un material intermedio (HACE de relleno), es lo que se denomina confinamiento indirecto.

Atendiendo a lo expuesto, el objetivo principal de esta tesis es:

- **El diseño, fabricación y caracterización de un hormigón autocompactante expansivo pretensado químicamente (Self-Stressing Concrete) para su uso posterior en sistemas de refuerzo por confinamiento indirecto como elemento de relleno del espacio comprendido entre el encofrado que constituye la camisa prefabricada exterior y el pilar objeto de refuerzo.**

Esta tipología de hormigones garantizaría, desde el instante inicial de puesta en obra, un correcto llenado y una distribución efectiva de esfuerzos del pilar a la camisa exterior de refuerzo, sin necesidad de sollicitaciones a compresión adicionales que deformen el pilar e independientemente del material utilizado para la fabricación del encamisado exterior, constituyendo así una alternativa mejorada e innovadora en el campo de confinamiento indirecto de pilares mediante camisas prefabricadas que permitiría, además, pasar de un sistema de refuerzo pasivo, a uno activo.

Para llegar a este objetivo principal es necesario cubrir una serie de fases que, en sí mismas, constituyen objetivos específicos sin el cumplimiento de los cuales harían imposible la consecución del objetivo principal. Estos objetivos específicos son:

- Identificación del mecanismo o compuesto que induce la expansión mediante técnicas de análisis microestructural.
- Caracterización de las propiedades reológicas y mecánicas básicas de los HACE diseñados empleando métodos de ensayo basados en normativa UNE-EN (europea) y ASTM (americana) y evaluación de la influencia de la adición de aditivo expansivo sobre las propiedades determinadas.
- Obtención de una dosis concreta de aditivo expansivo que asegure la característica de pretensado químico del hormigón mediante la determinación, en dos ambientes de curado, de la expansión libre y restringida en la dirección axial de elementos tipo viga (probetas prismáticas) empleando el método ASTM correspondiente, valorando la influencia del porcentaje de aditivo, ambiente restricción u otros factores en el desarrollo de la expansión.
- Diseño de un dispositivo de ensayo que simule en laboratorio la configuración del sistema de refuerzo por confinamiento indirecto con encamisados prefabricados exteriores que permita evaluar, para los diferentes hormigones y encamisados exteriores a ensayar (Acero y CFRP), el grado de expansión y restricción en la dirección circunferencial desde el instante inicial de puesta en obra, verificando en tal caso la correlación existente con los resultados obtenidos mediante el método normativo ASTM C878.
- Selección, conforme a los resultados obtenidos, de una dosificación efectiva de HACE que venza la restricción y genere un régimen de expansiones permanente en el tiempo.
- Validación experimental, en elementos tipo probeta y pilar cilíndrico de hormigón armado, de los resultados de expansión obtenidos sobre probetas prismáticas y el dispositivo de ensayo propuesto, identificando aquellos factores que puedan influir en el desarrollo de la expansión.
- Evaluación de la efectividad mecánica de la solución de refuerzo propuesta basada en el confinamiento activo de pilares cilíndricos de hormigón mediante encamisados exteriores prefabricados y HACE de relleno frente a la técnica de refuerzo por confinamiento pasivo empleada habitualmente.

Entre las ventajas y beneficios esperables si se utiliza un hormigón autocompactante expansivo pretensado químicamente podemos citar:

- La característica de autocompactabilidad del HACE permitirá asegurar el correcto llenado del encofrado (encamisado) de refuerzo, incluso procediendo a su inyección desde la zona inferior del pilar
- El carácter expansivo de los HACE reducirá la formación de fisuras de contracción en el hormigón de relleno y, al compensar la pérdida de volumen por retracción, asegurará el contacto entre la camisa de refuerzo y el relleno, optimizando la condición estructural del sistema al garantizar una transmisión de esfuerzos uniforme del pilar al encamisado exterior de refuerzo.
- La existencia de una expansión controlada del hormigón de relleno desde el instante inicial de puesta en obra transformará un sistema de refuerzo pasivo, el cual solo actuaría en caso de que el pilar se deformara como consecuencia de las cargas o sobrecargas que sobre él actuaran, en uno activo al poner en carga la camisa de refuerzo desde el mismo inicio, obteniendo una mejor respuesta estructural del pilar reforzado tanto para las cargas actuantes en el momento de ejecución del refuerzo como para sobrecargas posteriores que pudieran darse por cambios de uso o colapso del pilar original.
- Se aumentará la capacidad de respuesta de la solución en todos los casos y no sólo en aquellos en los que se prevé un incremento de carga de la estructura.
- Como consecuencia de la Tesis, se dispondrá de la posibilidad de caracterizar los HACE a escala de laboratorio y extrapolar los resultados a escala real mediante ensayos sencillos y fácilmente reproducibles.

1.2 Novedades propuestas

El empleo de hormigones expansivos, de retracción compensada o pretensados químicamente, si bien es habitual en obra civil en regiones como China, Japón, América del Norte y parte del Sur, en Europa carece de difusión, aunque en los últimos años se comienza a emplear el denominado hormigón expansivo de retracción compensada.

En esta investigación se considera como aportación:

- El diseño y caracterización básica de la expansión de los hormigones expansivos relacionando métodos normativos y de diseño propio.
- El empleo de HACEs en el refuerzo de estructuras mediante sistemas de confinamiento indirecto de pilares, lo que permite un correcto llenado del espacio existente entre elemento a reforzar-encamisado prefabricado y una transmisión uniforme de tensiones del elemento reforzado a la camisa exterior desde el instante inicial de puesta en obra, constituyendo así un sistema de refuerzo activo que garantiza el trabajo conjunto como estructura mixta.

- El diseño y propuesta de un dispositivo de ensayo que permite simular a escala de laboratorio la configuración de sistemas de refuerzo por confinamiento indirecto o sistemas CFT (Concrete Filled Tube), sistema constructivo basado en tubos, de acero generalmente, rellenos de hormigón. Este dispositivo proporciona un registro de las deformaciones que el hormigón expansivo induce en el encamisado exterior (refuerzo o encofrado perdido) desde el instante inicial de puesta en obra e independiente del tiempo de fraguado del mismo (momento en el que comienzan a desarrollarse las expansiones).

En la actualidad, los métodos empleados para registrar la expansión toman como medida de referencia la longitud de la probeta tras el desmolde de la misma (así se hace en esta investigación donde se emplea el ensayo ASTM C878). El tiempo de desmolde suele aproximarse al fraguado del hormigón, pero en determinadas ocasiones pueden perderse datos iniciales de deformaciones que impidan el cómputo correcto de la contribución total de las mismas, ya que el tiempo de fraguado puede verse afectado por otros factores como la temperatura ambiental, tipo de curado y composición de la mezcla entre otros.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Refuerzo y reparación de estructuras. Sistemas de confinamiento

2.1.1 Introducción

La reparación, refuerzo o mejora de las infraestructuras existentes de ingeniería civil ha cobrado gran importancia durante las últimas décadas. El deterioro de los tableros de puente, vigas, pilares, edificios, estructuras de aparcamiento y otros elementos puede atribuirse a la edad, degradación ambiental, deficiencias en la fase diseño o de construcción, falta de mantenimiento o bien a eventos accidentales como terremotos. La intervención sobre estructuras por el incremento del deterioro generalmente se combina con la necesidad de mejora de las estructuras existentes debido a requerimientos de diseño cada vez más exigentes.

Los pilares de hormigón son usados en edificios, puentes y otras estructuras para soportar principalmente tensiones de compresión axial aunque también deben resistir esfuerzos a flexión y cortante. Generalmente llevan embebidos una armadura longitudinal y transversal, contribuyendo la armadura longitudinal a mejorar la resistencia axial y a flexión, mientras que el armado transversal mejora el comportamiento a cortante previniendo o retrasando el pandeo de la armadura longitudinal a compresión, confinando, además, el hormigón consiguiéndose así una mejora de la resistencia y ductilidad del mismo.

El refuerzo o reparación de pilares de hormigón se realiza a través del confinamiento, técnica de refuerzo que se aplica, en general, a elementos estructurales sometidos a compresión con objeto de mejorar significativamente el rendimiento bajo carga axial, flexión y cizallamiento, como consecuencia de un aumento en la resistencia a compresión del hormigón, de la ductilidad, la resistencia al corte y la resistencia al pandeo de la armadura de acero en compresión.

El confinamiento de columnas se consigue por medio de refuerzo lateral interno (cercos o estribos cerrados) o por refuerzo externo (encamisados de hormigón, acero o FRP)¹.

Los principales objetivos del confinamiento son:

- Mejorar la capacidad resistente y de deformación del hormigón.
- Proporcionar soporte lateral a la armadura longitudinal, mejorando la respuesta frente al pandeo local.
- Evitar el desprendimiento del recubrimiento del hormigón.
- Aumentar la efectividad del refuerzo en las zonas de conexión y solape de armaduras.

Las técnicas tradicionales de confinamiento se basan en encamisados exteriores de hormigón o acero que se aplican junto con nuevas técnicas de refuerzo como el confinamiento por

encamisados de FRP o sistemas Concrete Filled Tube (encofrados perdidos o tubos de acero o FRP rellenos de hormigón).

Actualmente, la aplicación de sistemas de confinamiento por encamisados exteriores pretende corregir o dar solución a los siguientes problemas:

- Pilares de estructuras de nueva construcción que están fuera de los márgenes de seguridad debido a defectos de construcción o diseño. Estos casos, aunque no son muy frecuentes, han de ser tratados teniendo en cuenta la necesidad de preservar la forma y el tamaño de la columna sin alterar el uso funcional de la estructura y, al mismo tiempo, sin comprometer la integridad estructural y la seguridad de la estructura.
- La necesidad de considerar cargas adicionales en columnas debido a cambios de uso o por exigencias normativas.
- Degradación de estructuras antiguas debido al deterioro del hormigón, la corrosión de las armaduras de acero de refuerzo o ambos, lo que conduce a la pérdida de capacidad portante de las columnas y la imposibilidad de soportar las cargas de diseño. Estas estructuras pueden ser tanto de valor histórico y monumental como parte del patrimonio o bien estructuras convencionales en las que simplemente el costo del refuerzo es inferior a las tareas de reparación, demolición y reconstrucción.
- Daños provocados por acciones accidentales o imprevistas como fuego, sismo o impacto de vehículos con una o más de las columnas de un parking o puente de autopista, que conduce a la reducción de la capacidad portante. En este caso, nos encontramos ante la elección entre la reparación y demolición, dependiendo esta decisión de la magnitud de los daños, y la eficacia de la técnica de refuerzo².

2.1.2 Encamisado o recredido de hormigón

2.1.2.1 Descripción de la técnica

El encamisado de hormigón o *concrete jacketing* es un refuerzo pasivo que consiste en la adición de una capa relativamente delgada (espesor mínimo de 100 mm) de hormigón armado a modo de encamisado que se coloca alrededor del pilar objeto de refuerzo, incrementando la resistencia a flexión, la ductilidad y la resistencia a cortante de este elemento constructivo. Aunque esta técnica haya tenido mayor difusión en el refuerzo de pilares de edificios que en el de puentes, también se pueden encontrar realizaciones en el refuerzo de pilares de puentes en Japón³.

La ejecución de este tipo de refuerzo se realiza como sigue; tras apuntalar el elemento objeto de refuerzo, se retira el hormigón en mal estado utilizando técnicas que no provoquen una mayor degradación del hormigón existente (el empleo del martillo neumático o eléctrico pueden producir micro fisuras) como son métodos basados en la proyección a presión de arena o agua.

Seguidamente se prepara la superficie y se coloca el armado nuevo anclando la armadura longitudinal del encamisado a la cimentación existente, teniendo la precaución de hacerlo con la longitud de anclaje suficiente que asegure que el refuerzo desarrolla la debida resistencia a flexión. Estas operaciones, destinadas a aumentar la resistencia, deben ir acompañadas de unas medidas

de refuerzo de la cimentación para incrementar la resistencia a flexión y cortante de ésta, de forma que se asegure que la rótula plástica se desarrolle en el pilar.

En el caso de forjados, la armadura longitudinal se pasa a través de taladros realizados en el forjado para mejorar la resistencia a la flexión. Sin embargo, si no se pretende aumentar la resistencia a flexión del pilar sino sólo mejorar la resistencia a cortante e incrementar la ductilidad del mismo esta última operación de pasar la armadura longitudinal a través del forjado no es necesaria siendo únicamente imprescindible la colocación de cercos en la zona cercana al forjado.

Por último se asegura que la armadura está dispuesta de forma uniforme y el armado transversal cuenta con el número necesario de estribos que garantizan el comportamiento monolítico del elemento bajo cargas cíclicas. Una vez comprobado esto y tras colocar un encofrado se realiza el vertido del hormigón garantizando el correcto llenado del espacio entre encofrado y pilar reforzado.



Figura 2.1 Vertido de hormigón - encamisados de hormigón armado⁴.

El confinamiento de pilares cilíndricos mediante encamisado de hormigón es relativamente sencillo de conseguir, gracias al uso de zunchos helicoidales o cercos dispuestos en todo el contorno del pilar (Figura 2.2.a). Sin embargo, en el caso de pilares de sección cuadrada o rectangular, a no ser que el encamisado este fabricado en forma elíptica o circular, alcanzar un confinamiento efectivo es complicado. Las barras longitudinales colocadas en la parte media de las caras son susceptibles de sufrir pandeo y únicamente el hormigón de las esquinas estará debidamente confinado. Esta situación puede mejorarse a través del chaflanado de las esquinas del pilar objeto de refuerzo y el uso de armaduras en espiral en el encamisado de hormigón dobladas a 45° que se alternan con un zunchado perimetral de forma helicoidal (Figura 2.2.b).

Por último, también se pueden añadir armaduras pasantes como elementos de unión, aunque estas requieren la realización de taladros en el núcleo del pilar de hormigón y el posterior doblado de dichas armaduras, lo cual puede encarecer las operaciones de refuerzo.

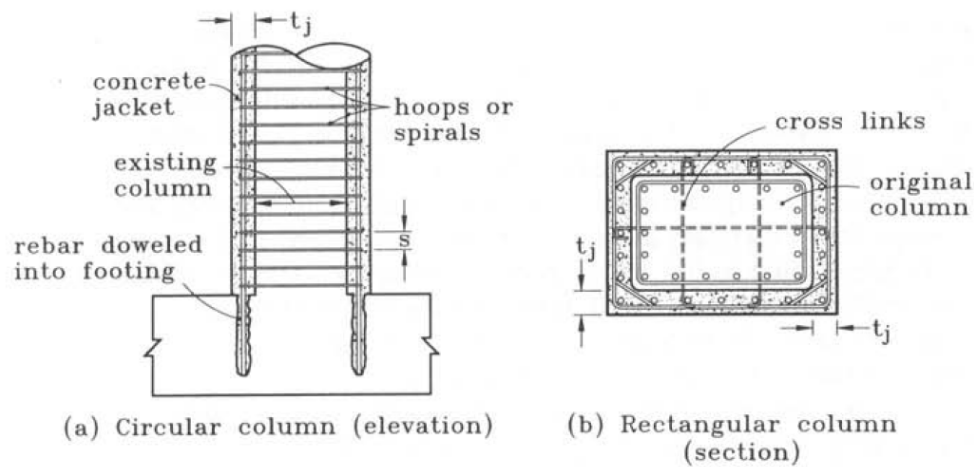


Figura 2.2 Esquema del refuerzo de pilares mediante encamisados de hormigón armado³.

La tipología de refuerzo por encamisados de hormigón también puede ser aplicada a partir de elementos prefabricados, siendo su empleo adecuado por tres razones: En primer lugar, en refuerzo de elementos bajo el agua, donde permite la colocación de paneles prefabricados sin necesidad de realizar operaciones de vaciado de agua. La segunda, es la construcción rápida en comparación con el recrecido in situ de hormigón reforzado. La tercera, el ahorro de costes cuando la estructura a reforzar está compuesta por pilares de morfología similar⁵.

La Figura 2.3 muestra la intervención realizada mediante encamisados prefabricados de hormigón en pilas de puente después del terremoto de 1995 en Kobe (Japón).



Figura 2.3 Esquema del refuerzo de pilares mediante encamisados prefabricados de hormigón armado⁵.

2.1.2.2 Ventajas e inconvenientes

Las ventajas e inconvenientes de la técnica de refuerzo o reparación por confinamiento mediante encamisados o recrecidos de hormigón son las que siguen:

Ventajas⁶:

- Incrementa la resistencia a compresión y flexión del elemento reforzado a través del nuevo encamisado de hormigón armado.
- Se consigue un incremento general y uniforme de la rigidez de la estructura
- Estable en elementos en contacto con agua o ambientes marinos.
- No requiere mano de obra especializada.

Inconvenientes⁶:

- El espesor mínimo del encamisado de hormigón debe ser de 100 mm. lo que incrementa la sección del elemento reforzado y disminuye el espacio útil.
- Se incrementa el peso propio de la estructura reforzada ya que se añaden elementos como hormigón y acero.
- Requiere la realización de taladros en la estructura existente (cimentaciones, losas, vigas y pilares) para la colocación y anclaje de la nueva armadura.
- La velocidad de colocación es lenta.
- Las operaciones de refuerzo no se pueden realizar sin afectar el normal funcionamiento de la estructura.

2.1.2.3 Estudios realizados

A continuación se reflejan varias de las investigaciones llevadas a cabo durante los últimos años en este campo:

- 2011, Hamidreza Nasersaeed⁷, basándose en investigaciones previas, ofrecen una serie de soluciones para mejorar el refuerzo de pilares mediante encamisados de hormigón armado.
- 2009, Meda, Plizzari, Rinaldi Martinola⁸, muestran una investigación basada en encamisados de hormigón sobre pilares de sección prismática sometidos a carga axial concéntrica, que presenta la novedad de utilización, para el encamisado, de un hormigón reforzado con fibras metálicas, manifestando el pilar objeto de ensayo (de sección cuadrada de 300 x 300 mm) un comportamiento a carga axial concéntrica muy similar al que presentan los pilares con encamisado convencional de hormigón armado

-
- 2006, Vadoros y Dritsos⁹, llevan a cabo una investigación que evalúa la efectividad del refuerzo por encamisados de hormigón colocados hasta la parte media del pilar. Se ensayan tres configuraciones de refuerzo y 5 pilares cuadrados de 250 x 250 x 1800 mm sometidos a carga cíclica para simular las condiciones de sismo comprobándose que el refuerzo mejora la rigidez y la resistencia del pilar demostrándose que, en determinadas circunstancias, puede alcanzarse un comportamiento monolítico.
 - 2003, Júlio, Branco y Silva, presentan una serie de trabajos en los que se intenta aportar otro punto de vista de una de las técnicas de refuerzo más extendida como es el refuerzo por encamisado exterior de hormigón, realizando una serie de recomendaciones basadas en el estudio en sí y en la experiencia previa¹⁰. En 2005 analizan la influencia del tratamiento de la interfase en el comportamiento estructural de pilares de sección cuadrada de dimensiones 200 x 200 x 1350 mm sometidos a carga monotónica y reforzados con encamisados de hormigón armado de una altura de 900 mm que se encuentran anclados a la cimentación. Como resultado obtienen que es posible alcanzar un comportamiento monolítico incluso sin realizar tratamientos específicos de la interfase¹¹. Por último, en 2008, presentan un estudio experimental que analiza sobre 7 pilares prismáticos de 200 x 200 x 1350 mm la influencia del tratamiento superficial en los encamisados de hormigón, de manera que frente a cargas de sismo, se identifique qué papel juega en el incremento del momento flector último de los pilares reforzados¹².
 - 2002, Hilmi Coskun¹³, presenta una Tesis en la que investiga la influencia de un encamisado de hormigón autocompactante de alta resistencia reforzado con fibras cuando se emplea en el refuerzo de pilares. Como resultado obtiene que este tipo de encamisados aumenta el momento a flexión del pilar reforzado y la capacidad de carga axial en 1,5 veces la capacidad original del pilar.
 - 1994, Rodríguez y Park¹⁴, investigan la eficacia del refuerzo por encamisado de hormigón sobre 4 pilares sometidos a carga de sismo. Para ello 2 pilares se ensayan, reparan y refuerzan con encamisados de hormigón y se vuelven a ensayar. Como resultado obtienen que el encamisado de hormigón mejora el comportamiento resistente y dúctil de los pilares reforzados si se comparan con los pilares sin refuerzo.
 - 1988, Bett, Klingner y Jirsa¹⁵, estudian experimentalmente la eficacia como refuerzo de encamisados exteriores de hormigón. Para ello se ensayan 4 pilares cortos cuadrados de 300 x 300 x 920 mm sometidos a carga axial y carga lateral cíclica, siendo 2 pilares reforzados antes del ensayo y 1 reparado tras dicho ensayo. Como resultado los pilares con encamisado, tanto los reforzados como el reparado, muestran un comportamiento resistente y de rigidez comparable entre ellos que mejora el comportamiento del pilar sin refuerzo.

2.1.3 Encamisado metálico

2.1.3.1 Descripción de la técnica

Esta técnica de refuerzo pasivo se diseñó en un principio para pilares de sección circular. Se basa en la colocación de dos medias camisas de acero laminado que poseen un radio superior al del pilar que refuerzan, ambas camisas se colocan en la zona a reforzar y se unen por un cordón vertical de soldadura realizado in situ consiguiéndose de esta manera un tubo continuo equidistante del pilar. En este sistema de refuerzo quedan un espacio intermedio entre la camisa y el pilar que se rellena con mortero de cemento.

Normalmente, el encamisado metálico se coloca dejando un espacio de aproximadamente 5 cm entre los elementos que conecta (cimentación o forjados) para evitar la posibilidad de que la camisa trabaje como un refuerzo a compresión. Esto es para evitar un incremento excesivo de la resistencia a flexión en la región de formación de rotula plástica, que puede resultar en un incremento de momentos y cortantes en la cimentación y las vigas como respuesta al sismo³.

El encamisado es efectivo como refuerzo pasivo. La presión de confinamiento se manifiesta cuando la expansión lateral, que se produce como consecuencia de las deformaciones a compresión en la dirección axial, es restringida por efecto del encamisado exterior de acero. El nivel de confinamiento depende de la resistencia de los anclajes y de la rigidez de encamisado de acero.

Una respuesta similar tiene lugar en el caso del pilar sometido a deformaciones laterales asociadas con el desarrollo de fisuras diagonales a cortante. En ambos casos el encamisado puede considerarse como un refuerzo continuo por zunchado perimetral. A continuación se muestra la configuración del encamisado metálico.

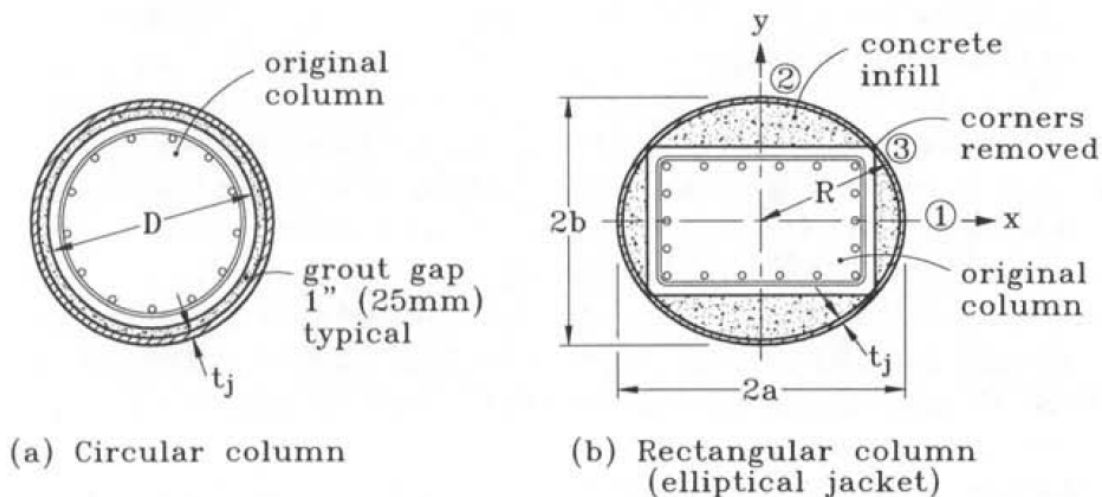


Figura 2.4 Esquema del refuerzo de pilares mediante encamisados de acero³.

Para pilares de sección cuadrada o rectangular la práctica de refuerzo recomendada se basa en camisas elípticas que proporcionan una acción de confinamiento continuo similar al de los pilares cilíndricos pero con una presión de confinamiento que varía en torno de la elipse debido a que la curvatura de la camisa cambia continuamente. En este caso al igual que ocurría con las camisas cilíndricas el espacio interior también se rellena con un mortero de cemento.

No se recomienda el encamisado de pilares cuadrados mediante camisas de acero cuadradas. Aunque puede esperarse que sea totalmente efectivo para incrementar la resistencia a cortante, un pilar reforzado a cortante también requiere un incremento de la ductilidad a flexión, la cual no será proporcionada por la camisa de acero salvo en las esquinas, donde habrá una pequeña restricción a la deformación lateral del núcleo confinado por flexión del encamisado. Por tanto, es poco probable que el confinamiento sea efectivo para aumentar la capacidad de deformación a compresión o mejorar la respuesta ante la falta de longitud de solape o anclaje. Los ensayos sobre camisas rectangulares de acero rigidizadas muestran ser menos efectivas que los encamisados elípticos¹⁶.

En Japón¹⁷, se han utilizado encamisados metálicos rectangulares que unidos con resina epoxi a las zonas de pilares con deficiencias de armado aumentan localmente la capacidad a flexión y cortante de dichos pilares. Asegurando que una acción inelástica tiene lugar en rótula plástica en la base del pilar.

Los encamisados metálicos se han usado ampliamente en California (Figura 2.5), siendo la técnica empleada en el refuerzo de cientos de pilares de puentes antes del año 1994. Como dato que refrenda la capacidad de refuerzo de esta técnica cabe decir que durante el terremoto de Northridge, donde unos 50 puentes estuvieron sometidos a picos de aceleración de 0,3g o superior ninguno de estos puentes sufrió daños en sus pilares que necesitaran una actuación de refuerzo posterior⁵.



Figura 2.5 Pilares reparados mediante encamisados metálicos en Los Ángeles y San Francisco⁵.

2.1.3.2 Ventajas e inconvenientes

Las ventajas e inconvenientes de la técnica de refuerzo o reparación por confinamiento mediante encamisados metálicos son las que siguen:

Ventajas⁶:

- Incrementa la resistencia del elemento reforzado a través del nuevo encamisado de hormigón armado.
- Se consigue un incremento general y uniforme de la rigidez de la estructura.

Inconvenientes⁶:

- Es un método de confinamiento pasivo.
- La calidad del acero disminuye con el paso del tiempo al estar sometido a condiciones de carga y acciones ambientales durante largos periodos de tiempo.
- En ocasiones, debido a su alto módulo de elasticidad, absorbe gran parte de la carga que soporta el pilar, lo que se traduce en un pandeo local del acero.
- Es muy vulnerable a los procesos de corrosión, por ello se prescinde de su uso en pilares situados en zonas como ríos, lagos o el mar.
- Se incrementa el peso propio de la estructura reforzada ya que se añaden elementos como hormigón y acero.
- Requiere mano de obra especializada, sobre todo en lo concerniente a la realización del cordón de soldadura.

2.1.3.3 Estudios realizados

A continuación se reflejan varias de las investigaciones llevadas a cabo durante los últimos años en este campo:

- 2010, Choi, Chung, Park y Cho¹⁸, proponen un nuevo método de refuerzo de columnas de hormigón por encamisados de acero sin interposición de mortero. Las investigaciones se realizan sobre probetas cilíndricas de 150 x 300 mm y 4 pilares cilíndricos de 400 x 1100 mm, con aplicación de presión externa en varias de ellas. Se comprueba que con el método propuesto la ductilidad y resistencia aumenta, presentando la ventaja de no aumentar la sección, no utilizar elementos de unión (resinas) y permitir la colocación en distintas zonas del pilar.

-
- 2008, Choi y Kim¹⁹, realizan un estudio sobre probetas cilíndricas de hormigón de 150 x 300 mm sometidas a carga axial reforzadas con encamisados metálicos con elementos de empalme en las uniones del encamisado. Se demuestra un aumento de la resistencia y ductilidad de las probetas reforzadas así como la reducción del efecto de confinamiento si se interpone un adhesivo entre encamisado y probeta.
 - 2005, Wang, Kikuchi, M Kuroki²⁰, realizan un estudio experimental sobre 10 pilares de hormigón prismáticos de 210 x 245 x 1170 mm reforzados con encamisados exteriores de acero cilíndricos que tiene por objeto investigar la influencia del grosor de la camisa en el comportamiento ante sismo. Los pilares se ensayan bajo carga axial y esfuerzos cíclicos horizontales. Como resultado se establece que, ante cargas axiales medias, la acción de refuerzo es independiente del espesor, pero, para cargas altas, el aumento de espesor mejora la respuesta resistente.
 - 2003, Xiao, Asce, y Wu²¹, introducen una nueva metodología de refuerzo de pilares de hormigón de sección cuadrada y cilíndrica por encamisados de acero mejorando la resistencia y la ductilidad. Para ello sobre 5 pilares de sección cuadrada de 254 x 254 x 1016 mm, se realiza un encamisado de acero que se rigidiza a través de unos elementos que aportan un confinamiento adicional. Como resultado se consigue, no solo prevenir la rotura frágil por cortante, sino también, aumentar la ductilidad de una manera notable.
 - 2002, Khair Al-Deen Isam Bsisu²², investiga la eficacia de la técnica de refuerzo basada en encamisados de acero y su procedimiento de diseño para pilares prismáticos sometidos a carga axial concéntrica estableciendo un procedimiento de verificación teórico-experimental que permita desarrollar esta técnica de forma fácil y segura. Para ello se ensayan 20 pilares cuadrados de 100 x 100 x 750 mm y camisa exterior de 120 x 120 x 730 mm obteniendo como resultado que el encamisado aumenta la resistencia y ductilidad del pilar original.
 - 1999, Aboutaha, Engelhardt, Jirsa, y Kreger²³, realizan una investigación experimental en la que se evalúa, sobre 11 pilares prismáticos, la eficacia del refuerzo de varios tipos de encamisados de acero con mortero intermedio en la mejora de la ductilidad y resistencia de columnas con una resistencia a cortante deficiente. Finalmente el encamisado exterior por acero se muestra como una técnica de refuerzo eficaz para los elementos ensayados.
 - 1994, Priestley, Seible, Xiao, y Verma²⁴, llevan a cabo dos líneas de trabajo, una con 7 pilares cilíndricos susceptibles de fallo a cortante reforzados con encamisado metálico cilíndrico y otra sobre 7 pilares de sección cuadrada reforzados con encamisado metálico elíptico. En ambas se corrobora la efectividad del refuerzo a la hora de incrementar la resistencia al corte y la ductilidad a flexión.
 - 1991, Chai, Y H, Priestley, MJN Seible²⁵, realizan una investigación sobre 6 pilares cilíndricos de hormigón de 3658 x 610 mm en los que se coloca un encamisado metálico con mortero intermedio en la región de rotula plástica. Los resultados muestran que lo pilares reforzados poseen ductilidades tan altas como las recomendadas por los códigos actuales e inhiben el fallo en la zona de rotula plástica.

2.1.4 Encamisados de materiales compuestos

2.1.4.1 Descripción de la técnica

Durante los últimos años los materiales compuestos en forma de fibras embebidas en una matriz polimérica (Fiber Reinforced Polymers - FRPs) se han mostrado como una alternativa muy interesante en el campo del refuerzo de estructuras de hormigón, complementando o sustituyendo las técnicas tradicionales basadas en recrecidos de hormigón o encamisados de acero.

Los materiales FRP son materiales compuestos que consisten en fibras resistentes no metálicas, delgadas, continuas, y orientadas en una o varias direcciones embebidas en una matriz de resina. Las fibras proporcionan la resistencia y rigidez del material compuesto y soportan la mayor parte de las cargas actuantes mientras que la matriz de resina, además de unir las fibras desempeña la función de transferir y distribuir la tensión al resto de las fibras, mediante esfuerzos de corte, protegiéndolas del medio. Las fibras más comunes son de carbono, vidrio y aramida y las matrices más usadas son epoxis, poliésteres, vinilésteres y fenólicas²⁶.

Los materiales compuestos destinados al refuerzo de estructuras civiles y de edificación se presentan disponibles en forma de:

- Láminas de fibras delgadas, con un espesor aproximado de 1 mm, orientadas en una dirección y fabricadas por pultrusión. El contenido de fibras de las láminas es del orden del 50-70% en volumen.
- Mallas o tejidos flexibles compuestos de fibras entrelazadas en al menos una o dos direcciones, que en ocasiones se pre impregnan con resina. El contenido de fibras de las mallas es del orden del 25-35% en volumen¹.

De forma general, la técnica de refuerzo de confinamiento de pilares mediante FRPs se basa en la aplicación de una malla de fibra, con una relación resistencia/peso alta, que envuelve (wrapping), generalmente en toda su altura, el pilar objeto de refuerzo cuya superficie se prepara (desbaste, alisado, sellado de fisuras y limpieza) previamente. Estas mallas impregnadas con resina se colocan alrededor del pilar de forma que las fibras queden orientadas en la dirección perpendicular al eje longitudinal del pilar, y se adhieren al mismo por imprimación con una resina epoxi, proporcionando un sistema de confinamiento pasivo que incrementa tanto la resistencia a compresión y cortante como la ductilidad.

Los sistemas de aplicación basados en la técnica de refuerzo por encamisados de FRPs son varios y están condicionados por factores como la forma, localización y número de elementos a reforzar. A continuación se definen los sistemas de refuerzo más utilizados en pilares sistemas:

- **Sistemas Wet lay-up:** técnica que tiene un uso más extendido, consiste en láminas de fibra unidireccional o tejidos que se suministran secos o con una pequeña cantidad de resina (insuficiente para producir la polimerización) que se impregnan con un agente adhesivo (resina) y colocan alrededor (wrapping) del pilar envolviéndolo con las fibras orientadas en la dirección radial.

Esta operación se realiza con la superficie del hormigón saturada por la resina, bien por aplicación de una lámina de FRP sobre la resina que ha sido aplicada previa y uniformemente sobre la superficie del hormigón, o bien, por aplicación de la lámina, saturada previamente, sobre la superficie sellada de hormigón.

El encamisado de resina puede ejecutarse de forma continua rodeando total o parcialmente el pilar, usando camisas dispuestas en espiral o en distintas secciones. También admite la aplicación de varias capas (del mismo o distinto material) obteniéndose distintos espesores en función de la resistencia requerida por el elemento reforzado¹.

- **Sistemas de encamisados FRP prefabricados:** consiste en láminas o camisas de FRP (espesor 1,0-1,5 mm) fabricadas bajo condiciones controladas cuya forma, resistencia y rigidez son las del producto final. La aplicación y curado de la resina se efectúa de forma previa a la colocación en obra por lo que en esta ocasión el agente responsable de la adherencia solo tiene la misión de unir el elemento de refuerzo y la camisa prefabricada. Estos encamisados consisten en medios tubos o cilindros con solape que pueden colocarse fácilmente alrededor del pilar¹.



Figura 2.6 Técnica de refuerzo basada en encamisados prefabricados¹.

- **Bobinado automático:** Técnica desarrollada por primera vez en Japón a principio de los años 90 y que posteriormente se extendió a Estados Unidos. En ella a través de un robot y con un ligero ángulo, se realiza, un bobinado automático con la fibra húmeda. La principal ventaja del empleo de esta técnica, aparte de un buen control de calidad, es la rapidez de instalación, es una técnica recomendable cuando el número de pilares a reforzar es elevado¹.

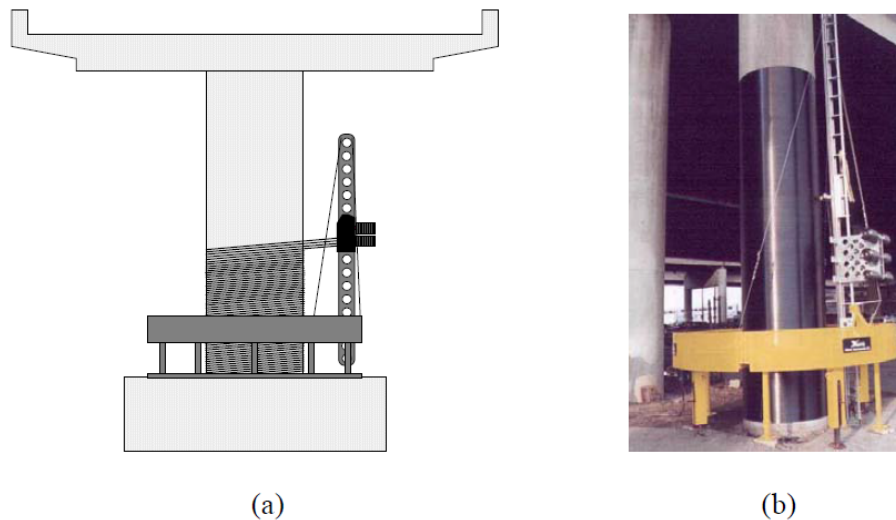


Figura 2.7 a) esquema de refuerzo de bobinado automático, b) Robot de bobinado automático¹.

El hormigón confinado con materiales compuestos se comporta de forma distinta que el hormigón confinado con acero²⁷, ya que el fallo en materiales FRP se produce a deformaciones axiales y radiales superiores a las del hormigón con encamisados metálicos. La Figura 2.8 muestra la diferencia de comportamiento mecánico de los FRP unidireccionales y el acero de tal forma que, al ejercer una carga axial constante sobre el hormigón, llega un punto en el que el acero alcanza su límite elástico, ejerciendo, a partir de este punto, un presión lateral de confinamiento constante, mientras que los FRP aplican una presión de confinamiento que aumenta de forma continua con la deformación.

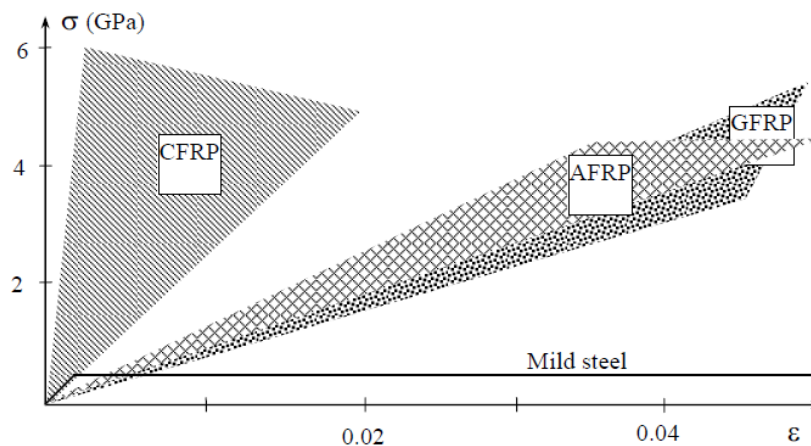


Figura 2.8 Diagrama tensión-deformación, para diferentes FRPs de carácter unidireccional y el acero. CFRP= FRP carbono, AFRP= FRP de aramida, GFRP= FRP de vidrio¹.

La magnitud de la acción de confinamiento dependerá de la deformación transversal del hormigón, la cual, a su vez, está afectada por la presión de confinamiento.

La mejora de la propiedades mecánicas depende de varios parámetros como son: la resistencia del hormigón, el tipo de fibras y resina, el porcentaje y orientación de las fibras que componen la camisa de refuerzo, el grosor de la camisa, la adherencia en la interface camisa-pilar y sobre todo

la relación de aspecto y de la forma de la sección transversal del pilar objeto de refuerzo^{28,29} siendo más efectiva la sección circular³⁰.

Los encamisados de FRP son muy efectivos aplicados en elementos de sección circular³¹ ya que proporcionan una presión circunferencial de confinamiento uniforme a la expansión radial del elemento a compresión cuando las fibras están alineadas en la dirección perpendicular al eje axial del pilar objeto de refuerzo^{32,33,34,35,36,37}.

Sin embargo, en pilares de sección no circular³¹, el refuerzo por encamisados de FRP es menos efectivo debido a que la acción de confinamiento se localiza sobre todo en las esquinas, lo que requiere un redondeo (radio de aproximadamente 15 a 25 mm) de estas, previo a la aplicación del encamisado y un aumento significativo del espesor del encamisado en esta zona para contener la dilatación lateral y el pandeo de la armadura longitudinal. Son varios los estudios que demuestran que los encamisados de FRP aplicados a secciones prismáticas incrementan de forma marginal el valor de resistencia máxima a compresión del pilar objeto de refuerzo^{32,33,34,38,39}.

Un enfoque alternativo, y utilizado, consiste en modificar la forma de la columna mediante la aplicación de un encamisado exterior circular o elíptico relleno de hormigón que encierra la columna de sección prismática en su interior (refuerzo indirecto) aprovechando de esta manera la morfología de refuerzo por encamisado exterior que mejor resultado aporta.

De forma general, si lo que se busca es un incremento de la resistencia a compresión del elemento a reforzar las fibras más utilizadas son las de carbono y si lo que se busca es un aumento de la ductilidad se utilizan refuerzos consistentes en aramida o fibra de vidrio.

2.1.4.2 Ventajas e inconvenientes

Las ventajas e inconvenientes de la técnica de refuerzo o reparación por confinamiento mediante encamisados FRPs son las que siguen:

Ventajas⁶

- El peso de este tipo de materiales es muy bajo comparado con el acero (1/4 del peso del acero).
- Los FRP basados en carbono manifiestan una resistencia a la corrosión muy buena, lo que hace muy adecuado su uso en zonas cercanas a la costa (ambientes marinos).
- Facilidad de aplicación, suponiendo una alternativa eficaz y económica de refuerzo de estructuras existentes.
- Prescinde de la necesidad de andamiajes y reduce los costes de ejecución.
- Resistencia a la tracción muy elevada.
- Alto módulo de los FRPs que les permite adaptarse a los requisitos de diseño.
- Gran capacidad de deformación.

- Gran adaptabilidad al poder fabricarse FRP de prácticamente cualquier forma y dimensión.
- Las dimensiones, forma y peso propio de los pilares reforzados no sufren apenas cambios.
- Permite realizar las operaciones de refuerzo sin afectar, de forma general, al normal funcionamiento de la estructura.
- Previenen el deterioro del hormigón y la armadura a la que protegen.

Inconvenientes⁶

- Menor ductilidad, los materiales compuestos son elásticos lineales hasta el fallo, no presentando un periodo de fluencia o deformación plástica.
- El coste unitario de los materiales compuestos es varias veces superior al del acero. Sin embargo, al comparar las propiedades resistentes este factor no es tan desfavorable.
- Algunos materiales compuestos, como por ejemplo los basados en carbono o aramidas, presentan unos coeficientes de expansión térmica muy diferentes a los del hormigón.
- La exposición a elevadas temperaturas puede causar la degradación y colapso del material compuesto, por degradación de la matriz. Como ejemplo decir que algunas resinas epoxi comienzan a reblandecerse a partir de los 70°C.
- Baja resistencia al impacto. Son vulnerables a daños mecánicos y por vandalismo.

2.1.4.3 Estudios realizados

A continuación se reflejan varias de las investigaciones llevadas a cabo durante los últimos años en este campo:

- 2011, Muhammd Hadi⁴⁰, analiza la efectividad de los refuerzos por encamisado de FRP (carbono y kevlar) y de acero galvanizado, aplicados sobre probetas cilíndricas de hormigón de alta resistencia bajo unas condiciones de carga concretas. Se estudian 5 probetas reforzadas de 205x910 mm bajo carga concéntrica y 6 probetas reforzadas de 205 x 920 mm bajo carga excéntrica. En todos los casos se consigue una mejora de las propiedades mecánicas, siendo los refuerzos basados en carbono y kevlar los que mejor comportamiento presentan.
- 2010, Aire, Gettu, Casas y Marques⁴¹, presentan los resultados de un estudio experimental y analítico del comportamiento de elementos de hormigón confinados con encamisados FRP de vidrio y carbono. Se ensayan probetas cilíndricas de hormigón de 150 x 300 mm (confinados y sin confinar) bajo compresión axial en dos niveles de resistencia: normal (30 MPa) y alta resistencia (70 MPa). En ambos casos, se evaluó el comportamiento tensión-deformación. Los resultados muestran que la resistencia y ductilidad se incrementan con el confinamiento por FRP.

- 2008, Colomb, Tobbi, Ferrier y Hamelin⁴², evalúan la eficiencia de dos configuraciones de refuerzo FRP (continuo y discontinuo), ante una carga a compresión permanente en combinación con una carga horizontal estática cíclica. Para ello ensayan 8 pilares prismáticos de 200 x 200 x 600 sin refuerzo transversal suficiente para asegurar de esta forma el fallo a cortante. Los resultados demuestran un cambio en la forma de fallo de los pilares reforzados y un aumento de la resistencia y la ductilidad.
- 2006, Jason Maximino⁴³, investiga el incremento de resistencia y modos de fallos habituales en el refuerzo de estructuras basados en encamisados FRP para posteriormente establecer unas recomendaciones técnicas. Para ello, se ensayan 94 probetas cilíndricas 180 x 500 mm con diferentes configuraciones de armado y refuerzo.
- 2006, Kotsovos, Zeris y Pavlovic⁴⁴, basándose en el refuerzo de pilares dañados mediante encamisados de FRP, realizan un estudio en el que se demuestra que este sistema de refuerzo es capaz de satisfacer los requerimientos de resistencia y ductilidad del Eurocódigo 8, incluso se pueden comparar con los valores obtenidos para pilares nuevos. Para obtener esta conclusión realizan el estudio sobre 8 probetas cilíndricas de 300 x 150 mm en grupos de 2, uno reforzado directamente y otro reforzado tras el fallo.
- 2005, Modarelli, Micelli, y Manni⁴⁵, evalúan la influencia de encamisados de FRP (carbono y vidrio) sobre pilares de hormigón armado huecos tanto cilíndricos como prismáticos. Para ello se ensayan bajo carga axial 124 probetas con y sin refuerzo analizando distintos parámetros como son la resistencia, forma y dimensiones de la probeta, números de capas de refuerzo, concluyendo que todas las probetas reforzadas experimentan un incremento de resistencia y ductilidad, siendo mayores estos valores cuando la sección de las probetas es cilíndrica.
- 2003, Xiao y Wu⁴⁶, estudian el comportamiento tensión-deformación bajo carga de compresión axial del hormigón confinado por varios tipos y espesores de encamisados de FRP (vidrio y carbono). El estudio evalúa la contribución resistente y dúctil de dichos encamisados sobre 253 probetas cilíndricas de 152 x 300 mm. Como resultado presenta un nuevo modelo para predecir el comportamiento bajo carga axial de elementos de hormigón reforzados por encamisados FRP
- 1997, Saadatmanesh, Ehsani, y Jin⁴⁷, investigan el comportamiento a flexión de 4 pilares (2 prismáticos de 368 x 241 x 1892mm y 2 cilíndricos de 305 x 1892 mm) que, tras ser llevados al fallo, se refuerzan con encamisados exteriores de FRP de carbono. Para ello someten al pilar original a cargas superiores a las soportadas durante un terremoto para que una vez se produzca el fallo reforzarlos con encamisados FRP. En el estudio queda patente la efectividad de la técnica de refuerzo, ya que, tanto la resistencia a flexión como la ductilidad de los pilares reforzados es superior a la de los pilares originales
- 1997, Xiao, Asce, and Wu⁴⁸, presentan un estudio teórico y experimental de la técnica de refuerzo, basada en camisas prefabricadas de GFRP (vidrio) de pilares cilíndricos de 610 x 2440 mm sometidos a condiciones de sismo. La investigación se lleva a cabo sobre 1 pilar sin refuerzo (el cual se refuerza tras el fallo) y 2 con refuerzo, demostrándose que la técnica de refuerzo incrementa la ductilidad de los pilares reforzados así como el comportamiento del sismo del pilar reparado.

2.1.5 Sistemas Concrete Filled Tube (CFT)

2.1.5.1 Descripción de la técnica

El sistema de ejecución de columnas mediante tubos de acero rellenos de hormigón (CFT) se ha hecho cada vez más popular en aplicaciones estructurales desde sus primeros usos puntuales en puentes y edificios a principios del siglo XX^{49,50}. En las últimas décadas, el uso de tubos de acero (CFTS)⁵¹ y tubos de FRP (CFFT)⁵² están siendo ampliamente utilizados, sobre manera en zonas de sismo, como elementos híbridos en estructuras de ingeniería civil y edificación tales como pilotes, columnas y vigas.

Este desarrollo en su utilización es en parte debido a sus excelentes propiedades estructurales como son la alta resistencia, alta ductilidad y una mayor capacidad de absorción de energía (menor degradación de la resistencia ante cargas cíclicas). La mejora en las propiedades estructurales se debe a la acción compuesta entre los elementos constituyentes. El confinamiento creado por la camisa exterior de acero mejora el comportamiento mecánico del hormigón al quedar sometido este a un estado de compresión triaxial. Por otro lado, el pandeo hacia el interior del tubo de acero es impedido por el núcleo de hormigón, lo que aumenta la estabilidad y resistencia de la columna como sistema⁵³.

La mejora de propiedades de los CFT se puede explicar en términos de la acción compuesta entre el tubo de acero y el núcleo de hormigón. En las primeras etapas de puesta en carga el coeficiente de Poisson del hormigón es menor que el del acero por lo que el tubo exterior de acero no tiene ningún efecto de confinamiento sobre el núcleo de hormigón. A medida que la deformación longitudinal aumenta, la expansión transversal del hormigón no confinado se hace gradualmente mayor que la del acero, desarrollándose en ese instante una presión radial en la interfase acero-hormigón. En esta etapa, el núcleo de hormigón queda sometido a un sistema de tensiones triaxial y el tubo de acero biaxial. Al existir una tensión circunferencial (es decir, el estado biaxial de tensiones), el tubo de acero no puede sostener la tensión de fluencia, por ello, hay una transferencia de carga desde el tubo hacia el núcleo de hormigón⁵⁴.

La carga soportada correspondiente a este modo de fallo puede ser considerablemente mayor que la suma de cargas de los materiales componentes camisa y núcleo de hormigón por separado. El aumento de la capacidad de carga de rotura causada por efecto de confinamiento del tubo de acero sobre el núcleo de hormigón depende de varios factores como son: el espesor del tubo de acero, relación de esbeltez, la excentricidad, la adherencia y la forma de la sección transversal. En el caso de columnas CFT circulares, el tubo de acero tiene un efecto de confinamiento más efectivo ya que la presión de confinamiento es uniforme en toda la sección. Sin embargo en secciones cuadradas existe una concentración de tensiones en el centro y las esquinas del pilar, lo que da lugar a un confinamiento ineficiente de los laterales de la sección reduciendo la sección total confinada de forma efectiva. Para mejorar la efectividad del confinamiento de encamisados de CFRP se plantea la modificación de la forma exterior del pilar mediante camisas prefabricadas exteriores de sección circular rellenas de hormigón⁵⁵.

Los beneficios estructurales mencionados de alta resistencia, alta ductilidad y aumento de rigidez requieren que la transferencia de esfuerzos entre el tubo, de acero o FRP, y el núcleo de hormigón sea la adecuada con el fin de garantizar la acción conjunta del sistema constructivo CFT. Para ello es indispensable asegurar una correcta adherencia entre los materiales componentes. En la práctica, para tubos de acero, esta adherencia y por tanto la transferencia efectiva de tensiones se entiende que se consigue mediante el uso de conectores interiores de

cizalladura, o bien, mediante el enlace natural entre acero y hormigón. Sin embargo, desde el punto de vista de la resistencia de la interfase y adherencia, no se suele tener en cuenta un fenómeno importante que es inherente a la naturaleza del propio hormigón como es la retracción. La retracción del núcleo de hormigón no solo puede inducir defectos estructurales graves sino también condicionar la durabilidad del propio hormigón al provocar, en los sistemas convencionales de CFT, la separación de los materiales constituyentes⁵⁶.

Los hormigones expansivos se presentan como una alternativa efectiva para solucionar esta problemática, ya que, la expansión del hormigón que constituye el núcleo queda restringida por el tubo exterior produciéndose un efecto de pretensado sobre dicho tubo como respuesta a la acción expansiva del hormigón que constituye el núcleo. De esta forma, el hormigón expansivo no solo compensa la retracción propia sino que además induce un sistema residual de tensiones a compresión en el hormigón y de tracción en el tubo exterior que garantiza la adherencia y la correcta transmisión de esfuerzos entre los materiales constituyentes del sistema CFT mejorando la solución constructiva al transformar un sistema de confinamiento pasivo en uno activo^{52,55}.

2.1.5.2 Ventajas e inconvenientes

Ventajas:

- Mejora de la capacidad mecánica del hormigón de partida bajo la condición de confinado, al presentar un incremento de la resistencia a compresión y flexión. Así mismo, la solución, aumenta la resistencia al corte, la ductilidad y la absorción de energía.
- Aumento de la carga crítica de pandeo debido a la mayor rigidez del conjunto, en el caso de tubos de acero, el pandeo localizado se retrasa y la pérdida de resistencia una vez producido el pandeo es moderada. Por otro lado, la resistencia del hormigón se incrementa debido al efecto de confinamiento proporcionado por el tubo exterior.
- La retracción de secado y fluencia es menor que en el caso de hormigones reforzados de forma convencional (armados).
- Eficiencia de la construcción: se aumenta la velocidad de la construcción al ser posible el uso de conexiones estandarizadas y al suprimir los trabajos de encofrado y colocación de barras de armado, facilitando esto el hormigonado mediante tubo Tremie o mediante bombeo. Esta eficiencia conduce hacia un sistema constructivo limpio que reduce mano de obra, costes de construcción y tiempos de ejecución del proyecto.
- Mejora de la durabilidad: el encamisado exterior protege al hormigón del núcleo del medio ambiente evitando así la corrosión de la armadura interior del hormigón, cuando ésta existe. Mientras que el núcleo de hormigón asegura una cierta resistencia frente al fuego.
- Ecología: disminución del ruido ambiental al disminuir las operaciones de puesta en obra y aumentar la rapidez de ejecución del elemento constructivo.

Inconvenientes:

- Es un método de confinamiento pasivo, si no se introduce una mezcla de hormigón expansivo.
- Incremento del coste de la mezcla de hormigón en caso de emplear la solución de hormigones expansivos.
- Las conexiones entre pilar y viga requieren diseños concretos lo que puede incrementar el coste de construcción.
- *Para camisas o tubos de acero*
 - La calidad del acero disminuye con el paso del tiempo al estar sometido a condiciones de carga y acciones ambientales durante largos periodos de tiempo.
 - El acero es muy vulnerable a los procesos de corrosión, por ello se prescinde de su uso en pilares situados en zonas como ríos, lagos o el mar.
- *Para camisas o tubos de FRP*
 - El coste unitario de los materiales compuestos es varias veces superior al del acero. Sin embargo, al comparar las propiedades resistentes este factor no es tan desfavorable.
 - La retracción del hormigón y el coeficiente de expansión térmica (muy diferente) que presentan algunos materiales compuestos como carbono o aramidas, puede generar problemas de falta de adherencia y transmisión de esfuerzos.
 - La exposición a elevadas temperaturas puede causar la degradación y colapso del material compuesto, por degradación de la matriz. Como ejemplo decir que algunas resinas epoxi comienzan a reblandecerse a partir de los 70°C.
 - Baja resistencia al impacto. Son vulnerables a daños mecánicos y por vandalismo.

2.1.5.3 Estudios realizados

A continuación se reflejan varias de las investigaciones llevadas a cabo durante los últimos años en este campo:

- 2012, Mohammad Moravvej, Mohammad Aghahassani y Mamdouh Elbadry⁵², investigan la influencia de adicionar cemento expansivo para incrementar la adherencia entre el hormigón y tubos cilíndricos de fibra de vidrio. Fabrican 24 tubos de distintos diámetro y longitudes rellenos con hormigón con y sin expansivo que ensayan bajo compresión en la dirección axial verificando un incremento considerable de la resistencia a compresión de los tubos que incorporan hormigón expansivo.

-
- 2011, Xu, Chen y Yuan⁵⁶, investigan el comportamiento expansivo y capacidad de transferencia de carga sobre 4 tubos de acero rellenos de hormigón expansivo y 3 con hormigón convencional. Los siete tubos con dimensiones de 160 x 600 mm. Los ensayos indican que la expansión del núcleo de hormigón mejora la adherencia entre este y el tubo de acero. Así mismo proponen un método para mejorar la adherencia en estructuras compuestas.
 - 2010, Muciaccia, Giussani, Rosati y Mola⁵⁷, presentan un estudio de tres hormigones, convencional, autocompactante y expansivo, para uso estructural en el relleno de tubos cilíndricos de acero de diámetro 139,6 mm y alturas entre 131,0 mm y 467,0 mm los cuales se ensayan a compresión bajo a carga excéntrica concluyendo que el comportamiento mecánico de columnas bajo carga axial excéntrica está gobernado por la interacción momento flector-carga axial y que la capacidad de carga axial de la columna es solo función de su geometría de la las propiedades mecánicas de los materiales.
 - En 2009, Xu, Huang, Jiang y Song⁵¹, investigan el comportamiento expansivo y de capacidad de transferencia de carga sobre 17 probetas de tubos de acero rellenos de hormigón pretensado químicamente (PCFST) y sobre 3 de tubos de acero rellenos con hormigón (CFST), demostrando que, el sistema PCFST tiene una mayor resistencia de adherencia.
 - 2006, Pantelides, Yan, y Reaveley⁵⁵, ensayan a compresión pilares sin armadura reforzados de forma directa con FRP y con la sección modificada por el uso combinado de camisas prefabricadas y hormigones expansivos. Obtienen como resultado que secciones cuadradas modificadas mediante encamisados de FRP y hormigón de cemento expansivo a columnas de sección circular muestran un incremento del valor de resistencia por tres y de ductilidad por dos. Las secciones cuadradas con refuerzo directo de FRP también presentan una mejora de la resistencia pero menor.

2.2 Hormigones expansivos

2.2.1 Introducción

El hormigón es un material compuesto que consiste esencialmente en una matriz de cemento hidráulico y agua que, una vez endurecida, aglutina otros componentes como son áridos, adiciones minerales y aditivos químicos. Las propiedades físicas, químicas y durables de este material dependen de numerosos factores tanto internos (materiales constituyentes, proporción de estos, distribución de la red porosa...) como externos (condiciones ambientales de curado)⁵⁸.

El hormigón de cemento portland es uno de los materiales de construcción más extendidos y ha encontrado aplicación en casi todos los tipos de estructura aunque es un material no exento de problemas. El fenómeno de retracción es una característica inherente al material, que si bien puede ser minimizada, siempre está presente⁵⁹.

Los diferentes tipos de retracción, atendiendo a los factores que la provocan y la edad en la que se manifieste, se clasifican en:

Los tipos de retracción son varios:

- *Retracción plástica:* contracción producida cuando el ratio de evaporación del agua superficial del hormigón, aún en estado plástico, es superior al ratio de agua exudada en superficie. La magnitud de esta contracción depende de la cantidad de agua perdida desde la superficie del hormigón lo que a su vez está condicionado por la temperatura, la humedad relativa del ambiente y la velocidad del viento.
- *Retracción endógena:* es la suma de las contribuciones debidas a la retracción química y la retracción por auto-deseccación. La retracción química se debe a que los productos de hidratación del cemento tienen un volumen menor que los anhidros y la retracción por auto-deseccación se debe al consumo del agua libre en los poros del hormigón por las propias reacciones de hidratación.
- *Retracción térmica:* durante las primeras etapas de hidratación del cemento, las reacciones exotérmicas producen un aumento de temperatura en el hormigón dando lugar a una dilatación del elemento. Una vez alcanzada la temperatura máxima, el elemento se enfría progresivamente hasta alcanzar la temperatura ambiental y, como consecuencia, el hormigón ya endurecido se contrae provocando deformaciones por retracción térmica estas deformaciones se hace más patente en hormigones con altos contenidos de cemento y/o elementos de grandes dimensiones donde la disipación de calor es lenta.
- *Retracción por carbonatación:* La carbonatación del cemento ya hidratado en contacto con el CO₂ del ambiente provoca una retracción del hormigón, si bien es una contracción de efecto limitado y superficial en hormigones de buena calidad⁶⁰.

Sin embargo, en el caso que nos ocupa la de mayor importancia e influencia es la retracción de secado.

La *retracción de secado* es una contracción volumétrica del hormigón ya endurecido generada por la evaporación del agua libre contenida en poros y capilares para alcanzar el equilibrio hídrico con el ambiente. No se incluyen en este tipo de retracción los cambios de volumen plásticos previos al fraguado, debidos a la evaporación del agua superficial procedente de la exudación del hormigón, o los cambios de volumen o longitud inducidos por la temperatura, cargas estructurales o reacciones químicas que corresponden a los tipos de retracción descritos anteriormente. En hormigones convencionales es el mecanismo de retracción más importante y el único que se considera en el cálculo estructural.

La magnitud de la retracción de secado que ocurre en las estructuras de hormigón depende de las características de los materiales componentes, de las proporciones de la mezcla, del curado, del ambiente de secado y de las restricciones. Al encontrarse la retracción por secado restringida por acción de la armadura, el roce con el sustrato u otras causas, pueden aparecer una serie de esfuerzos de tracción antes de que el hormigón desarrolle por completo su resistencia a la tracción lo que puede desembocar en la aparición de fisuras si estas tensiones superan la resistencia a tracción del hormigón⁶¹.

Por ello, y debido a que la retracción en combinación con otra propiedad inherente de este material como es la baja resistencia a la tracción que presenta, la aparición de fisuras de diferentes dimensiones se manifiesta en casi todas las estructuras de hormigón armado siendo el tamaño de estas fisuras y su distribución función de la magnitud de la retracción, grado de restricción y cantidad de refuerzo⁶¹.

Para permitir un uso más eficiente de los hormigones, el pretensado se presenta como la solución más eficaz para sobreponerse a estas debilidades. Manteniendo el hormigón en compresión la fisuración se puede prevenir.

El pretensado puede alcanzarse mediante la acción mecánica de técnicas y equipos sofisticados, pero existe otra forma de generar un pretensado en el hormigón, en este caso un pretensado de naturaleza química, y es mediante el uso de cementos expansivos basados en la formación de compuestos hidratados presentándose estos como una alternativa eficaz y factible a la hora de minimizar o anular el fenómeno de retracción⁵⁹.

Los cementos expansivos son cementos hidráulicos que al contrario que el cemento portland convencional expanden durante las primeras etapas de hidratación que siguen al fraguado generando unas tensiones a compresión en el seno del hormigón en la condición de restringido, que posteriormente se alivian por efecto de la retracción de secado, dando lugar a hormigones de retracción compensada y hormigones pretensados químicamente. Se hace evidente que para conseguir estas expansiones se hace necesario un control de calidad exhaustivo, algo que no es fácil de encontrar a pie de obra⁶².

2.2.2 Historia y evolución de los cementos expansivos

El desarrollo de hormigones basados en cementos o aditivos expansivos se originó a partir de las investigaciones sobre la Etringita presente en el cemento. Candlot⁶³ en 1890 estableció que la interacción en un medio acuoso de productos de aluminato tricálcico (C_3A) y sulfato cálcico daba como resultado la formación de una sal hidratada, un sulfoaluminato cálcico, referida en principio como "sal de Candlot" aunque posteriormente se denominó Etringita que es el nombre del mineral natural de misma composición y estructura.

Michaelis⁶⁴, en 1892, dio a conocer que la reacción del aluminato tricálcico del cemento portland y los sulfatos procedentes de aguas agresivas que daban como resultado la formación de Etringita era la responsable de los mecanismos de destrucción de los hormigones de cemento portland en presencia de ambientes con altos contenidos de sulfatos, denominando la “sal de Candlot” como “bacilo del cemento”.

Uno de los investigadores que antes se dio cuenta del potencial de la Etringita como elemento capaz de eliminar o contrarrestar la retracción e inducir tensiones a compresión en el hormigón fue el francés Henri Lossier⁶⁵. Su trabajo, que comenzó a mediados de los años 30 del siglo XX, se prolongó durante 20 años. Su cemento expansivo consistía en una mezcla de cemento portland, un componente expansivo y escoria de alto horno. El agente expansivo se obtenía de la molienda de yeso, bauxita y cal mezclado y calcinado en forma de clínker. La escoria se introducía para parar la expansión en el punto deseado. En una investigación posterior, en 1952, realizada por Lafuma⁶⁶ sobre el cemento de Lossier demostró que estaba compuesto de una mezcla de sulfato cálcico (C \bar{S}), aluminato cálcico (C₅A₃) y silicato dicálcico (C₂S). Como consecuencia Lafuma postuló que el proceso de fabricación del compuesto expansivo era accesorio ya que la Etringita podía desarrollarse durante la hidratación de una mezcla de cemento portland, anhidrita y yeso. Sin embargo el uso de este cemento expansivo fue más bien escaso debido a la dificultad que entrañaba el control de la expansión y a que la magnitud de las expansiones para producir tensiones eran insuficientes para fabricar elementos de hormigón pretensado de forma económica.

Las investigaciones realizadas en Rusia en el campo de los cementos y aditivos expansivos siguieron dos direcciones, una basada en la obtención de cementos expansivos para reparaciones e impermeabilización y otra fundamentadas en cementos pretensados (Self-Stressing cement). Mikhailov⁶⁷, en 1957, desarrollo un cemento para reparación basado en la molienda de cemento con altos contenidos de alúmina, yeso y aluminato tetracálcico hidratado, donde el material final, un hidroaluminato artificial, preparado por hidratación, secado y molienda de una mezcla de cemento con alto contenido de alúmina con cal aceleraba la formación de Etringita. El cemento pretensado resultaba de una mezcla de proporciones seleccionadas de cemento portland, cemento de alto contenido en alúmina y yeso, obteniéndose la expansión deseada a través del control del contenido de yeso y de las condiciones de curado.

En Estados Unidos la mayor investigación en el campo de los cementos expansivos fue llevada a cabo por Klein⁶⁸ y sus socios de la universidad de California en Berkeley. En esta investigación se emplearon mezclas similares a las utilizadas por Lossier, donde un clínker de sulfoaluminato cálcico, obtenido por tratamiento térmico a 1316°C, y escorias de alto horno se agregaban como adición a la masa de hormigón induciendo expansiones en hormigones convencionales. Aunque tanto las expansiones registradas, tanto restringidas como sin restricción, fueron insuficientes para lograr el efecto de pretensado del hormigón y el acero, la investigación dio lugar a una importante contribución ya que se identificó por difracción de rayos X la presencia de un compuesto estable que era el sulfoaluminato cálcico anhidro (CaO·Al₂O₃·SO₃) así como de los diferentes hidratos que de este se derivan. Este importante descubrimiento dio lugar a un mayor conocimiento teórico y práctico de la química de la reacción expansiva que permitió el desarrollo posterior de cementos expansivos capaces de dar lugar a hormigones pretensados químicamente en elementos estructurales.

Estudios posteriores llevado por diferentes autores, han sido realizados sobre cementos y hormigones expansivos mejorados analizando su comportamiento⁶⁹ (Klein, Karby y Polivka, 1961), la adherencia⁷⁰ (Polivka y Klein, 1961), la influencia de la temperatura de curado y la fluencia⁷¹ (Klein y Bertero, 1963).

En la actualidad son numerosas las aplicaciones de los hormigones de retracción compensada y El uso de los hormigones de retracción compensada o pretensados químicamente se da desde mediados de los años 19660, siendo desde entonces hasta la actualidad numerosas sus aplicaciones en pavimentos de autopistas y aeropuertos, tableros de puentes^{72, 73} (Gruner and Plain 1993; Ramey et al. 1999), estructuras hidráulicas, depósitos de tratamiento de aguas residuales, estructuras de contención⁷⁴ (Valentine 1994), estructuras postensionadas^{75, 76} (Hoffman 1980; Eskildsen et al. 2009), pavimentos y soleras de gran superficie carentes de juntas^{77, 78} (Keith et al. 2006; Bailey et al. 2001) obra civil y refuerzo de estructuras.

2.2.3 Cementos expansivos

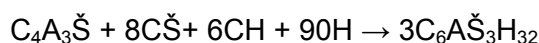
Los cementos expansivos son materiales hidráulicos que, a diferencia del cemento Portland convencional, producen un aumento significativo de volumen a edades tempranas de hidratación tras el fraguado del material. La elaboración de este tipo de cementos se lleva a cabo mediante métodos basados en la modificación del contenido y/o tipo de los productos de hidratación formados en la pasta de cemento, se puede dividir en dos grupos principales^{61,62}. Por un lado están los cementos expansivos que promueven la formación de Etringita (trisulfoaluminato cálcico hidratado, $C_6A_3\check{S}_3H_{32}$), compuesto hidratado que en un hormigón convencional supone menos del 15% del volumen de sólidos de la pasta de cemento⁷⁹ (Taylor, 1990).

Los cementos expansivos, en Estados Unidos, deben satisfacer los requisitos de la especificación ASTM C845⁸⁰, donde se les designan como cemento tipo E-1. En Europa, sin embargo, no existe normativa aplicable en el campo de los cementos expansivos que designe unos requisitos para su empleo en hormigones de retracción compensada o pretensados químicamente, por ello se recurre a la especificación americana.

Los cementos expansivos basados en la formación de Etringita más empleados en la actualidad son:

- cemento expansivo **Tipo K**

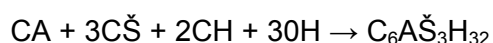
Originalmente desarrollado por Alexander Klein en los años 1960, es una mezcla de cemento portland, trialuminosulfato tetracálcico anhidro (C_4A_3S), sulfato cálcico ($CaSO_4$) y óxido de calcio sin combinar (cal, CaO); el C_4A_3S puede ser un constituyente separado molido conjuntamente con el clínker del cemento Portland o formarse simultáneamente durante el proceso de calcinación del clínker. La Etringita se forma mediante la siguiente reacción:



($SO_3 = \check{S}$)

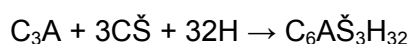
- cemento expansivo **Tipo M**

Consiste en una mezcla de cemento Portland, cemento de aluminato de calcio y sulfato cálcico en proporciones adecuadas, formándose Etringita según la siguiente reacción:



- cemento expansivo **Tipo S**

Se trata de cemento Portland con un elevado contenido de aluminato tricálcico (C_3A en aproximadamente un 20%) y una gran cantidad de sulfato cálcico, que forman Etringita a partir de la reacción:



El otro tipo de cemento expansivo, desarrollado más recientemente, es el denominado cemento **Tipo O**, inicialmente elaborado en Japón por la Onoda Cement Company, en este caso la acción expansiva no se debe a la formación de Etringita si no que la expansión del cemento Portland se produce a partir de CaO calcinado, favoreciendo la formación de hidróxido de calcio o portlandita, uno de los principales compuestos hidratados del cemento Portland, el cual constituye entre el 20-25% de la pasta hidratada de cemento convencional⁷⁹.

2.2.4 Aditivos expansivos

Los hormigones pretensados químicamente o de retracción compensada también se pueden producir mediante la adición conjunta de cemento Portland tipo CEM I (según UNE-EN 197-1)⁸¹ y un aditivo expansivo. Ambos materiales se deben mezclar en seco durante un tiempo determinado previo a la adición de los demás componentes del hormigón, de modo que se favorezca una correcta homogeneización de los mismos.

Los aditivos expansivos, de uso más extendido en Japón, son materiales que durante el periodo de hidratación del hormigón, se hidratan expandiéndose ellos mismos o bien reaccionan con otros constituyentes del cemento para causar dicha expansión. La tipología de los aditivos expansivos se recoge en la norma japonesa JIS A 6202⁸² donde se contemplan dos variantes; por un lado, se encuentran aquellos que mezclados con el cemento Portland y el agua promueven la formación de Etringita[61]:

- Aditivo expansivo **tipo K**: se trata de una mezcla de sulfoaluminato cálcico y sulfato cálcico.
- Aditivo expansivo **tipo M**: formado por cemento de aluminato de calcio y sulfato cálcico.
- Aditivo expansivo **tipo S**: compuesto por cemento de aluminato tricálcico (C_3A) y sulfato cálcico.

Por otro, los aditivos expansivos **Tipo G**, formados por una mezcla de óxido de calcio y óxido de aluminio, que mezclados con el cemento Portland y el agua generan fundamentalmente la formación de hidróxido de calcio cristalino (Portlandita) y, en menor medida, también podrían favorecer la formación de geles de silicatos cálcicos hidratados (geles C-S-H), compuesto hidratado mayoritario de las pastas de cemento Portland.

La Figura 2.9 muestra un diagrama ternario donde aparecen los tres componentes básicos que conforman los aditivos expansivos más desarrollados comercialmente.

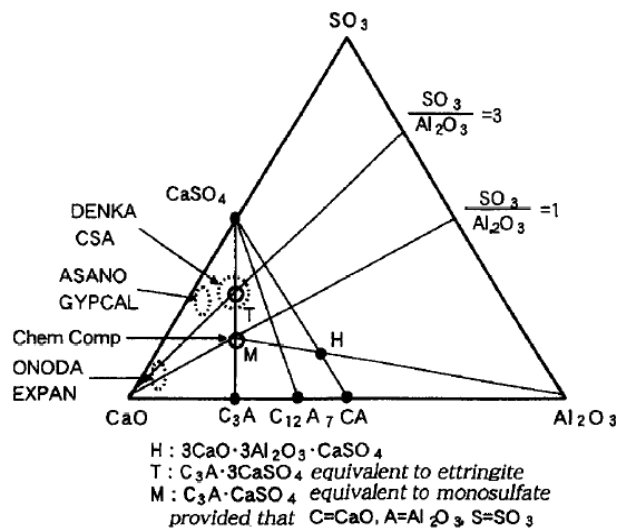


Figura 2.9 Diagrama de aditivos expansivos (Nagataki y Gomi, 1998)⁸³.

Cuando alguno de los componentes de este diagrama se hidrata da lugar a la formación de varios compuestos, de los cuales, los siguientes son de carácter expansivo⁸³:

- Etringita ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) que se muestra en el punto T.
- Monosulfato ($C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$) que se muestra en el punto M.
- Hidróxido cálcico ($Ca(OH)_2$) que se muestra en CaO.

Las proporciones de aditivo expansivo a emplear a la hora de fabricar un hormigón dependerán de si se diseña un hormigón de retracción compensada o uno expansivo (lógicamente, el contenido de aditivo será mayor en el segundo caso), pero también variarán en función de diversos factores, como pueden ser el tipo y procedencia del cemento empleado y el régimen de expansión deseado, así como otros factores expuestos en la sección 2.2.7 del capítulo. Sin embargo, los fabricantes aconsejan emplear dosis inferiores al 15% en peso de cemento con ambos tipos de aditivos.

2.2.5 Definiciones y tipos de hormigones expansivos

Se denomina hormigón expansivo al fabricado bien con cementos expansivos tipo K, M o S, de uso más extendido en Estados Unidos y Europa, bien con aditivos expansivos K, M, S o G, de uso más extendido en Japón. Los hormigones expansivos se dividen, en función de la magnitud de la deformación generada, en hormigones de retracción compensada (Shrinkage-Compensating Concrete) y hormigones pretensados químicamente (Self-Stressing Concrete).

Si la magnitud de esta expansión inicial es baja pero suficiente para compensar los esfuerzos tensionales provocados por la retracción por secado generada en el material, el hormigón se conoce como "de retracción compensada". Por otro lado, cuando la magnitud de esta expansión es muy significativa, de modo que el volumen final de material en el estado endurecido es sensiblemente superior al mostrado por el propio material al inicio, se habla de "hormigones pretensados químicamente". En este último caso, contando con la debida restricción, el aumento

de volumen induce una tensión de compresión que anula y supera las tensiones de tracción producidas por la retracción, quedando un sistema de tensiones a compresión a modo de pretensado químico remanente que hace obligatorio considerar los efectos de esta tensión y deformación adicional de pretensado en el diseño de elementos estructurales.

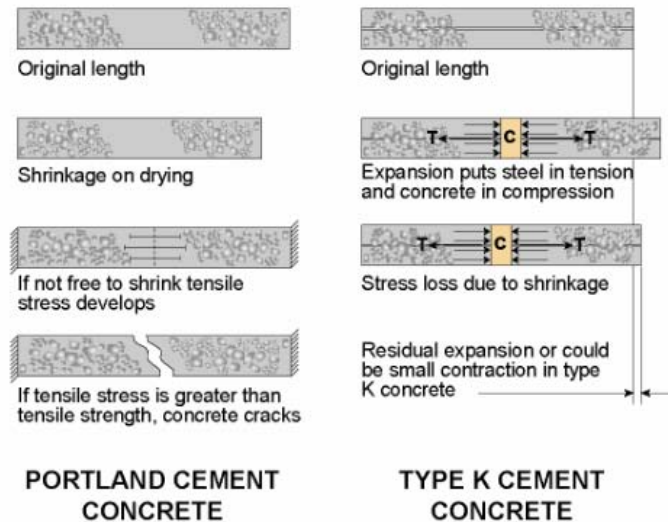


Figura 2.10 Muestra del comportamiento resistente de hormigones con cemento o aditivo tipo K a la fisuración por retracción plástica (Mehta y Monteiro, 2006)⁶².

La norma americana ASTM C845⁸⁰ clasifica el tipo de hormigón expansivo en función de unos límites de expansión a la edad de 7 días:

- Hormigón de retracción compensada → expansión a 7 días entre 0,04%-0,10%, no registrando una expansión superior a 0,15% a la edad de 28 días
- Hormigón pretensado químicamente → expansión a 7 días superior a 0,20%.

En la Figura 2.11 se muestra el régimen de deformaciones habitual de un hormigón convencional basado en cemento Portland (tipo CEM I) comparado con el que presentaría un hormigón de retracción o contracción compensada.

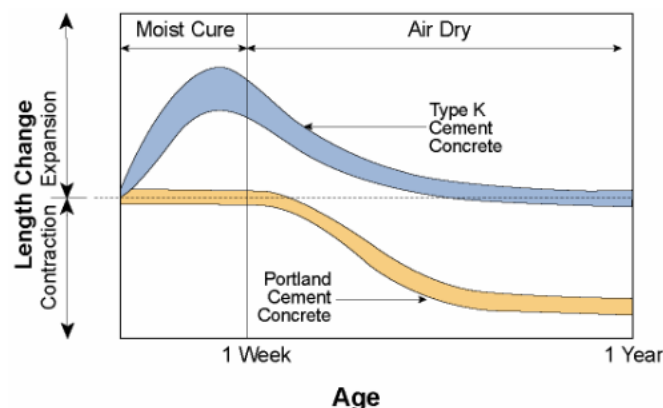


Figura 2.11 Régimen de deformaciones de un hormigón convencional basado en cemento Portland tipo CEM I y de un hormigón fabricado con cemento expansivo tipo K (Mehta y Monteiro, 2006)⁶².

El desarrollo de ambos tipos de hormigones se puede llevar a cabo mediante diferentes procedimientos, entre los que se pueden citar los siguientes:

- Expansión por reacción de óxidos alcalinos (naturales) terrosos, tales como MgO, periclasa (MgO, CaO), etc.
- Formación de orín a partir de polvo granulado de hierro por medio de agentes oxidantes, tales como los clorados.
- Modificación de la microestructura de la pasta de cemento mediante la generación de un mayor contenido en ciertos productos de hidratación⁸⁴.

De entre estos tres métodos, el tercero de ellos es el más ampliamente empleado a la hora de fabricar morteros u hormigones expansivos, y se lleva a cabo mediante la utilización de cementos o aditivos expansivos, vistos anteriormente.

2.2.6 Mecanismo de expansión e hidratación

Los mecanismos de expansión asociados a la formación de Etringita son conocidos por ser responsables tanto de fenómenos perjudiciales como beneficiosos. En hormigones que no se encuentran en la condición de restringidos, la formación de Etringita puede causar la fisuración del propio hormigón por el desarrollo de tensiones a tracción que superan la resistencia a tracción del hormigón. Sin embargo, en hormigones debidamente restringidos la formación de Etringita desarrolla unas tensiones de compresión de baja magnitud en los hormigones de retracción compensada y de alta en los hormigones pretensados químicamente que anula la retracción de estos.

El mecanismo de expansión ha sido motivo de discusión durante largo tiempo, sin embargo los distintos estudios realizados no pueden explicar con exactitud la contradicción que supone que durante el proceso de hidratación se produce, de forma simultánea, un fenómeno de expansión acompañado de una retracción química. Por tanto, la química de la hidratación del cemento aún hoy no está bien definida, siendo varias las teorías propuestas para explicar el mecanismo de expansión. A continuación se exponen las más difundidas:

- *Swelling Theory*: Este mecanismo de expansión se basa en la formación de cristales de Etringita. En primer lugar, sugiere que el modo de formación de Etringita sigue un mecanismo de solución y en segundo que, ante la presencia de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saturados, la tasa de hidratación de los aluminatos disminuye significativamente dando esto lugar a la formación de cristales de Etringita que son como geles y del tamaño de coloides.

Como las partículas coloidales tienen una gran superficie específica, la Etringita absorberá fácilmente las moléculas de agua, generando, por el aumento de volumen, fuertes presiones que se traducen en una expansión generalizada que no afecta a la estructura cristalina de la Etringita^{85,86,87}.

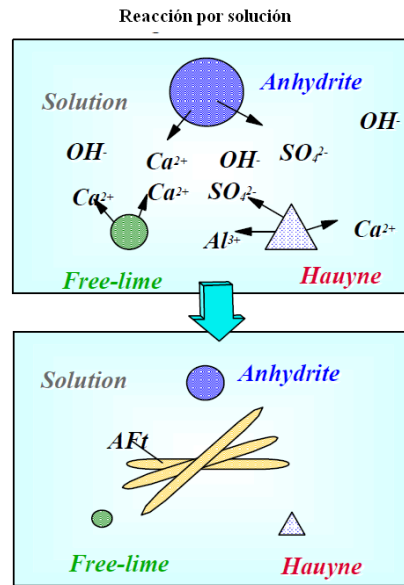


Figura 2.12 Swelling Theory - Reacción por precipitación⁸⁸.

- Crystal Growth Theory*: supone que, tan pronto como se inicia reacción, la superficie de las partículas expansivas, C_4A_3S y C_3A , se hidratan inmediatamente quedando cubiertas por una densa capa de producto hidratado (Etringita). Al aumentar la hidratación, que se produce por una reacción topoquímica, se incrementa el espesor de la capa de compuestos hidratados y cuando esta capa supera el espesor de la solución que la rodea, presiona a las partículas circundantes dando lugar a una expansión generalizada. La expansión continuará hasta que las partículas expansivas o los sulfatos disueltos se agoten^{85,89,90,91,92}.

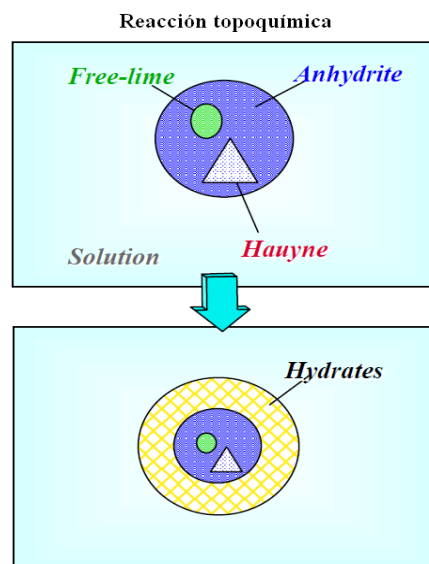


Figura 2.13 Crystal Growth Theory - Reacción topoquímica⁸⁸.

- The void theory* - Formación de poros por la desintegración de los compuestos expansivos durante la hidratación^{93,85}.

Independientemente de que la expansión tenga lugar por formación de Etringita o portlandita, el mecanismo de hidratación más aceptado se refiere a una reacción topoquímica en la superficie de las partículas del aditivo expansivo en lugar de reacción precipitación-disolución.

En cualquier caso es necesaria la formación de poros en la estructura endurecida y la formación de hidratos de geles de baja densidad en el seno de la matriz cementicia, para que los fenómenos de expansión y retracción química puedan coexistir, aunque se hace necesario ampliar los estudios para examinar de forma cuantitativa esta formación de poros y geles hidratados.

Otro factor importante en la expansión no solo es la hidratación de los componentes expansivos sino también la formación de otros hidratos circundantes a los que transmitir esfuerzos a compresión. Además se ha de tener en cuenta que la expansión no tiene lugar hasta que se forma la estructura endurecida de la matriz de cemento por hidratación de este último. Por consiguiente es importante que la hidratación tanto del cemento como de los compuestos expansivos se realice de forma simultánea⁸³.

2.2.6.1 Condiciones principales para la formación de la Etringita

La Etringita está formada principalmente por cuatro componentes CaO, Al₂O₃, SO₃ y H₂O, cuya reacción de formación (Figura 2.14), reducida a su forma más simple es la que sigue:

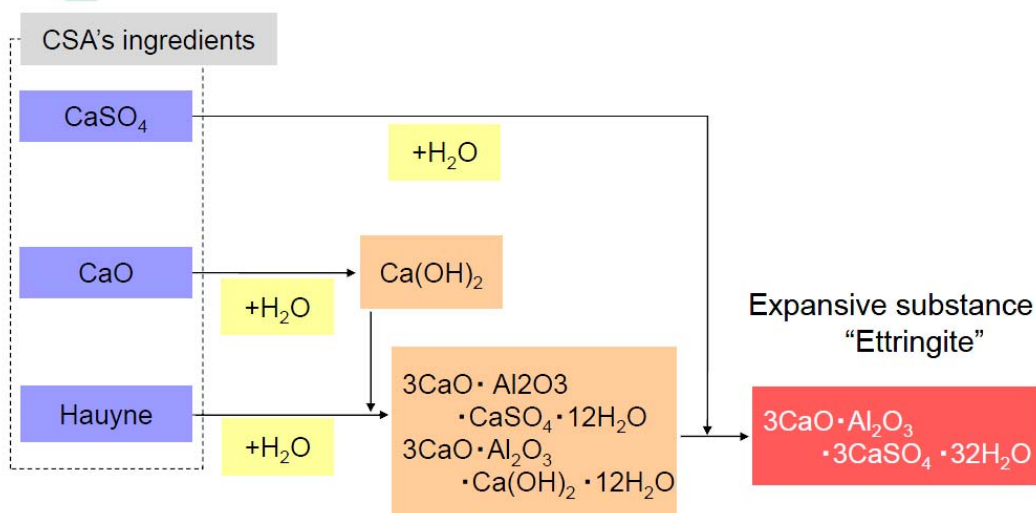
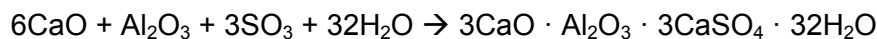


Figura 2.14 Sistema de hidratación de los compuestos CSA⁸⁸.

Los tres componentes fundamentales, aparte del agua, pueden provenir de una gran variedad de reactivos. Los compuestos deben de ser solubles o, al menos, parcialmente solubles o bien ser la forma soluble o parcialmente soluble de productos de hidratación. Un segundo requerimiento es que la fase acuosa (la solución formada cuando el agua de mezclado reacciona inicialmente con los materiales) contenga la concentración suficiente de CaO, SO₃, and Al₂O₃ que asegure la estabilización (o formación) de la Etringita. Esta segunda condición dependerá de que la cantidad de SO₃ disponible sea igual a superior a la solubilidad de la Etringita⁵⁹.

2.2.6.2 Factores principales involucrados en la dosificación de cementos expansivos

La dosificación de los componentes expansivos de los cementos no está representada por las cantidades de la relación teórica $C_6A\check{S}_3$. El requisito más importante que se debe cumplir a la hora de la dosificación de estos materiales es que el CaO, el SO_3 , y sobre todo el Al_2O_3 estén disponibles en el momento adecuado para la formación de Etringita.

A modo de resumen se puede establecer que los dos factores básicos esenciales en el desarrollo de la expansión son la cantidad apropiada de sulfatos solubles y la disponibilidad del agua suficiente que asegure la hidratación.

La formación de la Etringita comienza desde el mismo momento que se introduce agua a la masa de hormigón y su formación se acelera con el mezclado. Sin embargo, para ser eficaz, la mayor parte de la Etringita debe formarse una vez que la masa haya conseguido alcanzar un cierto grado de resistencia (final del fraguado-comienzo del endurecimiento), de lo contrario, la fuerza expansiva se disipará en forma de deformaciones en el hormigón todavía en estado plástico o semiplástico, no teniendo lugar el desarrollo de tensiones por la restricción provista. Por esta razón, amasar más de lo que se requiere para garantizar una mezcla uniforme es perjudicial ya que la Etringita formada durante un amasado prolongado reducirá la cantidad disponible más adelante para llevar a cabo la expansión. Con el curado adecuado, la formación de Etringita continúa durante y después del endurecimiento hasta que el SO_3 o el Al_2O_3 se agote⁵⁹.

Por otro lado, si la Etringita continúa formándose de forma dilatada en el tiempo una vez que, por efecto de la hidratación del cemento, se ha desarrollado la mayor parte de la resistencia, puede tener lugar una expansión de efecto destructivo para el hormigón.

La mayor parte de la reacción expansiva generada por la formación de Etringita debe cesar antes de que, a causa de la hidratación, se desarrollen resistencias altas en el hormigón. La experiencia ha demostrado que las fuerzas expansivas actúan incluso sobrepasado el periodo de formación de Etringita sin que ello vaya en detrimento de las resistencias. Este periodo incluye el tiempo en el que las resistencias se desarrollan de forma considerable por efecto de la hidratación del cemento. Una expansión continuada puede provocar la microfisuración de la pasta, pero tales microfisuras son selladas con los nuevos productos de hidratación que se van formando, siempre que se disponga de la humedad suficiente para ello⁵⁹.

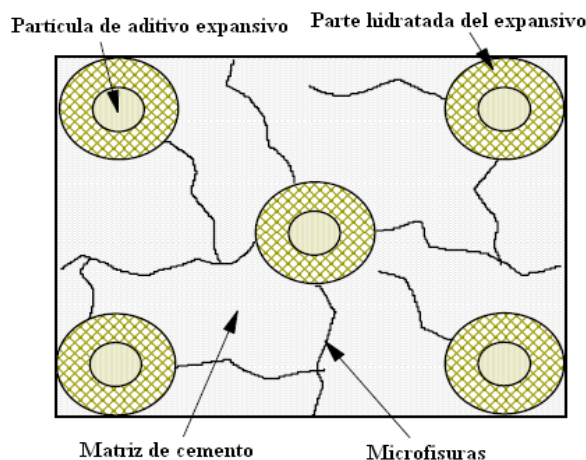


Figura 2.15 Esquema de formación de microfisuras por la acción expansiva del aditivo expansivo⁸⁸.

Aroni⁹⁴ propuso una teoría de expansión multietapas en la que describe una serie de ciclos de expansión, restricción interna, fisuración local y reactivación de la expansión.

2.2.6.3 Productos de reacción que causan la expansión

El mecanismo de expansión de las pastas de cemento que contienen $C_4A_3\check{S}$, CA o contenidos superior a los habituales de C_3A , se atribuye, a menudo, a la formación de Etringita y menos frecuentemente a la formación de monosulfoaluminato cálcico. Hansen⁹⁵ y Schwiete, Ludwig y Jager⁹⁶ propusieron que los cristales de Etringita se forman directamente en la superficie de las partículas de C_3A sin que estos se disuelvan. En el proceso normal de hidratación los granos residuales de C_3A están completamente rodeados por productos de hidratación y el crecimiento de los cristales de Etringita formados en estos sitios desarrollaría unas tensiones de compresión debidas a la expansión. Unos mecanismos similares de reacción podían aplicarse al $C_4A_3\check{S}$ y CA. Las reacciones que implican la transformación del $C_4A_3\check{S}$ en Etringita han sido estudiadas en detalle por Mehta y Klein^{97,98}, Mehta⁹⁹ concluye que la Etringita, y no el monosulfato, es la fase expansiva.

Chatterji y Jeffery¹⁰⁰ propusieron que el C_4AH_{13} , era un producto inicial de la reacción del C_3A , que en la siguiente reacción con el $C\check{S}$, a partir de una reacción sólido-líquido, provocaba un crecimiento de los cristales que desarrollaba una serie de tensiones de expansión. Mikhailov¹⁰¹ observó la presencia de aluminato cálcico, monosulfato, en la fase acuosa de mezclas de cemento de aluminato cálcico, yeso y cal. En un informe posterior declaró que el monosulfato formado inicialmente y su posterior transformación a Etringita causaron una expansión en las pastas de cemento de aluminato cálcico y yeso.

Aún no se ha establecido de forma inequívoca el mecanismo de formación de las fases expansivas que dan lugar a las fuerzas expansivas. Sin embargo es probable que el crecimiento de los cristales de Etringita los cuales se encuentran rodeados y restringidos por los productos de hidratación sea el mecanismo responsable del desarrollo de tensiones en el seno del hormigón.

2.2.7 Factores que afectan a la magnitud y velocidad de la expansión

La característica de expansión de los cementos o aditivos tipo K, M y S es una de las diferencias más significativas entre los hormigones convencionales y los expansivos. La expansión es una propiedad importante, y también un factor que influye en otras propiedades, como la resistencia. Si bien conseguir una determinada velocidad y cantidad de expansión es el objetivo de estos hormigones expansivos, hay que tener en cuenta que el régimen de expansión está condicionado por varios factores.

Las investigaciones llevadas a cabo hasta el momento han dejado claro que debe realizarse una distinción entre la medida de la expansión teórica, que depende del cemento o aditivo utilizado, y la expansión real obtenida, que depende de las numerosas condiciones o factores que se enumeraran a continuación.

2.2.7.1 Composición química y finura

Las características de la expansión, como demuestran estudios de Lafuma H.¹⁰², y Klein, A. y Troxell¹⁰³, son función de la composición química de cada cemento en particular.

La composición de óxidos de los cementos o aditivos expansivos tipo K, M y S es similar a la del cemento convencional salvo por el mayor contenido de los primeros en Al_2O_3 y SO_3 . Las

composiciones de fase, las cuales son diferentes de las encontradas habitualmente en el cemento portland, incluyen $C_4A_3\bar{S}$ o CA, ya sea CA_2 o C_5A_3 (cemento con alto contenido en alúmina)¹⁰⁴.

El comportamiento expansivo, según las investigaciones de Greening (1966), se muestra similar para distintos tipos de cementos expansivos, observándose que:

- La velocidad de expansión parece depender de la cantidad de aluminatos fácilmente hidratables y es proporcional a la cantidad presente de estos, siempre y cuando el $CaSO_4$ esté aún disponible. Las fuentes de los aluminatos pueden ser el $C_4A_3\bar{S}$ (tipo K), cemento de aluminato cálcico (tipo M), o C_3A (tipo S);
- Para un contenido determinado de aluminatos, el tiempo de duración de la expansión depende de la cantidad de sulfato cálcico presente.

Lerch¹⁰⁵, demostró que la expansión cesa cuando el sulfato (yeso) del cemento portland convencional está completamente combinado, de tal forma que, para un contenido fijo de C_3A , la expansión aumenta al incrementar el contenido de sulfatos, tal y como se aprecia en la figura que sigue.

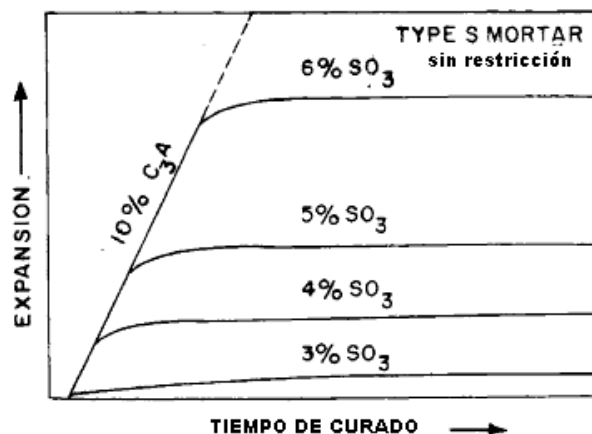


Figura 2.16 Efecto del contenido de sulfatos⁵⁹.

Una vez que el contenido de sulfatos está por encima del nivel mínimo requerido para que se produzca la expansión, esta tiene lugar, siendo la proporción sulfato-aluminato la que determina la duración de la expansión del hormigón. Los cementos portland convencionales tienen distintas proporciones sulfato/aluminato y la mezcla de diferentes cementos portland con componentes expansivos puede dar lugar a hormigones con velocidades y porcentajes de expansión distintos.

En cuanto a la superficie específica o finura de cementos o aditivos expansivos, decir que esta tiene una gran influencia en la expansión, siendo inversamente proporcional la relación de módulo de finura y magnitud de la expansión, ya que, al aumentar la superficie específica, la magnitud de la expansión registrada disminuye ostensiblemente. Esto se debe a que el aumento de superficie específica acelera la formación de Etringita mientras el hormigón está en estado plástico, con lo que las deformaciones se disipan anulando el efecto expansivo⁵⁹.

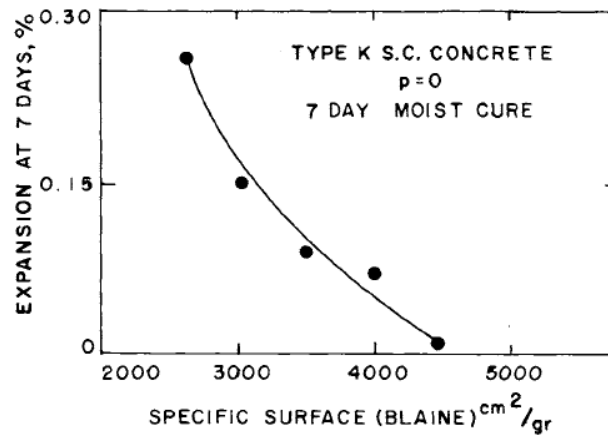


Figura 2.17 Influencia de la superficie específica del cemento en el desarrollo de expansiones⁵⁹.

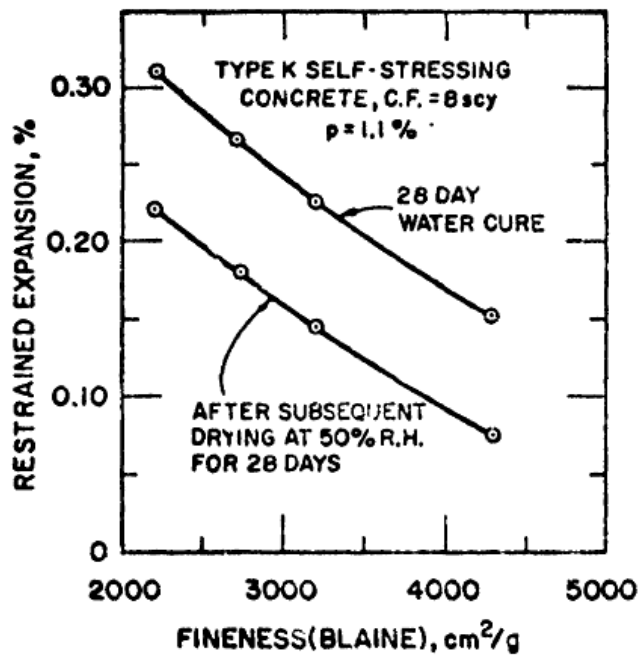


Figura 2.18 Influencia de la superficie específica del cemento en el desarrollo de expansiones en régimen restringido¹¹².

2.2.7.2 Proporción de material expansivo

La magnitud de la expansión está estrechamente relacionada con la cantidad de cemento o aditivo expansivo, así como con la composición química del cemento. En el caso de elementos sin restricción, el porcentaje de expansión está relacionado con la cantidad de aditivo expansivo pero no de forma proporcional.

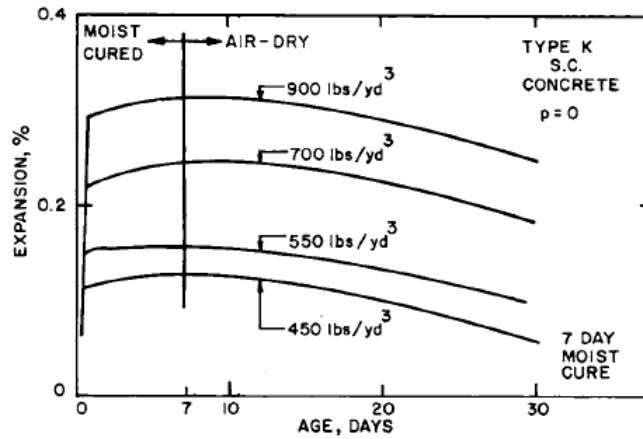


Figura 2.19 Influencia en la magnitud de la expansión de la proporción adicionada de material expansivo⁵⁹.

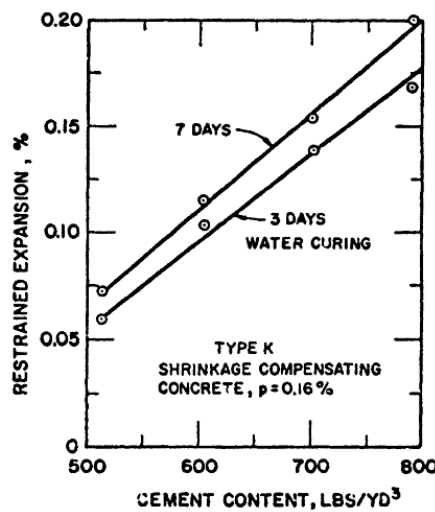


Figura 2.20 Efecto del contenido de cemento en la expansión¹¹².

Por otro lado, la evaluación de la influencia de la dosis empleada de aditivo expansivo sobre la expansión de hormigones que están restringidos es más complicada de medir, ya que, en este caso, además del porcentaje de aditivo expansivo, también influye la dirección y porcentaje de los elementos de restricción. Autores como Polivka y Bertero¹⁰⁶ recomiendan que en el caso de hormigones pretensados químicamente y con restricción se evalúe la influencia del porcentaje de aditivo expansivo para cada hormigón y elemento que vaya a emplearse.

2.2.7.3 Relación agua/cemento

Los datos obtenidos de diferentes estudios indican que, en general, para contenidos constantes de cementos o aditivos expansivos el nivel de expansión se incrementa al disminuir la relación agua/cemento. Esto se debe a que hay una mayor disposición de material potencialmente expansivo (cemento o aditivo) durante el curado en húmedo del hormigón.

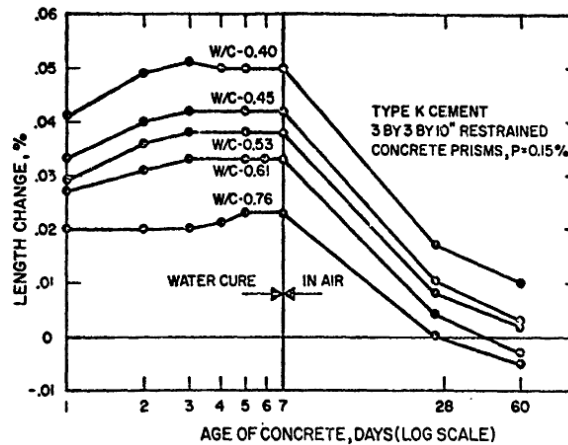


Figura 2.21 Efecto de la relación agua/cemento en el % de expansión para contenidos de cementos constantes y un grado de restricción determinado¹¹².

Nota: En este apartado cuando se habla de relación agua/cemento se está hablando de relación agua/(cemento expansivo) o bien agua/(cemento + aditivo expansivo).

2.2.7.4 Curado

Las condiciones de curado de un hormigón fabricado con cemento portland convencional están perfectamente definidas. En el caso de hormigones de cementos o aditivos expansivos los requisitos de curado son aún más estrictos ya que en los hormigones expansivos se deben considerar dos reacciones de hidratación: la formación de silicato cálcico hidratado, responsable de la resistencia, y de Etringita, responsable de la expansión, los cuales se ven afectados de forma diferente por las condiciones de curado (temperatura y disponibilidad de agua). Un curado inadecuado de un mismo hormigón expansivo, puede reducir el porcentaje final de expansión.

Los procedimientos de curado pueden tener efectos distintos sobre los diferentes tipos de cementos o aditivos expansivos. Está bien documentado que los hormigones de cementos expansivos presentan una expansión significativamente mayor en agua o en cámara de curado con atmosfera saturada que cuando son curados en condiciones ambientales sin aporte de humedad. Bertero¹⁰⁷, Slate y Matheus¹⁰⁸ han demostrado que la presencia de agua libre es necesaria para el desarrollo de la expansión.

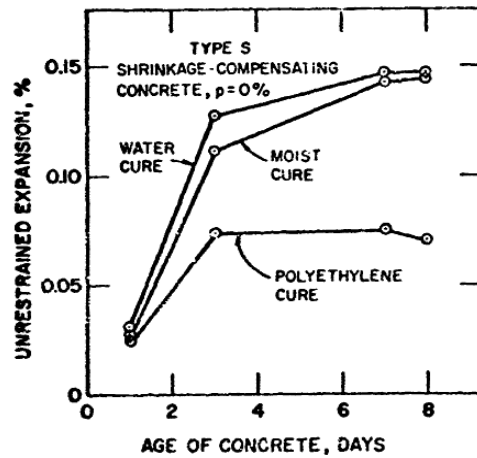


Figura 2.22 Efecto del tipo de curado en la expansión¹¹².

La Figura 2.23 ilustra la influencia del curado en agua y un curado con recubrimiento de polietileno, en el caso de hormigones fabricados con cemento tipo K. También está documentado, por Bertero¹⁰⁷ y Gustaferro Greening y Klieger¹⁰⁹, que los hormigones expansivos fabricados con cementos tipo M o K curados con recubrimiento de polietileno pueden expandir adicionalmente cuando se les somete a curados en agua posteriores.

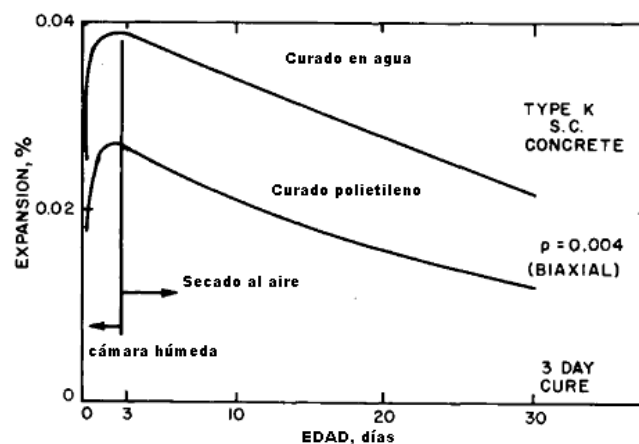


Figura 2.23 Efecto del tipo de curado en la expansión⁵⁹.

De esta forma, los hormigones, fabricados con áridos convencionales, curados con recubrimientos de polietileno presentan una expansión del 65% comparado con los mismos hormigones curados en agua.

Por otro lado, investigaciones de Aroni y Polivka¹¹⁰, demuestran que en el caso de hormigones ligeros de retracción compensada se observa una expansión muy similar aun cuando unos son sometidos a curado húmedo y otros con recubrimiento de polietileno, atribuyéndose este comportamiento similar de expansión al curado interno que proporciona el agua que proviene del interior de los áridos ligeros, reduciendo esto, los gradientes de humedad y los problemas relacionados con las expansiones diferidas.

2.2.7.5 Temperatura

Las temperaturas existentes durante el amasado del hormigón y su curado posterior presentan una influencia manifiesta sobre la velocidad y la magnitud de la expansión en función de la restricción y la humedad relativa. El efecto de la temperatura ha sido investigado por autores como Monfore¹¹¹ y Klein y Bertero⁷¹.

En el caso de hormigones de retracción compensada fabricados con cemento tipo K y sin restricción los resultados muestran un aumento de la expansión considerable al aumentar la temperatura siempre y cuando el curado se realice en atmosfera saturada, ya que si la humedad relativa se reduce se produce una disminución significativa de la expansión.

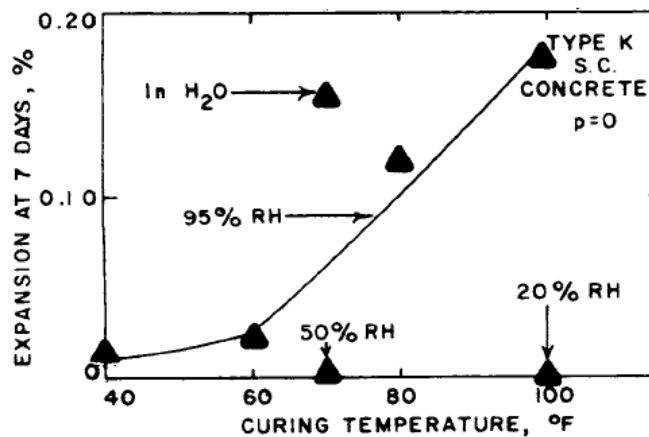


Figura 2.24 Efecto de la temperatura de curado y humedad relativa sobre la expansión en hormigones de retracción compensada sin restricción⁵⁹.

Así mismo, en hormigones pretensados químicamente no restringidos y fabricados con cemento tipo K, sometidos a un curado húmedo continuado, se observa un aumento de la expansión al aumentar la temperatura del curado. Sin embargo, los mismos hormigones pero en la condición de restringido, presentan una ligera disminución de la expansión al aumentar la temperatura de curado, tal y como se observa en la figura que sigue.

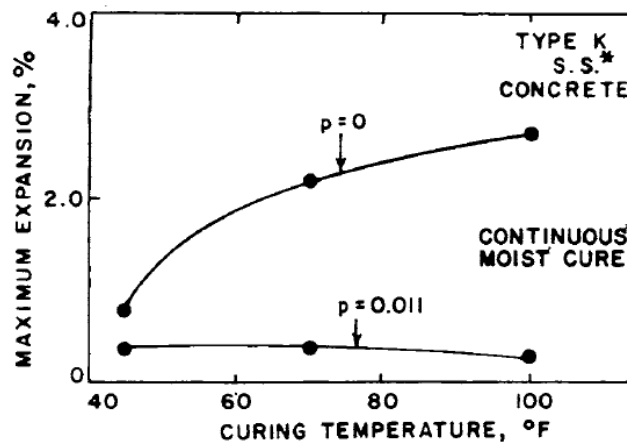


Figura 2.25 Efecto de la temperatura de curado sobre la expansión en hormigones pretensados químicamente con y sin restricción⁵⁹.

Podría esperarse que una temperatura elevada acelerara la reacción de expansión provocando un mayor porcentaje de ésta, sin embargo, las altas temperaturas también aceleran la ganancia de resistencias, tendiendo este aumento de resistencias a restringir la expansión de tal forma que la expansión final será inferior. Este comportamiento se muestra en la figura que sigue, donde el curado a 100°F (38°C) produce una expansión inicial mayor que el curado a 70°F (21°C), sin embargo a 28 días el hormigón curado a 100°F (38°C) presenta una expansión última un 0,04% inferior a la que se registra a la temperatura de 70°F (21°C).

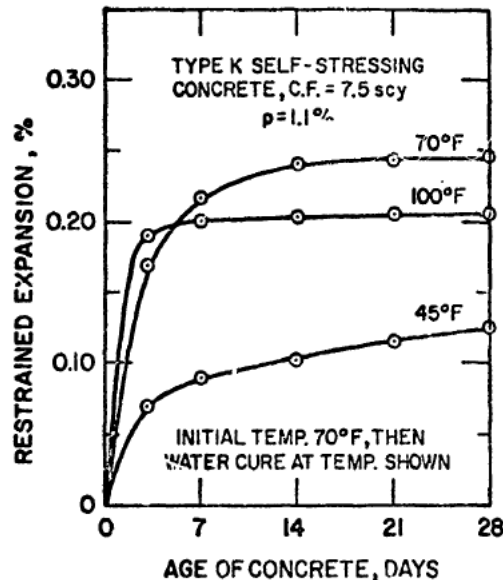


Figura 2.26 Efecto de la temperatura de curado sobre la expansión en hormigones de retracción compensada con restricción¹¹².

2.2.7.6 Tamaño y forma del elemento

La expansión decrece a medida que aumenta el tamaño del elemento según diversos datos publicados por Gustaferro, Greening y Klieger¹¹³ y Monfore¹¹⁴. Además muestran que, en elementos de gran volumen, también se pueden apreciar diferencias entre el ratio de expansión exterior y el interior ya que el hormigón de esta última zona tiene un curado húmedo más prolongado.

También ha sido referenciado por Bertero¹¹⁵ que en el caso de elementos restringidos uniaxialmente fabricados con hormigón pretensado químicamente cuanto mayor es el tamaño del elemento hormigonado, mayor es la deformación transversal experimentada, lo que apareja un deterioro de las propiedades mecánicas. El uso de áridos ligeros o elementos sometidos a compresión triaxial mitiga estos efectos perjudiciales⁵⁹.

Según Russell¹¹⁷, el espesor de losa no parece afectar a la cantidad de expansión. Sin embargo, las losas gruesas tienen una retracción posterior menor por lo que elementos gruesos necesitarían una menor expansión para lograr una compensación completa de la contracción.

2.2.7.7 Restricción

Los hormigones de retracción compensada o pretensados químicamente deben estar restringidos para inducir tensiones a compresión. Esta restricción puede ser proporcionada tanto por medios externos (sustrato sobre el que apoya, encofrados perdidos o estructuras hiperestáticas adyacentes) como internos (armaduras de refuerzo). En el campo de la investigación, la mayor parte de los laboratorios han utilizado ambos medios de restricción, coaccionando la expansión de forma uniaxial, biaxial, y en los últimos años de forma triaxial^{71,110,116}.

El grado de restricción tiene una influencia muy importante en el porcentaje de expansión y tensión desarrollados. Los hormigones sin restricción pueden desarrollar expansiones varias veces superiores a las desarrolladas por hormigones con restricción, aunque solo estos últimos desarrollan tensiones de compresión en el seno del hormigón.

La cantidad de refuerzo o el grado de restricción, influye en la magnitud de la expansión y tensión desarrolladas. Para una dosificación de hormigón dada, un incremento de la restricción reducirá el grado de expansión pero aumentará la tensión a compresión en el hormigón⁶¹.

En este aspecto, el doctor H.G. Russell¹¹⁷ llevó a cabo una serie de estudios acerca de la influencia del grado de restricción en losas fabricadas con hormigones de retracción compensada basados en la formación de Etringita, observando que las losas ligeramente reforzadas tenían considerablemente más expansión que aquellas que estaban fuertemente armadas o reforzadas, no teniendo, sin embargo, el porcentaje de refuerzo, excesiva influencia en la contracción posterior.

Estos estudios, con una serie de modificaciones para su adaptación a probetas prismáticas de laboratorio, dieron lugar a un ábaco para el diseño de elementos estructurales fabricados con hormigones de retracción compensada basados en la formación de Etringita que recoge el comité ACI 223 desde el año 1976. Este ábaco relaciona el porcentaje de refuerzo, la expansión en elementos estructurales y la expansión en probetas (Figura 2.31).

2.2.7.8 Tiempo de mezclado

Incrementar el tiempo de amasado disminuye el grado de expansión en todos los cementos expansivos (Klieger y Greening¹¹⁸), ya que el amasado acelera la formación de Etringita y reduce drásticamente la disponibilidad de este compuesto para una expansión posterior.

La Figura 2.27 muestra como la prolongación del tiempo de amasado disminuye ostensiblemente la expansión desarrollada por los hormigones de retracción compensada fabricados con cemento tipo K.

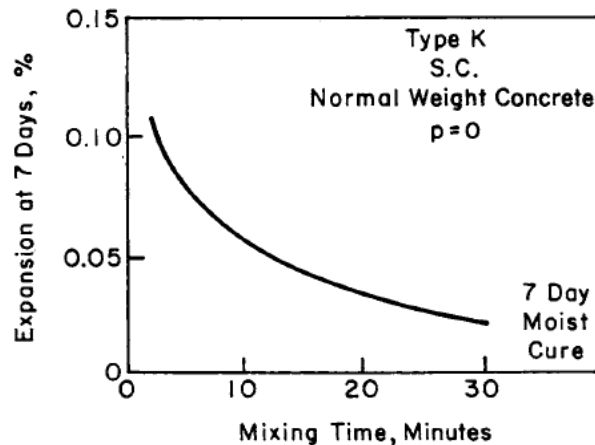


Figura 2.27 Efecto del tiempo de mezclado sobre la expansión en hormigones expansivos⁵⁹.

2.2.7.9 Aditivos

Las investigaciones llevadas a cabo para determinar la influencia de los aditivos (distintos a los expansivos) en el mecanismo de expansión de hormigones fabricados con cementos expansivos no son muy numerosas.

Sin embargo, un grupo de investigadores (Fu, Gu, Xie, Beaudoin¹¹⁹), publicó en 1995 un estudio en el que se evaluaba la influencia, sobre la velocidad y magnitud de la expansión, de aditivos superplastificantes, aceleradores, retardadores y mejoradores de la adherencia.

En este estudio se referencia como los aditivos superplastificantes de sales de condensado de naftaleno sulfonado y formaldehído (SNF) y de melanina sulfonada y formaldehído (SMF) reducen la expansión final debido a que aceleran la formación de Etringita en la fase inicial de la hidratación cuando el hormigón aún está en estado plástico. Del mismo modo, se observa como los aditivos superplastificantes del tipo lignosulfonato anulan la formación de Etringita desde las primeras fases de la hidratación disminuyendo por ello la expansión final.

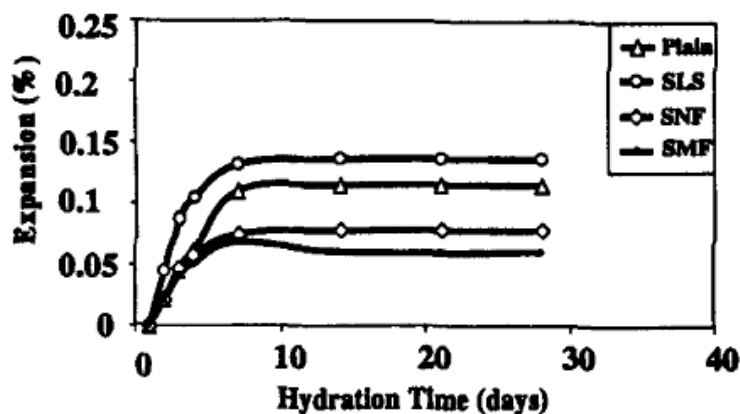


Figura 2.28 Efecto del tipo de aditivo superplastificante sobre la expansión de hormigones expansivos¹¹⁹.

Por otro lado, los aditivos retardadores, basados en azúcares, reducen significativamente la expansión porque restringen la formación de Etringita, incluso cuando se añaden en dosis muy pequeñas, mientras que los aditivos aceleradores basados en sales inorgánicas pueden favorecer la expansión, aunque el papel que desempeñan estas sales en la interacción química del proceso de expansión no está muy claro. Por último, referente a los aditivos mejoradores de la adherencia, se demuestra que estos aditivos basados en látex incrementan la magnitud de la expansión final¹¹⁹.

2.2.7.10 Tipo y tamaño del árido

El tipo y tamaño de árido pueden influir en la velocidad y cantidad de la expansión.

A continuación se muestra una gráfica donde se aprecia la influencia del tipo de árido sobre la expansión y posterior retracción de hormigones de retracción compensada restringidos, dosificados con las mismas proporciones de árido y mismo tipo de cemento expansivo.

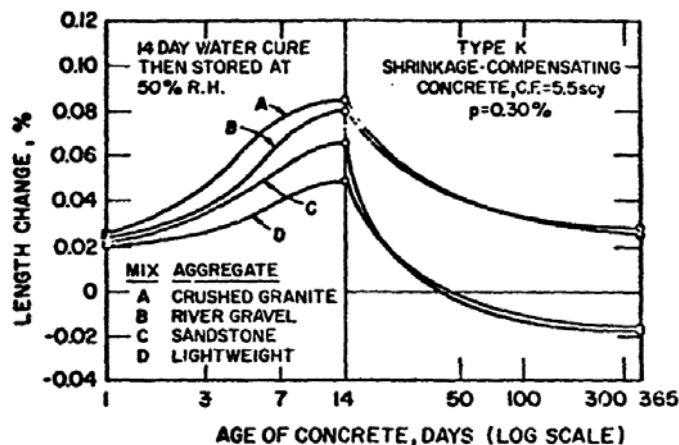


Figura 2.29 Efecto del tipo de árido sobre la expansión en hormigones de retracción compensada sin restricción¹¹².

En dicha gráfica puede verse como después del curado en húmedo, donde se alcanzan deformaciones positivas (expansiones) de entre 0,05-0,08%, el régimen de secado y por tanto la retracción que presentan los hormigones es muy distinta, a nivel cuantitativo, en función del tipo del árido.

La expansión también puede estar relacionada con el módulo de elasticidad de los áridos. Los hormigones de áridos ligeros, los cuales poseen un módulo de elasticidad aproximadamente la mitad que un hormigón fabricado con granito o grava de río, presentan una expansión del 50% respecto a estos últimos hormigones. Ensayos realizados con otros áridos ligeros, de mayor módulo de elasticidad, presentan expansiones de mayor magnitud. La alta absorción que suelen presentar estos áridos ligeros es una ventaja para los hormigones expansivos ya que el agua alojada en los poros proporciona un curado interno que favorece las reacciones de expansión¹¹².

Por otro lado, los áridos que contienen en su composición yeso u otros sulfatos pueden incrementar la expansión o causar expansiones diferidas o una posterior alteración del hormigón. Los áridos con altos contenidos en cloruros como la arena de playa, tienden a disminuir el porcentaje de expansión y a incrementar la retracción de secado, haciendo necesario por todo lo expuesto la caracterización mediante ensayos de los áridos que se vayan a emplear.

2.2.7.11 Edad del cemento o aditivo expansivo

El tiempo de almacenaje y sobre todo la exposición a determinados ambientes durante ese tiempo afecta a la capacidad expansiva (reactividad) del aditivo expansivo. El envejecimiento del producto expansivo se relaciona con procesos de carbonatación e hidratación de tal forma que en los cementos o aditivos tipo k pierden eficacia por la hidratación del CaO ya que produce un componente expansivo con un área de superficie mayor. Estos procesos de envejecimiento se pueden dar incluso en condiciones ambientales normales cuando el aditivo queda expuesto al ambiente.

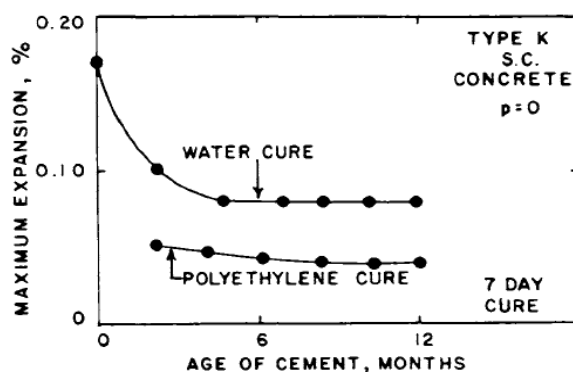


Figura 2.30 influencia del envejecimiento en la reactividad del cemento o aditivo expansivo⁵⁹.

2.2.8 Composición y dosificación de los cementos expansivos

La composición de estos cementos expansivos se basa en un 75-90% en los constituyentes habituales del cemento portland convencional, con añadidos de aluminato y sulfato de calcio. Por esta razón los análisis de óxidos de los informes de fábrica no difieren sustancialmente de lo especificado para el cemento portland en la norma ASTM C150¹²⁰ o UNE-EN 197-1⁸¹, excepto por la mayor cantidad de sulfatos (habitualmente 4-7% de SO₃) y, normalmente, pero no siempre, mayores cantidades de aluminato (generalmente 5-9% Al₂O₃). El contenido de cal (CaO) también puede ser algo mayor.

Los tipos de aditivos y cementos expansivos difieren entre sí en la forma de los compuestos de aluminatos a partir de los cuales se forma la Etringita.

El tipo de aluminato utilizado influye en la velocidad y cantidad de Etringita formada en edades tempranas y por lo tanto, en la expansión total. La expansión final está condicionada por el tipo y cantidad de aluminatos y sulfatos de calcio, así como por la velocidad con que a partir de ellos se forma la Etringita. Como en la mayor parte de ellos cementos portland la resistencia a compresión alcanzada se debe a la hidratación de los silicatos cálcicos.

Los cementos están diseñados para producir la cantidad apropiada de expansión sin que se repercuta negativamente en la calidad del hormigón y mantengan la velocidad normal de retracción. Un requisito importante es la selección de las proporciones del material de modo que CaSO₄ y el Al₂O₃ sean suficientes para garantizar la formación de Etringita durante el periodo posterior a la adición del agua de mezclado. La determinación de la proporción adecuada de cementos o compuestos expansivos a través de ensayos de laboratorio es fundamental para determinar el porcentaje de expansión, permitiendo esto categorizar el hormigón fabricado como hormigón de retracción compensada u hormigón pretensado químicamente.

2.2.9 Guías de uso y métodos de ensayo

El diseño, caracterización y uso de los hormigones expansivos se recoge en dos guías de uso fundamentalmente.

- *ACI 223: Guide for the Use of Shrinkage-Compensating Concrete*⁶¹, de uso común en Estados Unidos.
- *JSCE No. 23: Recommended Practice For Expansive Concrete*¹²¹, de uso más extendido en Japón.

Estas guías, con sus diferencias, establecen los criterios y prácticas para asegurar un correcto desarrollo de la expansión de los hormigones de retracción compensada o pretensados químicamente, además de los principios básicos, métodos y detalles a tener en cuenta para el adecuado diseño estructural, dosificación de la mezcla, puesta en obra, acabado y curado.

Los materiales, procesos, medidas de control de calidad y las inspecciones que se describen en estos documentos deben ser probados, supervisados y correctamente interpretados.

Ambas guías refieren a ensayos de laboratorio para caracterizar la expansión de los hormigones expansivos en la condición de restringido y en un ambiente de curado controlado especificando unos porcentajes de expansión que permiten clasificar el hormigón expansivo como hormigón de retracción compensada y hormigón pretensado químicamente.

La guía japonesa *JSCE No. 23: Recommended Practice For Expansive Concrete*, recoge en si misma unos límites de expansión concretos para clasificar el tipo de hormigón expansivo mientras que la guía *ACI 223: Guide for the Use of Shrinkage-Compensating* refiere a la norma ASTM C845 dichos límites de expansión.

La Tabla 2.1 recoge los diferentes valores que permiten clasificar el tipo de hormigón expansivo en función de su expansión.

Tabla 2.1 Método de ensayo según la guía de uso utilizada.

Guías de diseño	Método de ensayo	Hormigón de retracción compensada - Deformación a 7 días (%)	Hormigón pretensado químicamente - Deformación a 7 días (%)	
			0,20 - 0,70	0,20 - 1,00
JSCE nº 23 - Recommended Practice For Expansive Concrete	JIS A 6202	0,15 - 0,20	0,20 - 0,70	0,20 - 1,00
ACI 223 - Guide for the Use of Shrinkage-Compensating Concrete	ASTM C845/ ASTM C878	0,04 - 0,10	> 0,20	

La guía ACI 223, utilizada como referencia en este estudio, establece un procedimiento de diseño para elementos fabricados con hormigones expansivos en función de la relación existente entre la expansión del miembro estructural, la expansión de probetas prismáticas normalizadas, y el porcentaje de refuerzo cuando el elemento y la probeta están fabricados con el mismo hormigón y se curan en condiciones idénticas.

Este procedimiento de diseño, en el caso de hormigones fabricados con aditivos expansivos basados en la formación de Etringita, refiere al ábaco de la Figura 2.31, el cual se basa en datos publicados (Russell¹¹⁷, 1973) pero modificados para permitir el uso del método de ensayo ASTM C878¹²², método de referencia que establece el código ACI 223 para determinar la expansión en probetas prismáticas normalizadas fabricadas con hormigón expansivo o de retracción compensada.

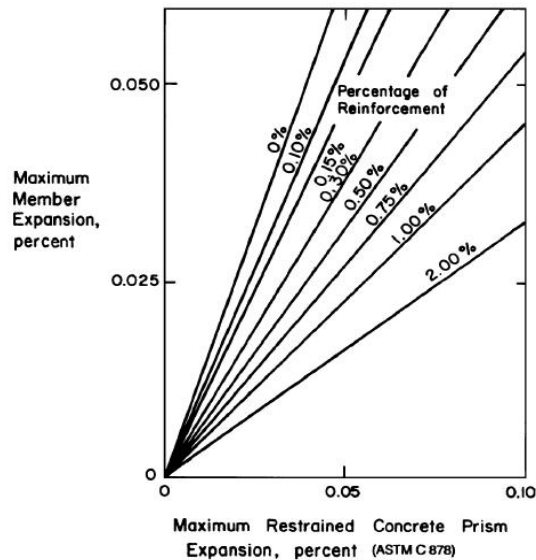


Figura 2.31 Estimación ACI 223 de la expansión de un elemento estructural a partir de la expansión de prismas basados en sistemas de Etringita⁶¹.

De forma general, los cambios de longitud de los hormigones expansivos se caracterizan en régimen restringido, en este estudio también se caracterizan en régimen libre para ver la influencia que tiene sobre la expansión la interposición de la restricción. Para ello se emplea el método de ensayo que recoge el siguiente apartado.

2.2.9.1 ASTM C157 - Método de ensayo para medir los cambios de longitud libres de morteros y hormigones

El método de ensayo ASTM C157¹²³ determina los cambios de longitud del hormigón, en régimen libre y en unas condiciones de curado concretas, sobre probetas moldeadas en moldes prismáticos de acero de dimensiones interiores 286 x 76 x 76 mm conformes a la norma ASTM C490¹²⁴, en cuyos extremos interiores se enroscan unos elementos denominados "índices" los cuales quedan parcialmente embebidos en la probeta de hormigón dejando una longitud de medida efectiva de 254 mm.



Figura 2.32 Molde ASTM C490-Probeta HACE, ensayo ASTM C157.



Figura 2.33 Índices para ensayo ASTM C157.

Estos índices son los elementos que facilitan la colocación y medición de la probeta en un dispositivo de medida denominado “comparador”, Figura 2.34, donde se registra la medida de longitud en un indicador digital o analógico respecto de una barra de referencia.



Figura 2.34 Comparador de longitud.

2.2.9.2 ASTM C878 – Método de ensayo para evaluar la expansión restringida de hormigones de retracción compensada.

El método de ensayo ASTM C878 determina los cambios de longitud en régimen restringido de un hormigón fabricado con aditivo expansivo. Para ello, fija unas condiciones de curado concretas e impone una restricción de valor conocido a través de un dispositivo denominado *restraining cage*, cuya configuración y dimensiones se detallan en la Figura 2.35 y la Tabla 2.2 respectivamente.

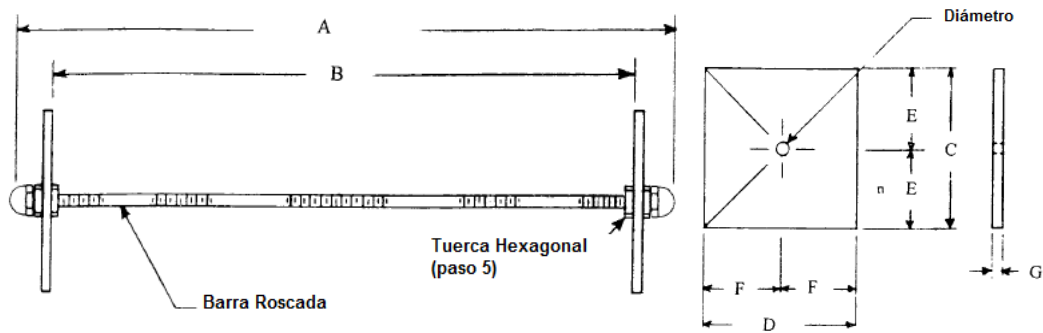


Figura 2.35 Configuración del dispositivo “Restraining Cage” montado¹²².

Tabla 2.2 Dimensiones del dispositivo “Restraining Cage”¹²².

Dimensiones - Restraining Cage								
Referencias	A	B	C	D	E	F	G	H
Dimensiones (mm)	294 ±1	254	76	75	38	37,5 ±0,5	10	5

La *restraining cage* se coloca dentro de moldes prismáticos de acero de dimensiones interiores 306 x 76 x 76 mm conformes a la norma ASTM C490, y consiste en una varilla roscada de acero de características mecánicas y de deformación definidas (2800N/0,0012 ± 0,0001), en cuyos extremos, separadas 254 mm (longitud de medida efectiva), se colocan dos placas de acero inoxidable sujetas por tuercas hexagonales colocadas a ambos lados de las placas. Por último, en los extremos de las varillas se disponen dos roscas ciegas que facilitan la colocación y medición de la probeta en un dispositivo de medida denominado “comparador” donde se registra la medida de longitud en un indicador digital de precisión 0,002 mm.



Figura 2.36 Molde ASTM C490-Probeta ensayo ASTM C878.

2.3 Hormigón autocompactante

2.3.1 Definición

El hormigón autocompactante (HAC) es un hormigón capaz de fluir y compactarse por la acción de su propio peso sin que se produzca segregación, consiguiendo el llenado completo de los encofrados y el recubrimiento de la armadura de refuerzo sin necesidad de energía de vibración ni de cualquier otro método de compactación¹²⁵.

La trabajabilidad de un hormigón describe la facilidad con que este puede ser mezclado, puesto en obra, compactado y acabado. La trabajabilidad del HAC se caracteriza mediante métodos de ensayo específicos y se define a partir de las siguientes propiedades:

- *La capacidad de llenado – Filling ability (fluidez no confinada)*: describe la capacidad del HAC a fluir y llenar completamente todos los espacios dentro del encofrado, por la acción de su propio peso. Esta propiedad es de importancia al seleccionar la técnica de puesta en obra y la determinación de separación entre puntos de llenado.
- *La capacidad de paso - Passing ability (fluidez confinada)*: se refiere a la facilidad con que el hormigón puede pasar a través de espacios reducidos y sortear diversos obstáculos, como los que constituyen los encofrados y las armaduras, sin bloqueo ni segregación.
- *Estabilidad de hormigón - Stability (resistencia a la segregación)*: describe la capacidad de un material para mantener una distribución homogénea de sus diferentes constituyentes durante su flujo y ajuste.

En consecuencia, la caracterización de un hormigón autocompactante se basa principalmente en propiedades del hormigón en estado fresco. Sin embargo, ha de asegurarse que el producto endurecido cumple con los requerimientos exigidos a un hormigón convencional en términos de durabilidad y resistencia, y que es compatible con los sistemas de puesta en obra más habituales en la construcción.

2.3.2 Historia y evolución

Los primeros desarrollos sobre HAC fueron realizados en Japón por un grupo de investigadores liderados por el profesor Okamura en la Universidad de Tokio en 1986, acuñando previamente el nombre de “high performance concrete” y empleándose el término hormigón autocompactante (self-consolidating concrete) años más tarde.

En inicio, fue planteado como solución para mejorar y garantizar la correcta compactación en aplicaciones donde la durabilidad del hormigón y la vida útil de servicio eran motivo de preocupación. Posteriormente, se emplea de forma más general en distintos tipos de aplicaciones para facilitar la puesta en obra y paliar la falta de mano de obra especializada, así como para reducir tanto el tiempo y coste de las operaciones de construcción como el impacto medioambiental de éstas.

Otra de las razones para el desarrollo del hormigón autocompactante fue que, ante nuevos retos estructurales, el hormigón convencional no era capaz de dar una respuesta eficaz. Un ejemplo lo constituyen las estructuras altamente congestionadas por el armado y piezas que presentan áreas de acceso restringido, donde las dificultades de compactación pueden dar origen a serios problemas de calidad en el hormigón.

Desde sus inicios el HAC ha sido utilizado con éxito en numerosos países (Japón, Estados Unidos, Europa) tanto en aplicaciones in situ como en prefabricados siendo este último campo el que ha experimentado un mayor crecimiento desde el año 2000. Por poner un ejemplo en 2005 el uso de HAC representaba el 75% del hormigón prefabricado^{125,126}.

2.3.3 Características del HAC

2.3.3.1 Estado Fresco

El hormigón en estado fresco se puede describir como una suspensión de partículas, aunque muy compleja. El antes mencionado comportamiento del hormigón autocompactante en estado fresco, que se traducía en la posibilidad de fluir y en la resistencia a la segregación, se evalúa a través del estudio de las propiedades reológicas del fluido.

Aunque simple, el modelo reológico de Bingham da una buena idea del comportamiento básico del material (Figura 2.37). La idea es sencilla. Al intentar poner en movimiento el hormigón - proporcionar al fluido una velocidad - es necesario vencer una resistencia τ_0 debido al rozamiento entre las partículas. Una vez iniciado el movimiento, se requiere seguir aumentando la fuerza aplicada al fluido para conseguir "acelerarlo", debido a la cohesión entre las partículas. Esta resistencia posterior se mide a través de la viscosidad α .

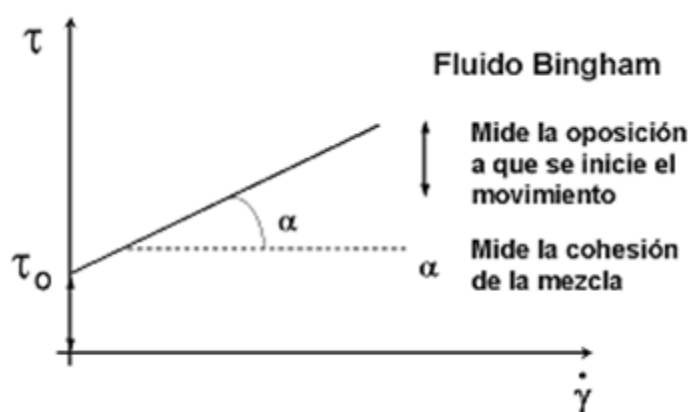


Figura 2.37 Parámetros reológicos según el modelo de fluido Bingham.

Comparando el hormigón autocompactante con un hormigón convencional, el primero presenta una tensión de inicio de flujo inferior, similar a la que presentan los hormigones fluidos; pero a diferencia de éstos, en los que la viscosidad es menor que la de un hormigón convencional, la viscosidad del hormigón autocompactable es mayor incluso que la de los hormigones convencionales, asegurando la cohesión (Figura 2.38).

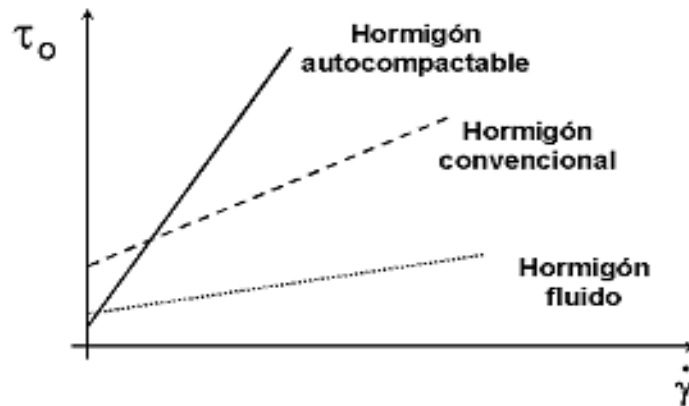


Figura 2.38 Comparación reológica entre hormigón autocompactante, hormigón convencional y hormigón fluido.

Sin embargo, es necesario destacar que aunque una baja tensión de inicio de flujo es un objetivo común en cualquier aplicación con hormigón autocompactante, la viscosidad es un parámetro que puede variar de forma considerable dependiendo de la técnica de producción y de la aplicación. La Figura 2.39 muestra una comparativa entre distintos tipos de hormigón según sus propiedades reológicas características. Se comprueba cómo el hormigón autocompactante y el hormigón de alta resistencia comparten en ocasiones las mismas propiedades.

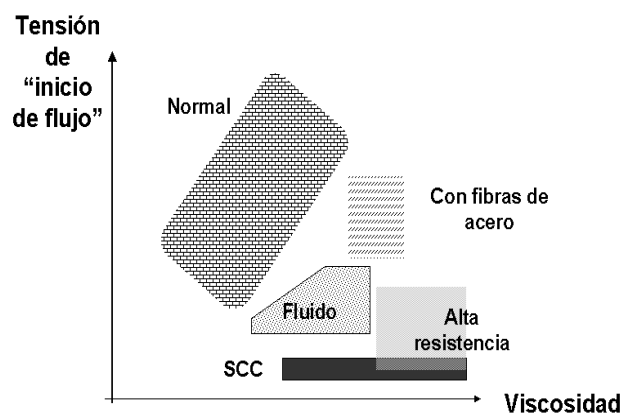


Figura 2.39 Tensión de flujo frente a viscosidad para diferentes tipos de hormigones.

2.3.3.2 Estado Endurecido

La experiencia parece indicar hasta ahora que el hormigón autocompactante presenta similares propiedades, si no mejores, de resistencia y de permeabilidad que un hormigón convencional con la misma relación agua/cemento, aunque es difícil compararlos objetivamente debido a la introducción de nuevos componentes como fillers o adiciones.

2.3.4 Diseño de mezclas de HAC

El principal mecanismo para conseguir un aumento en la fluidez del hormigón consiste en la reducción de la fricción entre las partículas. Los medios para obtener este aumento son la reducción de la tensión superficial mediante el empleo de superplastificantes, y una estructura granular óptima con gran cantidad de finos que aporten la viscosidad necesaria. El empleo de

agentes modificadores de la viscosidad es otra posible solución, aunque más complicada de controlar.

Uno de los problemas que se asociaban al hormigón autocompactante era que, con los súperplastificantes convencionales, una reducción en la tensión de inicio de flujo traía aparejada una disminución de la viscosidad, con el consiguiente aumento del riesgo de segregación. Afortunadamente, los superplastificantes de última generación son capaces de dotar al hormigón de la fluidez necesaria sin que se pierda la cohesión entre las partículas.

Un factor muy importante a la hora del diseño de un hormigón autocompactante lo constituye la habilidad del hormigón para fluir a través de los obstáculos, como por ejemplo las armaduras. Ha de prestarse especial atención a la disposición de estas armaduras, la forma de puesta en obra, y el tamaño máximo de los áridos empleados.

En resumen, las características principales a la hora de diseñar un hormigón autocompactante son:

- Empleo de aditivos superplastificantes y modificadores de la viscosidad eficientes.
- Aporte elevado de finos (uso de adiciones).
- Uso eventual de aditivos modificadores de la viscosidad.

Existen diversos modelos de diseño de mezclas para hormigón autocompactante, como el propuesto por Okamura, el propuesto por el ACI americano, o el método EFNARC. Todos tienen en común que un correcto diseño de hormigón autocompactante requiere un diseño por pasos, en el que es necesario optimizar la pasta y el mortero antes de poder dar una fórmula específica de hormigón.

2.3.5 Métodos de ensayo en fresco

La medida directa de los parámetros reológicos es complicada, y se hace mediante equipamiento costoso (reómetros). Además, la elevada variación de la viscosidad de las mezclas lo convierte en un método poco práctico y engorroso.

Con objeto de solucionar este problema, se han desarrollado nuevos métodos de medida indirecta con los que se trata de caracterizar las propiedades del HAC en estado fresco. A continuación se citan algunos de los ensayos específicos más habituales:

- *Ensayo de escurrimiento*: es una medida de la capacidad de llenado de la mezcla. Caracteriza la fluidez de la mezcla mediante la medida de la extensión (diámetro) total que alcanza el HAC al fluir libremente sin obstáculos. Se determina mediante el método de ensayo UNE-EN 12350-8¹²⁷ utilizando el cono de Abrams (Figura 2.40).

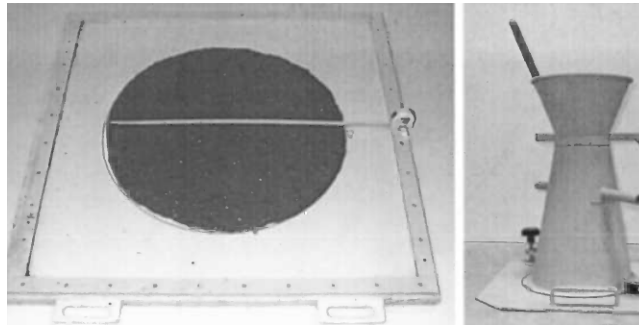


Figura 2.40 Ensayo de escurrimiento¹²⁸.

- *Ensayo de embudo en V*: es una medida de la capacidad de llenado de la mezcla. Caracteriza la viscosidad de la mezcla mediante la medida del tiempo que tarda el hormigón en vaciar un recipiente en forma de V. Se determina mediante el método de ensayo UNE-EN 12350-9¹²⁹ (Figura 2.41).



Figura 2.41 Ensayo del embudo en V.

- *Ensayo de caja en L*: se utiliza para evaluar de la capacidad de paso de la mezcla. Mide, conforme al método de ensayo UNE-EN 12350-10¹³⁰, la capacidad del hormigón de fluir a través de armaduras en un dispositivo formado por una columna de hormigón y una caja horizontal. (Figura 2.42).



Figura 2.42 Ensayo de caja en L¹²⁵.

- *Ensayo de anillo japonés*: también se utiliza para evaluar de la capacidad de paso de la mezcla, midiendo la fluidez y capacidad de paso a través de armaduras conforme al método de ensayo UNE-EN 12350-12¹³¹. Consiste en realizar un ensayo de escurrimiento, pero colocando alrededor del cono un anillo con barras separadas una distancia determinada (Figura 2.43).

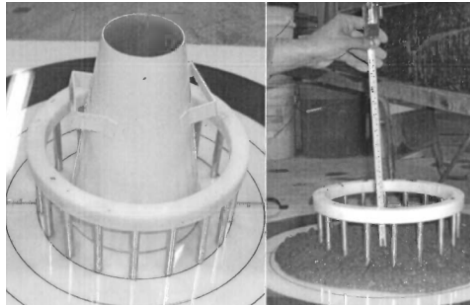


Figura 2.43 Ensayo del anillo japonés¹²⁸.

- *Ensayo de resistencia a la segregación por tamiz*: evalúa la estabilidad de la mezcla de hormigón. Consiste en medir, según el método de ensayo UNE-EN 12350-11¹³², la cantidad de material que atraviesa un tamiz de apertura de malla de 5 mm cuando se deposita sobre él una cantidad determinada de hormigón (Figura 2.44).



Figura 2.44 Ensayo de estabilidad en tamiz¹³³.

- Otros métodos de ensayo refieren a la caracterización en pastas y morteros. Los principales son el *cono de Marsh*, que mide la efectividad del superplastificante, y el *mini-cono*, versión reducida del ensayo de escurrimiento, que mide la capacidad de fluir de un mortero¹²⁶.

2.3.6 Fabricación y puesta en obra

2.3.6.1 Fabricación

Es posible fabricar hormigón autocompactante con cualquiera de los métodos habituales de fabricación, tanto amasadoras como plantas dosificadoras con amasado en camión. Con objeto de asegurar la homogeneidad y la estabilidad de la mezcla, se sugiere la conveniencia de emplear tiempos de amasado superiores a los habituales. La secuencia de amasado es importante, así como un estricto control del contenido en agua total de la mezcla. En este sentido, es necesario un conocimiento preciso de la humedad de los áridos y la estabilidad de los mismos, ya que un cambio menor puede afectar muy negativamente al hormigón.

2.3.6.2 Puesta en obra

Se puede emplear el mismo equipo que se emplea con el hormigón convencional. Sin embargo, al suprimir las operaciones de vibrado, el proceso puede modificarse considerablemente. El bombeo parece el medio óptimo para la puesta en obra del hormigón autocompactante. El hormigón puede ser distribuido mediante conducciones y mangueras, dividiéndose en varias bocas de hormigonado dependiendo de la forma del encofrado.

Sin embargo, es necesario prestar especial atención a los encofrados. Éstos han de ser de buena calidad. Así mismo, la presión del hormigón durante su puesta en obra hace necesario que los encofrados sean cuidadosamente estudiados para evitar que las elevadas presiones del hormigón los desplacen o colapsen. Aunque las últimas experiencias demuestran que la presión del hormigón sobre el encofrado en estado fresco y en reposo es inferior a la hidrostática debido a las propiedades tixotrópicas del mismo, se sigue recomendando el cálculo de los encofrados considerando la presión hidrostática.

Uno de los campos más activos del desarrollo de la tecnología del hormigón autocompactante es el de la planificación y control del proceso de puesta en obra, tanto in situ como en instalaciones de prefabricación. Las características peculiares del hormigón autocompactante hacen que se pueda aumentar considerablemente la productividad mediante un estudio adecuado de los medios de producción y control¹²⁵.

2.3.6.3 Acabados

Una de las ventajas percibidas del empleo de hormigones autocompactantes en general es el de un acabado superficial de muy buena calidad, lo que lo convierte en un candidato muy adecuado para aplicaciones arquitectónicas en las que la estética juega un componente primordial. No obstante, el hecho de emplear un hormigón autocompactante no es garantía absoluta para la obtención de un acabado de calidad, ya que son muchos los aspectos que deben cuidarse, como la composición de la mezcla, el grado de trabajabilidad aun siendo autocompactante, la configuración y el material del encofrado, los agentes desencofrantes (Figura 2.45), o el método de puesta en obra y la velocidad de hormigonado¹³⁴.

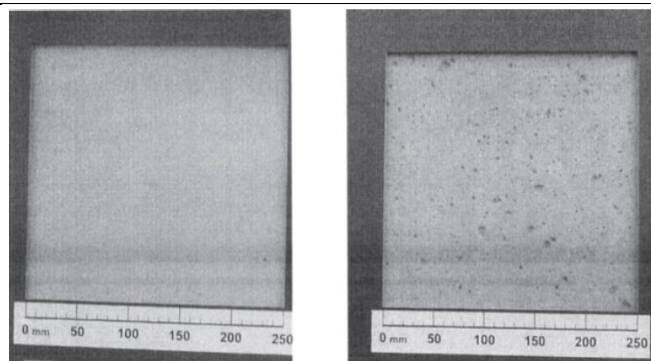


Figura 2.45 Ejemplo de acabado del mismo HAC pero con diferente desencofrante¹³⁴.

2.3.7 Sostenibilidad

Sin duda alguna la mejora de las condiciones de trabajo durante la puesta en obra constituye una de las mayores ventajas del hormigón autocompactante. La eliminación de los pesados vibradores elimina la posibilidad de la aparición del “white fingers” producido por la mala circulación de la sangre a causa de las vibraciones. Así mismo, el nivel acústico desciende enormemente al no emplear cualquiera de los ruidosos aparatos de compactación empleados en el hormigón tradicional.

Esta reducción de ruidos redundará en un menor impacto acústico en caso de que los trabajos se realicen en la cercanía de zonas habitadas. El consumo en energía será así mismo menor. Al reducir también considerablemente los tiempos de puesta en obra, el impacto es mucho menor.

Por otro lado, en los últimos años se está impulsando el empleo de materiales de reciclado como adiciones (cenizas, humo de sílice) que incorporen finos al hormigón, con el consiguiente beneficio medioambiental.

2.3.8 Reglamentación

2.3.8.1 EHE-08

La actual Instrucción de Hormigón EHE-08¹³⁵ contiene, en su Anejo 17, recomendaciones para la utilización del hormigón autocompactante. No obstante es de hacer notar que algunas de estas recomendaciones se citan en el articulado principal como obligatorias.

La caracterización en fresco conforme a la Instrucción española de hormigón estructural EHE-08, en concreto la caracterización de la docilidad de los hormigones objeto de estudio, no puede ser realizada por los medios descritos en el Artículo 31.5 de dicha Instrucción para el hormigón convencional, sino que, tal y como recoge el Artículo 31.5 del Anejo 17 “*Recomendaciones para la Utilización del Hormigón Autocompactante*” de la EHE-08, los hormigones autocompactantes requieren la caracterización de autocompactabilidad a través de métodos de ensayo específicos que permiten evaluar las prestaciones del material en términos de fluidez, resistencia al bloqueo y resistencia a la segregación.

Por tanto, la EHE-08, al igual que la UNE-EN 206-9¹³⁶, considera que la principal diferencia entre los hormigones autocompactantes y los hormigones convencionales radica en su comportamiento en estado fresco, y establece una serie de ensayos como mencionados anteriormente (2.3.5) para comprobar las características de autocompactabilidad.

Es necesario hacer notar que, como España fue un país pionero en el empleo de estos hormigones en Europa, fue de los primeros en normalizar los métodos de ensayo, por lo que las Normas empleadas en la EHE-08 son Normas UNE que, aunque similares, presentan ciertas diferencias con las actuales Normas europeas armonizadas en España (Serie UNE-EN 12350). Estos ensayos son: el escurrimiento (UNE 83361), embudo en V (UNE 83364), anillo japonés (UNE 83362) y caja en L (UNE 83363). El esquema seguido es similar al de la EN 206-9, definiendo unas clases de autocompactabilidad en función de los resultados obtenidos en los ensayos anteriores.

Tabla 2.3 Clases de escurrimiento, EHE-08.

Clase	Criterio, según UNE 83361
AC-E1	$550 \text{ mm} \leq d_f \leq 650 \text{ mm}$
AC-E2	$650 \text{ mm} < d_f \leq 750 \text{ mm}$
AC-E3	$750 \text{ mm} < d_f \leq 850 \text{ mm} (*)$

Tabla 2.4 Clases de viscosidad, EHE-08.

Clase	Criterio por el ensayo de escurrimiento	Criterio alternativo por el ensayo del embudo en V
AC-V1	$2,5 \text{ s} < T_{50} \leq 8 \text{ s}$	$10 \text{ s} \leq T_v \leq 20 \text{ s}$
AC-V2	$2 \text{ s} < T_{50} < 8 \text{ s}$	$6 \text{ s} \leq T_v \leq 10 \text{ s}$
AC-V3	$T_{50} \leq 2 \text{ s} (*)$	$4 \text{ s} \leq T_v \leq 6 \text{ s} (*)$

Tabla 2.5 Clases de resistencia al bloqueo, EHE-08.

Clase	Clase de armado	Criterio por anillo J según UNE 83362	Criterio por caja en L según UNE 83363
AC-RB1	Normal	$d_{Jf} \geq d_f - 50 \text{ mm}$ con un anillo de 12 barras	$\geq 0,80$ con 2 barras
AC-RB2	Muy denso	$d_{Jf} \geq d_f - 50 \text{ mm}$ con un anillo de 20 barras	$\geq 0,80$ con 3 barras

2.3.8.2 EN 206-9

La UNE-EN 206-9 sigue el mismo esquema que la actual EHE-08, clasificando el hormigón según los resultados que da en los ensayos característicos del hormigón autocompactante en estado fresco. Las clases son ligeramente distintas, así como los métodos de ensayo, que se realizan conforme a las Normas UNE-EN. A continuación se referencian las distintas clases que recoge la norma UNE-EN 206-9.

Tabla 2.6 Clases de escurrimiento.

Clase	Escorrimento (mm)
SF1	550 a 650
SF2	660 a 750
SF3	760 a 850

Tabla 2.7 Clases de viscosidad – t_{500} .

Clase	t_{500} (s)
VS1	< 2
VS2	≥ 2

Tabla 2.8 Clases de viscosidad. Embudo en V.

Clase	Tiempo de flujo en el embudo en V (s)
VF1	< 9
VF2	9,0 a 25,0

Tabla 2.9 Clases de capacidad de paso. Caja en L.

Clase	Ratio de la caja en L (-)
PL1	0,80 con dos barras
PL2	0,80 con tres barras

Tabla 2.10 Clases de capacidad de paso – Anillo J.

Clase	Escalón del anillo J (mm)
PJ1	10 con 12 barras
PJ2	10 con 16 barras

3 DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE DOSIFICACIONES DE HACE

3.1 Introducción

El HAC presenta unas propiedades en estado fresco que difieren significativamente del hormigón convencional, presentando igual o mejores prestaciones en el estado endurecido que este último.

Sin embargo, el HAC requiere de una dosificación y un control de los materiales más exhaustivos, ya que, pequeñas variaciones en la proporción de los componentes puede modificar el comportamiento reológico y autocompactable del HAC influenciando esto el posterior desarrollo de propiedades en el estado endurecido.

En esta primera fase se define una dosificación de hormigón autocompactante de referencia, HACE-0%, sobre el que se adicionan tres dosis de aditivo expansivo base sulfoaluminato cálcico DENKA CSA 20 resultando cuatro hormigones autocompactantes sobre los que se determinan las propiedades básicas en fresco y endurecido y se evalúa la influencia que sobre las mismas tiene la adición del mencionado aditivo expansivo en diferentes proporciones.

3.2 Objetivos

Los objetivos de esta fase se definen a continuación:

- Definición de las dosificaciones de partida. Selección de materiales y proporciones de los mismos a emplear.
- Análisis químico elemental y caracterización mineralógica de los materiales de partida: hormigón predosificado SIKACRETE SCC 08 y aditivo expansivo DENKA CSA 20.
- Caracterización básica de las propiedades en fresco. Estudio de la influencia de la dosis de aditivo expansivo en la autocompactabilidad y resto de propiedades en fresco de las mezclas fabricadas.
- Caracterización básica de las propiedades mecánicas. Estudio de la influencia de la dosis de aditivo expansivo en las propiedades de resistencia a compresión, flexión y módulo de elasticidad estático.

3.3 Materiales y equipos

A continuación se definen los materiales y equipos necesarios para ejecutar esta fase de los trabajos.

3.3.1 Materiales

3.3.1.1 Hormigón predosificado

En este estudio, con objeto de garantizar la homogeneidad de los componentes empleados y la uniformidad de las mezclas obtenidas se emplea un hormigón predosificado denominado comercialmente como SIKACRETE-08 SCC suministrado por la empresa SIKA S.A.U.



Figura 3.1 SIKACRETE-08 SCC.

La elección de un hormigón predosificado se realiza con el objeto de garantizar la homogeneidad de los componentes empleados y la uniformidad de las mezclas obtenidas, para asegurar que la magnitud y la velocidad de la expansión sólo se vean condicionadas por la proporción adicionada de material expansivo, y no por el cambio de las proporciones o características físicas y químicas de los componentes del hormigón.

Las características físicas de este material se describen en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Características físicas hormigón predosificado SIKACRETE-08 SCC (obtenidas de la ficha técnica del fabricante).

Referencia	Densidad mezclado con agua (g/cm ³)	Peso saco de material (kg)	Granulometría del árido (mm)	Agua de mezclado por saco (litros)	Resistencia a la compresión (N/mm ²)			Aspecto visual
					1 día	7 días	28 días	
SIKACRETE-08 SCC	2,00 - 2,20	25	0-8	2,5-2,9	> 8	> 25	> 30	Polvo gris

3.3.1.2 Aditivo expansivo

El aditivo expansivo utilizado en esta investigación es el aditivo DENKA CSA 20, producto fabricado a partir de la molienda de un compuesto sinterizado (sulfoaluminato cálcico) que contiene una mezcla concreta de caliza, bauxita y yeso.

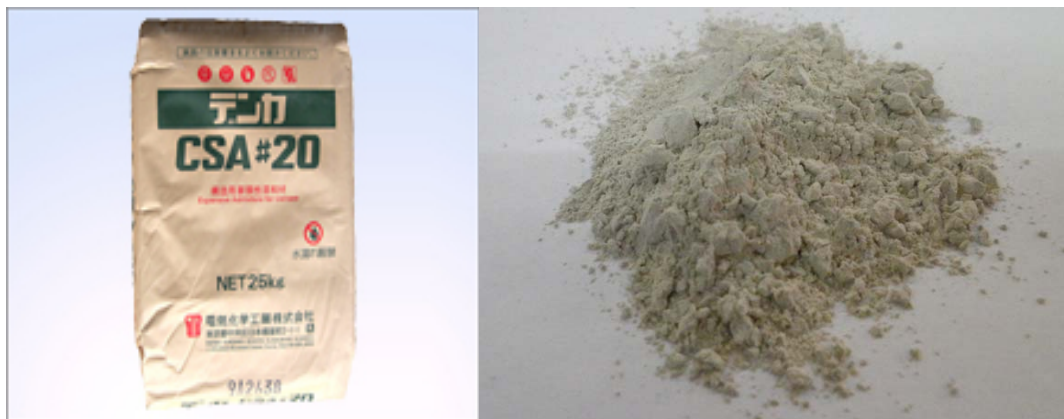


Figura 3.2 DENKA CSA 20.

La composición química del clínker sinterizado DENKA CSA 20 se muestra en la Tabla 3.2, siendo fundamentalmente una mezcla de sulfoaluminato cálcico, óxido de calcio y sulfato cálcico (aditivo expansivo tipo K).

Tabla 3.2 Composición química nominal del aditivo expansivo DENKA CSA 20 (obtenidas de la ficha técnica del fabricante).

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	CaO (%)	CaO libre (%)	Pérdida al fuego (%)	Residuo (%)
1,0 - 2,0	12,0 - 15,0	0,3 - 0,8	0,4 - 2,3	27,0 - 31,0	50,0 - 53,6	17,5 - 22,0	< 3	0,2 - 2,0

El mecanismo de expansión del aditivo expansivo DENKA CSA 20 de basa en la formación de pequeños cristales (varias μm) de Etringita a partir de la hidratación de los minerales componentes.

Las propiedades fundamentales de este aditivo son:

- Prevenir las fisuras de retracción al reducir y compensar la retracción de secado.
- Inducir tensiones de compresión en el hormigón confinado (pretensado químico) al aumentar de volumen y encontrarse la expansión restringida.

En lo que se refiere a la forma de empleo el DENKA CSA 20 se dosifica entre un 8 y un 15% sobre el peso del cemento siendo necesarios ensayos de caracterización de la expansión en cada caso, ya que la composición del cemento utilizado y la presencia de otros elementos o aditivos del hormigón afectan a la magnitud y velocidad de la expansión.

Así mismo es necesario, para lograr una expansión uniforme y controlada, que el amasado de este aditivo expansivo se realice con el resto de componentes en seco antes de la incorporación del agua de amasado.

Las características físicas del aditivo DENKA CSA 20 se muestran en la tabla que sigue:

Tabla 3.3 Características físicas del aditivo expansivo DENKA CSA 20 (obtenidas de la ficha técnica del fabricante).

Densidad (g/cm ³)	Dosificación (%)	Área específica - método Blaine (cm ² /g)	Retenido en tamiz de 1,2 mm (%)	Tiempo de fraguado (h)		Cambio volumétrico (%)		Resistencia a compresión (N/mm ²)		
				Inicial	Final	7 días	28 días	3 días	7 días	28 días
2,90 - 2,95	8 - 15 %	≥ 2000	≤ 0,5	≥ 1	≤ 10	≥ 0,025	≥ -0,015	≥ 12,5	≥ 22,5	≥ 42,5

3.3.2 Equipos de ensayo y medición

3.3.2.1 Espectrómetro de fluorescencia de rayos X-FRX

El equipo utilizado en esta investigación para el análisis químico elemental de los materiales de partida es un espectrómetro de fluorescencia de rayos X por dispersión de longitudes de onda (WDXRF) modelo *S8 TIGER* de Bruker con las características técnicas que siguen: Generador de rayos X de frecuencia intermedia de 4 kW de potencia. (Potencias máximas: tensión: 60 KV, intensidad : 170 mA), Tubo de ventana frontal, ánodo de Rh con ventana ultra fina de 75 µm especial para elementos muy ligeros, colimadores primarios instalados: 0,23 y 0,46 degr, cristales analizadores :LIF (220), LIF (200), PET, XS-55, Filtros: Cu: 0.2, 0.3 mm; Al: 0.8, 0.2, 0.5, 0.1 mm, 0.0125 mm, detector de flujo de gas para elementos ligero, detector de centelle, rango de medida 2θ: 0-148° (Dependiendo del detector utilizado).



Figura 3.3 Equipo FRX, S8 TIGER de Bruker.

3.3.2.2 Equipo de difracción de rayos X-DRX

La determinación de la composición mineralógica en este estudio se lleva a cabo utilizando un equipo de difracción D8 ADVANCE de Bruker (Figura 3.4) cuyo tubo de rayos-X es un ánodo de cobre de 2,2 kW. Posee un generador de tensión de 40 kV, un generador de corriente de 30 mA y una rendija de divergencia variable de 6mm. El ensayo cubre un espectro de ángulo 2θ entre 5° y 60° a una velocidad de paso de $2,37^\circ/\text{min}$, el ensayo completo tiene una duración de 23' 47''.

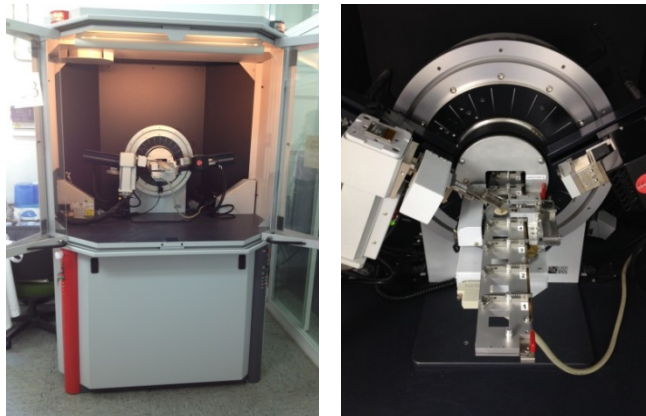


Figura 3.4 Equipo DRX, D8 ADVANCE de Bruker.

3.3.2.3 Equipos de microscopía electrónica de barrido - SEM

La inspección visual de la microestructura de los HACE fabricados se realiza mediante un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FESEM - Field Emission Scanning Electron Microscopy) modelo HITACHI S-4800 (Figura 3.5) con una resolución de 15kV para distancias de trabajo de 4 mm a $1,0 \mu\text{m}$ y de un kV para distancias comprendidas entre 2 mm a $2,0 \mu\text{m}$. Presenta una capacidad de aumentos que varía desde 100x hasta 800.000x en su modo alto de ampliación y entre 30x y 2.000x en su modo bajo de ampliación.

Este microscopio va equipado con un analizador de energías dispersivas de rayos X LINK-ISIS con ventana para la detección de elementos ligeros, resolución de 133 eV o de 1 a 100.000 cps (Mn Ka) y capacidad de proceso de hasta 275.000 cps de salida.



Figura 3.5 Equipo FESEM, HITACHI S-4800.

3.3.2.4 Amasadora planetaria

La mezcla homogénea de componentes del hormigón es esencial para garantizar la uniformidad en las amasadas realizadas. Para llevar a cabo el trabajo de amasado, en esta tesis se emplea una mezcladora planetaria modelo DZ-120V suministrada por la empresa INHERSA S.A. Todas las piezas que la constituyen son de acero resistente al desgaste, consta de un mecanismo agitador ajustable según el tamaño máximo de árido, accionado por un motor-reductor de engranajes rectos paralelos con dentado helicoidal de transmisión directa (sin correas ni eje sin fin).

La elección de esta amasadora se fundamenta en la calidad, rapidez y homogeneidad de amasado que se logra con esta tipología de mezcladoras.



Figura 3.6 Mezcladora DZ-120V.

Las características de la mezcladora DZ-120V se recogen en la tabla que sigue.

Tabla 3.4 Características de la mezcladora DZ 120V.

Capacidad del tambor (litros)	Capacidad de mezcla (litros)	Dimensiones (mm)	Altura de llenado (mm)	Altura de vaciado (mm)	Diámetro del tambor (mm)	Altura del tambor (mm)	Peso (kg)	Motor	Velocidad de giro (r.p.m.)
209	120	958 x 964 x 1315	1315	630	796	400	280	4 kW 400V 50Hz	61

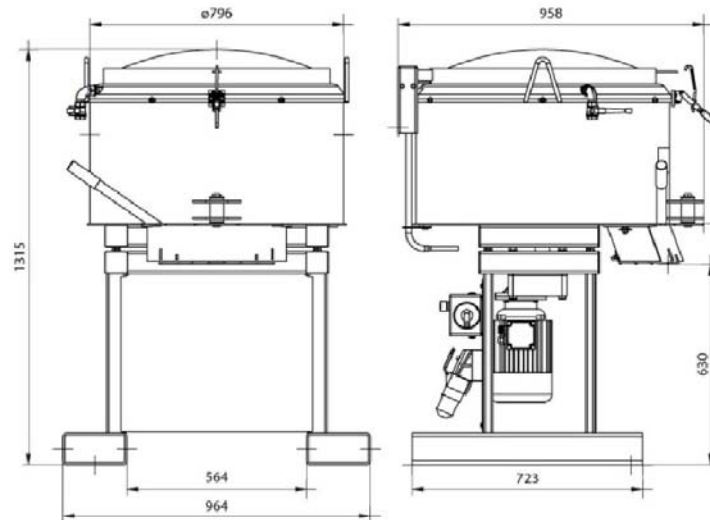


Figura 3.7 Esquema dimensional de la mezcladora DZ-120V.

3.3.2.5 Prensa de 300 toneladas

El dispositivo utilizado para la realización de ensayos mecánicos sobre probetas de hormigón en esta investigación es una prensa MEH-3000-W suministrada por la empresa S.A.E. IBERTEST que se compone de tres partes claramente diferenciadas: zona de ensayo, grupo hidráulico y sistema de control y adquisición de datos denominados "Wintest32".



Figura 3.8 Instalación de ensayos MEH-3000-W.

Su capacidad de carga, 3000 kN, se consigue mediante presión hidráulica sobre el pistón de la zona de ensayos, permitiendo llevar a cabo ensayos sobre probetas normalizadas de hormigón tanto de resistencias medias como altas. El diseño del marco se ha realizado para obtener una rigidez alta, que permita que en los momentos de rotura de las probetas, sea el marco el que absorba el 100% de toda la energía liberada en el ensayo.

La instalación se controla mediante un ordenador compatible que, con el software adecuado, permite el control integral y de forma automática, tanto de los propios ensayos como de su gestión posterior.

Las características de este sistema de ensayo se referencian a continuación.

Tabla 3.5 Características de la instalación de ensayos MEH-3000-W.

Capacidad de carga (kN)	Clase según ISO 7500	Escalas	Distancia máxima entre platos (mm)	Diámetro de platos (mm)	Carrera del pistón (mm)	Dimensiones (mm)
3000	Clase 1	1/1 - 1/5 - 1/10	330	325	60	1670 x 715 x 655

3.4 Metodología

El programa experimental y métodos de ensayo que se exponen en los apartados siguientes recogen de forma detallada la metodología empleada para dar cumplimiento a los objetivos planteados en el apartado 3.2 de este documento.

3.4.1 Identificación de la composición básica y fases mineralógicas de los elementos de partida y los HACE

3.4.1.1 Análisis químico elemental de los materiales de partida - FRX

El análisis químico elemental de los materiales de partida, hormigón predosificado SIKACRETE 08 SCC y aditivo expansivo DENKA CSA 20, se determina mediante Fluorescencia de Rayos-X (FRX), técnica espectroscópica que utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X.

Esta técnica es diferente al método de difracción de rayos x ya que en lugar de compuestos o fases lo que identifica y estima son los elementos componentes.

La aplicación de FRX para la identificación de la composición de los materiales tiene como finalidad principal el análisis químico elemental (permite identificar y estimar únicamente el porcentaje de los óxidos considerados aisladamente en su composición), tanto cualitativo como cuantitativo, de los elementos comprendidos entre el flúor (F) y el uranio (U) de muestras sólidas.

En el caso que nos ocupa se realiza un análisis químico elemental semicuantitativo de los materiales de partida mediante el espectrómetro de fluorescencia de rayos X referenciado en el apartado 3.3.2.1.

El ensayo de FRX se lleva a cabo sobre una fracción de muestra en polvo de tamaño máximo de partícula ($T_{\text{máx}}$) < 80 μm (en el caso del hormigón se hace necesario una reducción previa de la muestra por machaqueo) pudiéndose realizar de dos modos:

- En perla, donde la muestras se mezcla con un fundente, metaborato de Li (34%) y tetraborato de Li (66%), donde se funde al ser calentado hasta los 1050°C.
- En pastilla, se mezcla la muestra con una cera orgánica Hoechst que hace de conglomerante, y se coloca en una capsula de platino con una base de ácido bórico que se somete a un presión de 2500 kN.

El modo mencionado en el apartado a) es el más apropiado y preciso cuando la muestra de la que se dispone se trata de un cemento convencional ya que se puede aproximar a rectas de calibrado sancionadas por la práctica. Sin embargo, en nuestro caso, al ser dos materiales poco convencionales se opta por realizar el ensayo de FRX sobre muestras en pastillas.

Así mismo, para completar el análisis químico de los materiales de partida, se determinan otra serie de variables conforme a los métodos de ensayo que figuran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Análisis químicos - Métodos de ensayo.

MÉTODO	ENSAYO
UNE 8015	Pérdida al fuego (PF)
UNE 196-2	Residuo insoluble (RI)
UNE 196-2	Contenido en sulfatos y en SiO ₂
UNE 80230	Contenido en óxidos de hierro, aluminio, calcio y magnesio
UNE 80243	Contenido en CaO libre
	La concentración de álcalis se determinó mediante espectroscopía de emisión atómica (AES) con un equipo Perkin Elmer modelo 1100B

3.4.1.2 Determinación de la composición mineralógica - DRX

La determinación de la composición mineralógica de los materiales de partida y la evolución de las fases cristalinas de los HACEs fabricados a las edades de hidratación de 1, 3, 7 y 28 días se realiza mediante Difracción de Rayos-X (DRX), técnica que proporciona información sobre las fases cristalinas formadas en el proceso de hidratación del cemento de forma cualitativa y cuantitativa (usando patrones) siendo muy adecuada para identificar fases cristalinas en sólidos.

En esta técnica de caracterización si un mineral cristalino está expuesto a una fuente de rayos X de una longitud de onda determinada, las capas de átomos difractan estos rayos y producen un patrón de picos, que es característico de cada mineral. La escala horizontal de un patrón típico de difracción de rayos X representa el espaciado de la red cristalina (ángulo de difracción), y la escala vertical reproduce la intensidad del rayo difractado (altura del pico). Cuando la muestra a ser examinada contiene más de un mineral, la intensidad de los picos características de los minerales individuales es proporcional a su cantidad⁶², si bien un mismo pico puede tener componentes de distintas fases cristalinas.

La identificación mineralógica se realiza por comparación con la base de datos de patrones de las distintas sustancias que anualmente publica el International Centre for Diffraction Data (ICDD)⁵⁸. En nuestro caso los patrones empleados para la identificación de las fases mayoritarias que componen los elementos objeto de estudio se presentan en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Fases mineralógicas y patrones referencia.

Nombre	Identificación en difractograma	Patrón ICDD PDF No.	Fase mineralógica*
Ye' elemita	Y	00-033-0256	$C_4A_3\check{S}$
Anhidrita/Sulfato Cálcico anhidro	A	00-037-1496	$C\check{S}$
Etringita	E	00-041-1451	$C_6A_2\check{S}_3H_{32}$
Monosulfoaluminato	M	00-011-0179	$C_4A\check{S}H_{12}$
Portlandita	P	01-084-1265	$Ca(OH)_2$
Sílice	Si	01-077-1060	SiO_2
Silicato cálcico	CS	00-042-0551	Ca_3SiO_5
Brownmillerite, Calcium Aluminum Iron Oxide	B	00-030-0226	$Ca_2(Al,Fe+3)_2O_5$
Aluminum Magnesium	AM	00-040-0903	Mg_2Al_3

*Para facilitar la referencia a las distintas fases se utilizan las siguientes abreviaturas: CaO = C; Al_2O_3 = A; SO_3 = \check{S} ; H_2O = H; SiO_2 = S; Fe_2O_3 = F

El ensayo de DRX se realiza sobre una fracción de muestra en polvo de $T_{m\acute{a}x} < 80\mu m$ que se coloca en un portamuestras de metacrilato tomando la precaución de que la superficie quede totalmente plana para que pueda ser medida de forma efectiva una vez se introduzca en el difractor. Las muestras analizadas se referencian en la Tabla 3.8:

Tabla 3.8 Muestras para ensayo DRX.

Amasada	Día 1		Día 3		Día 7		Día 28	
0%	0-1	0-1 film	0-3	0-3 film	0-7	0-7 film	0-28	0-28 film
10%	10-1	10-1 film	10-3	10-3 film	10-7	10-7 film	10-28	10-28 film
15%	15-1	15-1 film	15-3	15-3 film	15-7	15-7 film	15-28	15-28 film
50%	50-1	50-1 film	50-3	50-3 film	50-7	50-7 film	50-28	50-28 film

3.4.1.3 Microscopia electrónica de barrido-BSEM y microanálisis-EDS

El examen visual y análisis de compuestos de las muestras de HACE fabricadas a las edades de hidratación de 1, 3, 7 y 28 días se realiza empleando un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FESEM) equipado con un analizador de energías dispersivas permitiendo monitorizar las muestras, analizarlas mediante microanálisis de rayos X (EDS) y medirlas usando análisis digital de imágenes.

La microscopia electrónica de barrido se fundamenta, a nivel básico, en un haz de electrones primarios que golpean sobre un sólido de tal forma que dichos electrones son reflejados (dispersados) o absorbidos, produciendo diversas señales. Los modos más frecuentes de observación en el microscopio electrónico implican la captura de electrones secundarios (SEM) y retrodispersados (BSE), mientras que las técnicas de microanálisis más comúnmente usadas, basadas en la detección de los rayos X, son el análisis de rayos X de dispersión por longitud de onda y análisis dispersivo (WD).

En esta investigación el análisis visual de la superficie de fractura se realiza por SEM (Microscopia electrónica de barrido con detector de electrones secundarios de baja energía-20 eV.) y por BSE (microscopia electrónica de barrido con detector de electrones retrodispersados-50eV.) Los espectros de los elementos presentes en la muestras se obtienen mediante microanálisis puntuales EDS (Análisis por dispersión de energía de rayos X).

Las muestras analizadas son las referidas en el apartado anterior en la Tabla 3.8.

3.4.1.4 Toma de muestras. Preparación de muestra para el estudio de especímenes hidratados en distinto grado en DRX y BSEM/EDS

Los materiales de partida no demandan un tratamiento adicional al tamizado por el tamiz de 80 μm para su posterior análisis mediante las técnicas de caracterización especificadas en los apartados anteriores, salvo en el caso del hormigón predosificado que requiere de machaqueo y molienda previa para poder reducir el árido silíceo al tamaño adecuado.

Para la realización del estudio de los HACE en sus distintas etapas de hidratación se procede a la fabricación de 4 amasadas de HACE con las siguientes dosis de aditivo expansivo: 0%, 10%, 15% y 50%.

Por cada amasada se obtienen 4 muestras de unos 150 cm^3 , 2 protegidas con film y 2 sin film. Estas últimas muestras se desmoldan completamente a las 24 horas y se sumergen en agua. Tanto las muestras con film como sin film se conservan en cámara húmeda durante un periodo máximo de 28 días en unas condiciones de curado de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura y $50 \pm 5\%$ de humedad relativa. A las edades de 1, 3, 7 y 28 días se extraen la cantidad necesaria de muestra para poder llevar a cabo los ensayos correspondientes.

El análisis de los productos de hidratación en DRX y BSEM/EDS exige una preparación muy cuidadosa de las muestras, ya que, los estudios a edades concretas de hidratación y los especímenes a menudo pueden alterarse al interactuar con otros compuestos presentes en el medio.

Previo a la realización del análisis, para asegurar que el tiempo de curado al que se realizaban las determinaciones eran los mismos, se intentó detener la hidratación de las hormigones (“congelación de la pasta”) a las edades señaladas de 1, 3, 7 y 28 días.

El proceso para la obtención de muestras de ensayo es el que sigue:

- A cada edad objeto de estudio, se extraen dos fragmentos de dimensiones próximas a 1 x 1 x 1 cm de cada HACE fabricado, obteniéndose así dos muestras. Ambas se introducen en un recipiente y se sumergen en alcohol isopropílico durante al menos 25 minutos para detener la hidratación (Figura 3.9).



Figura 3.9 Muestra obtenida por machaqueo (izquierda). Conservación en isopropílico (derecha).

- Pasado este tiempo, una muestra se muele en húmedo, con cuidado de que no se seque para evitar la carbonatación, hasta una finura inferior a $80\ \mu\text{m}$ (muestra destinada a ensayo DRX). La otra muestra, reservada para el ensayo BSEM/EDS, permanece intacta pero prolongando su tiempo de inmersión en el isopropílico.
- Tras la molienda, se filtran las muestras añadiendo etanol y posteriormente acetona, haciendo pasar los disolventes a través de las muestras mediante vacío. De este modo, se pretende asegurar la edad de la pasta de cemento a la hora de realizar el ensayo. En el caso de las muestras observadas por microscopía electrónica, la congelación de las pastas se llevó a cabo sin molerlas, aumentando el tiempo de contacto entre la pasta y el etanol.
- Realizadas estas operaciones y una vez secas, se dispone la muestra en polvo prensada en una pastilla para ensayar por DRX y la muestra sin moler se embute, pule y metaliza para su posterior ensayo por BSEM/EDS (Figura 3.10).

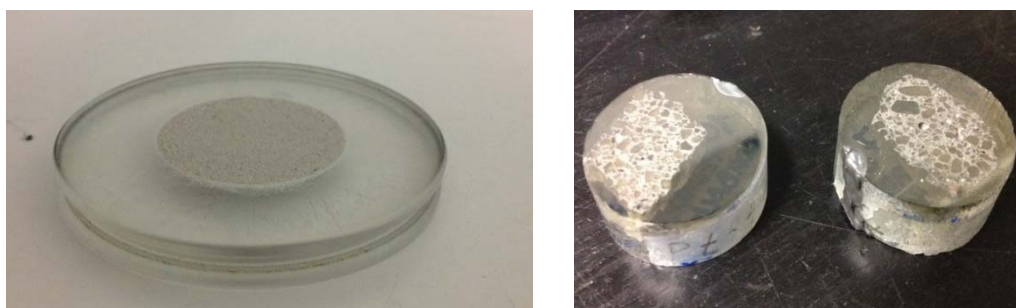


Figura 3.10 Muestra ensayo DRX (izquierda). Muestra ensayo BSEM/EDS (derecha).

3.4.2 Diseño teórico y definición de dosificaciones de HACE

El diseño y definición de las dosificaciones de HACE se realiza partiendo de un hormigón predosificado por una casa comercial sobre el que se determina una relación agua/hormigón que garantice la autocompactabilidad.

Las dosis de aditivo expansivo base sulfoaluminato cálcico DENKA CSA 20 escogidas en esta investigación son tres; por un lado se fijan dosis del 10% y 15% a partir de criterios teóricos y dentro de los márgenes fijados por el fabricante (8-15% sobre el peso del cemento) y por otro, se establece una dosis del 50%, proporción que se selecciona con la intención comprobar el posible efecto pernicioso y patológico que una sobredosificación de este tipo de aditivo expansivo puede causar en los hormigones que la contienen.

Ha de tenerse en cuenta que al ser un hormigón predosificado suministrado por una casa comercial se desconoce el peso real del cemento en su composición. En esta investigación se estima una dosificación de cemento del 20% en peso por cada saco de hormigón predosificado.

Teniendo en cuenta lo expuesto, en la tabla que sigue se referencian las dosificaciones motivo de investigación.

Tabla 3.9 Dosificación de componentes para 1m³ de hormigón.

MATERIALES	HACE-0%	HACE-10%	HACE-15%	HACE-50%
Sikacrete 08 SCC (kg)	1935,5	1935,5	1935,5	1935,5
Agua (litros)	224,5	224,5	224,5	224,5
Aditivo DENKA CSA 20 (kg)	0,0	38,7	58,1	193,6
Relación A/C*	0,580	0,580	0,580	0,580
Relación A/Hormigón*	0,116	0,116	0,116	0,116
DENKA CSA 20 (%)	0%	10%	15%	50%

**las relaciones aquí expuestas no incluyen el aditivo expansivo*

Establecer un protocolo de amasado es una operación fundamental cuando se adicionan al hormigón productos expansivos basados en sulfoaluminato cálcico, como es el caso del aditivo expansivo DENKA CSA 20, ya que, por un lado, un amasado deficiente no distribuye homogéneamente los materiales dando lugar a la generación de unas deformaciones no uniformes, y por otro, un amasado prolongado disminuye la acción expansiva del aditivo adicionado debido a que la propia acción de amasado favorece o acelera la hidratación del compuesto expansivo (Etringita) cuando el hormigón aún se encuentra en estado plástico o semiplástico perdiéndose por ello parte de la acción expansiva.

Teniendo en cuenta las recomendaciones del fabricante del hormigón predosificado en lo que a tiempos se amasado se refiere, así como a lo recogido en el párrafo anterior y en el apartado 2.2.7.8 de este documento, se establece, para las dosificaciones referenciadas en la Tabla 3.9, el siguiente protocolo de amasado:

1. Premezclado en seco durante 1 minuto: El hormigón predosificado y el aditivo expansivo, en la dosis que corresponda, se incorporan a la amasadora y se mezclan durante el tiempo referido con la finalidad de homogeneizar la distribución de los componentes de partida y evitar así posibles expansiones no uniformes o fuera de control.
2. Amasado del hormigón durante 3 minutos: una vez mezclados los componentes secos se incorpora el agua de amasado y se bate el conjunto durante un tiempo de tres minutos.

3.4.3 Caracterización del estado fresco de los HACE

La caracterización del estado fresco de los HACE diseñados se realiza determinando, a través de métodos de ensayo recogidos en normativa UNE-EN, las características que definen la autocompactabilidad, el contenido de aire y la densidad en estado fresco.

La autocompactabilidad es la característica que define a un hormigón que se compacta por la acción de su propio peso sin necesidad de energía de vibración o cualquier otro método de compactación, siendo esta característica indispensable para garantizar un correcto llenado de espacios de difícil acceso como sería el caso del espacio comprendido entre una camisa de refuerzo prefabricada y el pilar o columna a reforzar. De ahí, la importancia de determinar y conseguir esta propiedad en los hormigones objeto de diseño.

Los métodos de ensayo empleados en esta investigación para evaluar la autocompactabilidad y prestaciones reológicas en términos de fluidez, viscosidad y capacidad de llenado son los que recoge la tabla que sigue.

Tabla 3.10 Ensayos de caracterización de la autocompactabilidad.

TIPO DE ENSAYO	MÉTODO	ENSAYO
ENSAYOS DE HORMIGÓN FRESCO	UNE EN 12350-8	Ensayos de hormigón fresco. Parte 8: Hormigón autocompactante. Ensayo del escurrimiento.
	UNE EN 12350-9	Ensayos de hormigón fresco. Parte 9: Hormigón autocompactante. Ensayo del embudo en V.

Así mismo, para completar la caracterización en fresco de los hormigones diseñados se determinan las características de densidad en fresco y contenido de aire siguiendo los métodos de ensayo recogidos en la tabla que sigue.

Tabla 3.11 Ensayos de caracterización de la densidad y contenido de aire.

TIPO DE ENSAYO	MÉTODO	ENSAYO
ENSAYOS DE HORMIGÓN FRESCO	UNE-EN 12350-6 ¹³⁷	Ensayos de hormigón fresco. Parte 6: Determinación de la densidad.
	UNE-EN 12350-7 ¹³⁸	Ensayos de hormigón fresco. Parte 7: Determinación del contenido de aire. Métodos de presión.

Con objeto de evaluar la influencia de la adición en distintas dosis del aditivo expansivo DENKA CSA 20 sobre las características en estado fresco, estos ensayos se realizan sobre cada una de las dosificaciones que recoge la Tabla 3.9.

3.4.4 Caracterización del estado endurecido. Propiedades mecánicas

La caracterización del estado endurecido de los hormigones diseñados se realiza determinando, a través de métodos de ensayo recogidos en normativa UNE, UNE-EN y ASTM, las características mecánicas de resistencia a compresión, flexión y módulo de elasticidad estático, también denominado módulo secante.

La resistencia del hormigón a compresión, según el Artículo 31.3 *Características mecánicas* de la EHE-08, se refiere a los resultados obtenidos en ensayos de rotura a compresión a 28 días, realizados sobre probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura, fabricadas y conservadas conforme a lo establecido en la norma UNE-EN 12390-2 y ensayadas conforme a la norma UNE-EN 12390-3.

En esta investigación la resistencia a compresión de cada HACE fabricado se determina sobre 4 probetas cilíndricas de dimensiones 150 mm x 300 mm, ensayándose 2 probetas a la edad de 7 días y otras dos a la edad de 28 días, mientras que la determinación del módulo de elasticidad estático se realiza a partir del valor de resistencia medio obtenido a 28 días sobre 2 probetas cilíndricas de dimensiones 150 mm x 300 mm a la edad de 28 días obtenidas de la misma amasada.

Por otro lado, al tratarse de un hormigón destinado al relleno de espacios con espesores no superiores a 50 mm, también se determinan las propiedades mecánicas de flexión y compresión sobre probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm a 7 y 28 días.

Todas las probetas destinadas a la caracterización mecánica de los HACE diseñados son curadas en cámara, con una humedad relativa $\geq 95\%$ y temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$, hasta la edad de ensayo.

Así mismo, hasta la edad de 28 días, se fabrica una serie de probetas prismáticas adicional de $40 \times 40 \times 160$ mm, conservadas en cámara con envoltura de film de polipropileno, con objeto de determinar qué efecto tiene sobre las características mecánicas de flexión y compresión la interposición de un elemento que impida la pérdida y ganancia de humedad con el ambiente, consiguiéndose de esta forma simular las condiciones de curado de un hormigón que rellena el espacio comprendido entre un encamisado prefabricado de refuerzo exterior y el pilar objeto de refuerzo.

Como particularidad de la metodología seguida para determinar el módulo de elasticidad estático en compresión decir que se emplea como base de ensayo el método recogido en la norma UNE 83316 pero utilizando como elemento para medir las deformaciones longitudinales el dispositivo de ensayo denominado compresómetro referenciado en la norma americana ASTM C469.

Este compresómetro se usa para determinar la deformación longitudinal de probetas cilíndricas y consiste en un reloj analógico de precisión $0,001$ mm situado entre dos anillos de acero, separados por unas barras espaciadoras, que se anclan mecánicamente a la probeta de hormigón. En el reloj se pueden leer las deformaciones longitudinales que sufre la probeta cuando es sometida a tres ciclos de carga-descarga siendo la carga máxima del ciclo de $1/3$ de la carga máxima registrada en el ensayo a compresión.



Figura 3.11 Probeta cilíndrica instrumentada con compresómetro ASTM C469.

La Tabla 3.12 recoge los métodos de ensayo seguidos para la determinación de las propiedades mecánicas mencionadas.

Tabla 3.12 Ensayos de caracterización de las propiedades mecánicas.

TIPO DE ENSAYO	MÉTODO	ENSAYO
ENSAYOS DE HORMIGÓN ENDURECIDO	UNE-EN 12390-2 ¹³⁹	Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia.
	UNE-EN 12390-3 ¹⁴⁰	Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.
	UNE-EN 1015-11 ¹⁴¹	Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido
	UNE 83316 ¹⁴²	Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión.
	ASTM C469 ¹⁴³	Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression

Con objeto de evaluar la influencia de la adición en distintas dosis del aditivo expansivo DENKA CSA 20 sobre las propiedades mecánicas, estos ensayos se realizan sobre cada una de las dosificaciones que recoge la Tabla 3.9.

3.5 Resultados y discusión

En los apartados que siguen se detallan los resultados obtenidos:

3.5.1 Análisis químico elemental y determinación de la composición mineralógica

3.5.1.1 Análisis químico elemental de los materiales de partida - FRX

La Tabla 3.13 recoge la composición química, obtenida mediante fluorescencia de rayos X, de las muestras de aditivo expansivo DENKA CSA 20 y de hormigón predosificado SIKACRETE SCC 08.

Tabla 3.13 Composición química elemental del aditivo expansivo y del hormigón predosificado.

Compuesto	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	CaO (%)	CaO libre (%)	CaO total (%)	Pérdida al fuego (%)	Residuo insoluble (%)	SO ₃ (%)
DENKA CSA 20	1,7	12,1	0,5	1,2	27,0	55,4	15,6	71,0	1,6	0,5	27,9
SIKACRETE 08 SCC	60,3	3,1	1,9	0,9	1,5	29,6	0,7	30,2	2,1	42,9	1,4

Conforme a los resultados obtenidos se comprueba que los principales componentes del aditivo expansivo DENKA CSA 20 son efectivamente alúmina, sulfato y óxido de calcio, correspondiendo las proporciones determinadas en el ensayo de FRX con los rangos nominales especificados por el fabricante (Tabla 3.2).

Así mismo, en el hormigón predosificado se aprecia un alto porcentaje de óxido de calcio, que se atribuye al cemento y quizás a una posible adición de filler calizo que este pudiera llevar, y de sílice, indicativo del tipo de árido que incorpora el hormigón predosificado.

3.5.1.2 Determinación de la composición mineralógica – Difracción de Rayos X (DRX)

La determinación de la composición mineralógica de los materiales de partida, hormigón predosificado SIKACRETE SCC08 y aditivo expansivo DENKA CSA 20, se presenta en los difractogramas de la Figura 3.12 y la Figura 3.13, respectivamente.

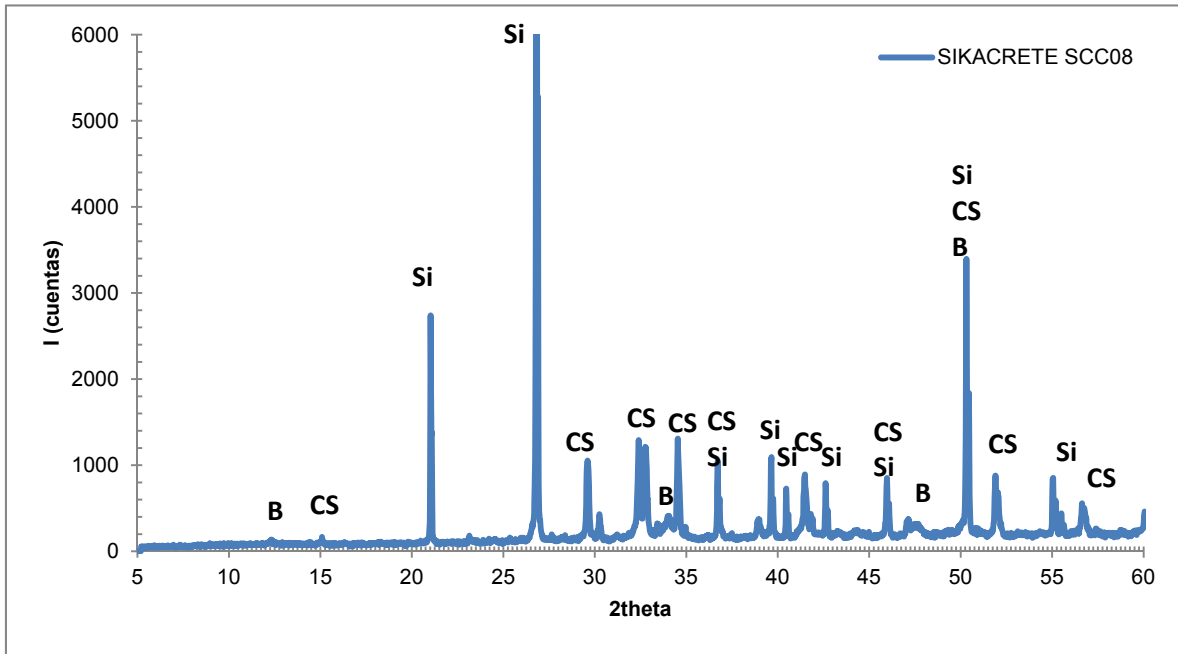


Figura 3.12 Difractograma del hormigón predosificado SIKACRETE SCC08.

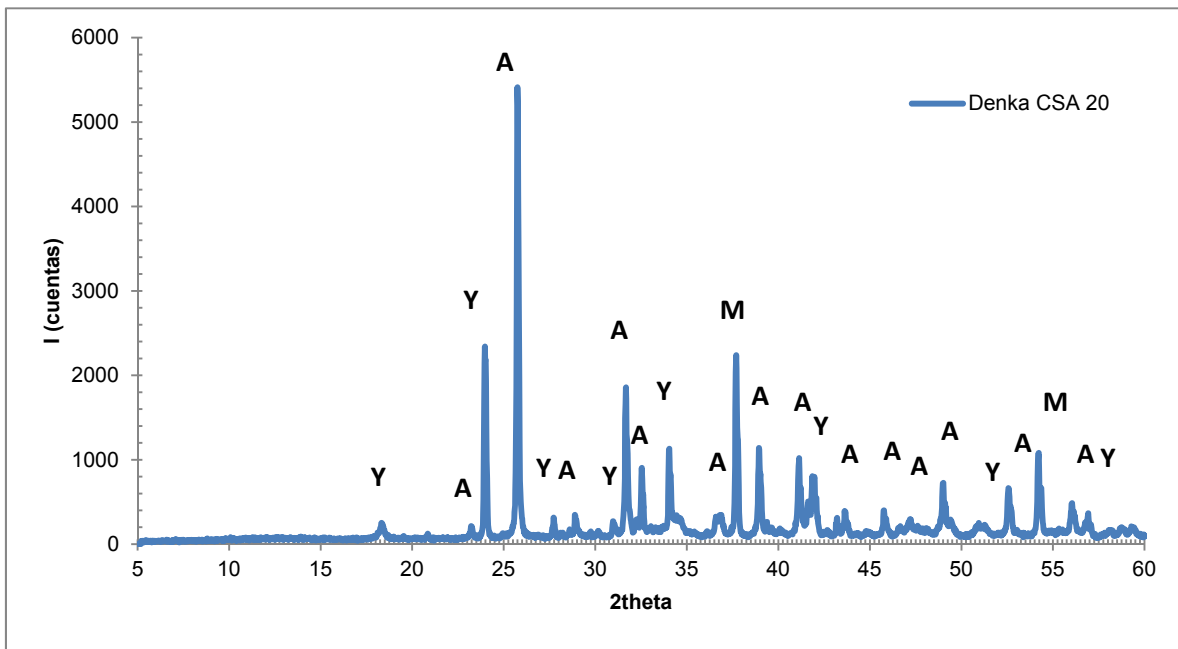


Figura 3.13 Difractograma del aditivo expansivo DENKA CSA 20.

El difractograma del hormigón predosificado presenta un espectro compuesto fundamentalmente del componente inerte de sílice (naturaleza del árido) y una fase anhidra principal de silicatos cálcicos (alita- C_3S y Belita- C_2S), de presencia habitual en cualquier cemento portland convencional (OPC). Como componente minoritario se detecta brownmillerita (C_4AF).

En el caso del aditivo expansivo, las fases cristalinas anhidras principales que predominan en el espectro son las relativas al sulfato cálcico anhidro (Anhidrita- $CaSO_4$) y a la Ye'elemita ($C_4A_3\check{S}$) sulfoaluminato cálcico también denominado partícula de Klein⁶⁸. En menor proporción se detecta la presencia de compuestos de aluminio y/o calcio combinados con magnesio.

El análisis de difracción de rayos X sobre las mezclas propuestas de HACE a distintas edades de hidratación se centra en evaluar la evolución en el tiempo de las principales fases anhidras (Ye'elemita- $C_4A_3\check{S}$) e hidratadas (Etringita- $C_6A_3\check{S}_3H_{32}$ y Monosulfato- $C_4A\check{S}H_{12}$) relativas a los sulfoaluminatos cálcicos, fases relacionadas en principio con los mecanismos de expansión.

El análisis por DRX de las muestras hidratadas se centra sobre el intervalo 5-25 2θ , intervalo donde se presentan, de forma mayoritaria, las distintas fases anhidras e hidratadas implicadas en los procesos de expansión detectados.

En los difractogramas correspondientes a los HACEs que incorporan aditivo expansivo (HACE-10%, HACE-15% y HACE-50%) se localiza en los primeros días de hidratación un pico correspondiente a la fase anhidra Ye'elemita- $C_4A_3\check{S}$ (ángulo 23,6 2θ), pico que, no se localiza en la mezcla de HACE-0%, hecho lógico, ya que, esta fase anhidra se corresponde con la adición del aditivo expansivo base sulfoaluminato cálcico (Figura 3.14).

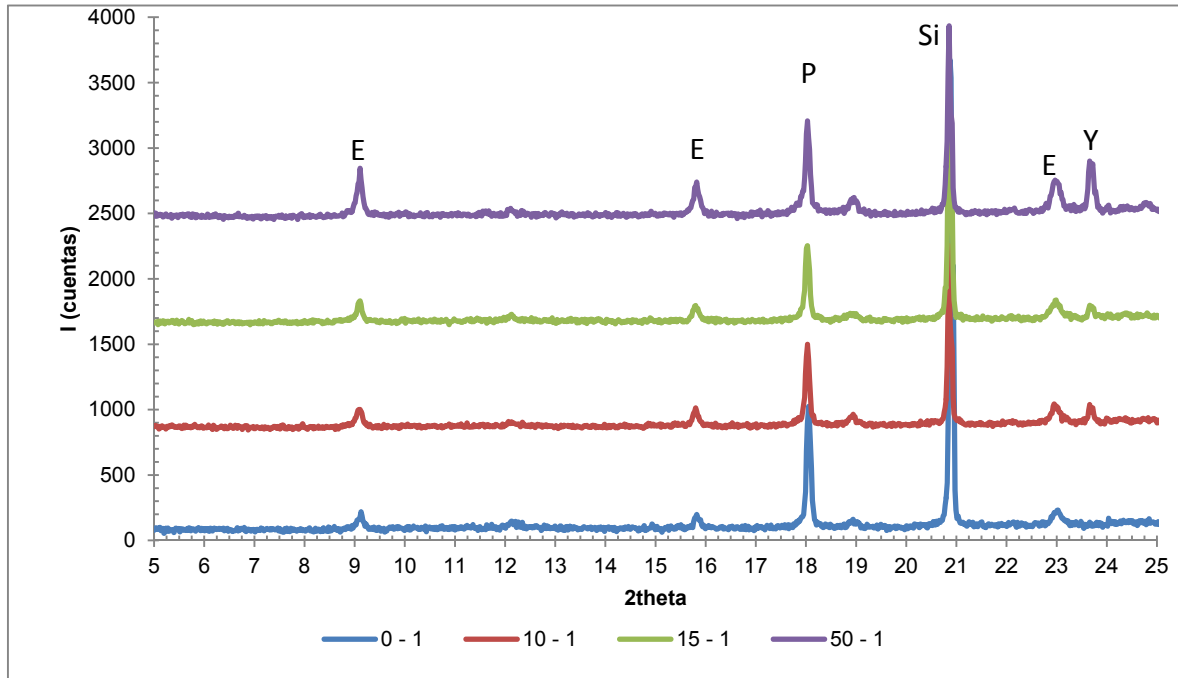


Figura 3.14 Difractograma de las mezclas de HACE sin film a la edad de hidratación de 1 día.

La presencia de Ye'elemita disminuye a medida que aumenta la edad de hidratación hasta no ser apreciable a partir del día 3, en el caso de los HACE-10% (Figura 3.15), y del día 7, en los HACE-15% (Figura 3.16). Este comportamiento se reproduce en las dos condiciones de curado

planteadas (con y sin film) demostrándose que, incluso sin aporte externo de agua, el agua de composición de las mezclas de hormigón es suficiente para llevar a cabo la hidratación del compuesto expansivo anhidro Ye'elemita para las proporciones de aditivo expansivo del 10% y el 15%. Como caso particular, mencionar que la única muestra que presenta en su difractograma presencia de Ye'elemita a la edad de 28 días es la correspondiente al HACE-50% con envoltura de film, lo que supone que el agua de amasado no es suficiente para llevar a cabo la hidratación completa del anhidro Ye'elemita cuando el aditivo expansivo se incorpora en la dosis del 50% (Figura 3.17).

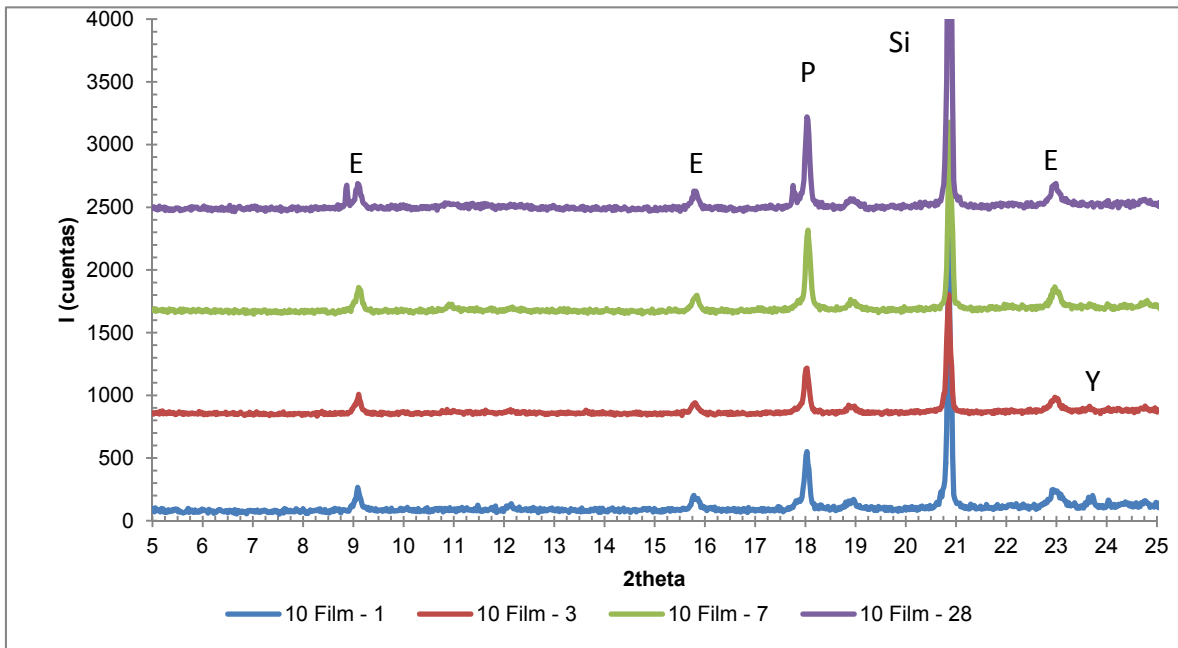


Figura 3.15 Difractograma mezcla HACE-10% con film – evolución con la edad de hidratación.

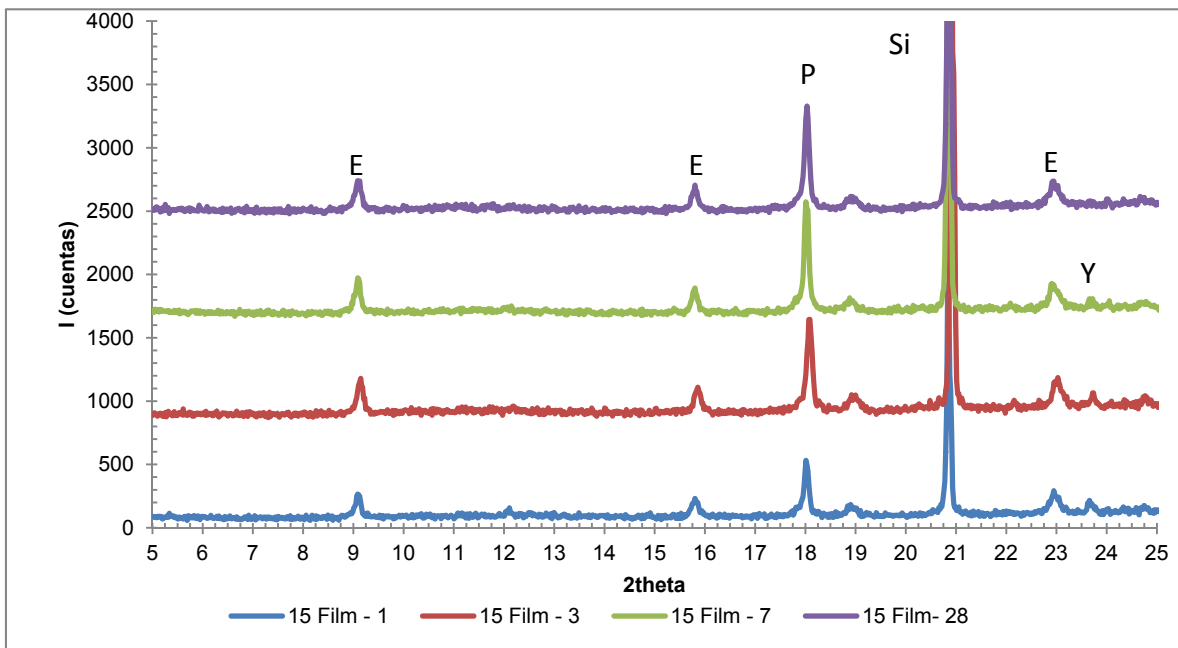


Figura 3.16 Difractograma mezcla HACE-15% con film – evolución con la edad de hidratación.

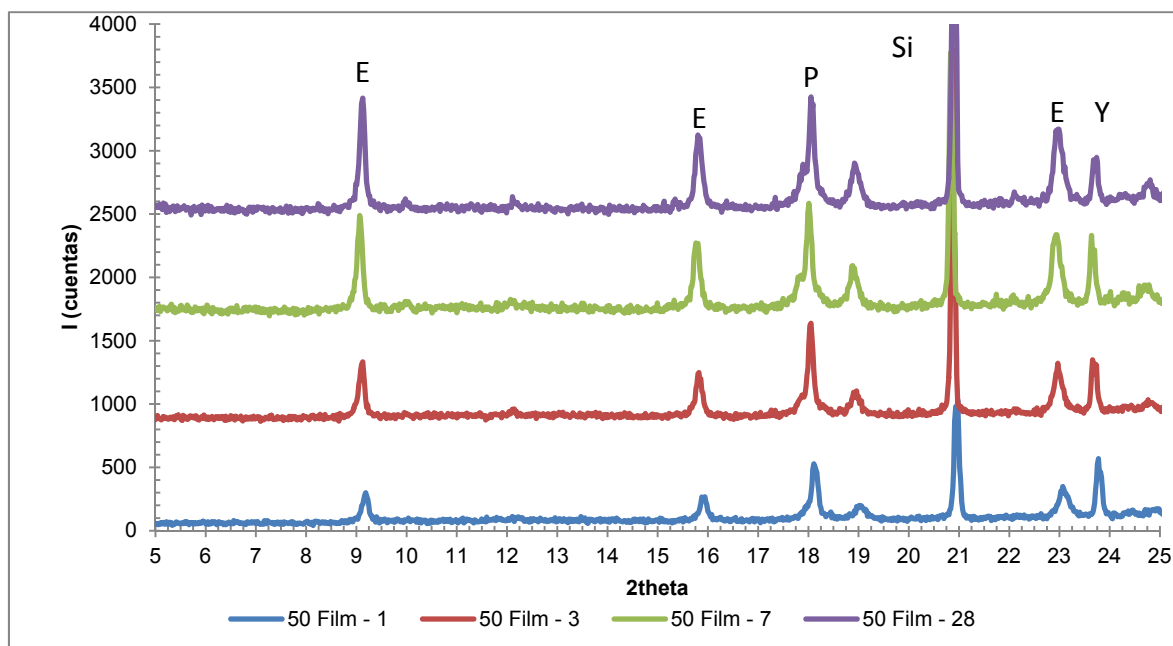


Figura 3.17 Difractograma mezcla HACE-50% con film – evolución con la edad de hidratación.

El mecanismo de expansión, en el caso de cementos/aditivos base sulfoaluminato cálcico como el empleado en esta investigación, no está bien definido en la literatura, ya que responde a múltiples teorías (Apartado 2.2.6). Sin embargo, sí que está aceptado que la expansión se produce por la formación de Etringita. En este punto cabe aclarar que también existe controversia a la hora de determinar la morfología de la Etringita responsable de la expansión, dado que unos autores defienden que la morfología es la habitual en materiales convencionales base OPC (cemento portland convencional), basada en acículas prismáticas de gran esbeltez con estructura cristalina definida, y otros ponderan que la Etringita responsable de la expansión se forma en presencia de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y posee una morfología coloidal (carácter amorfo)⁸⁵.

En los difractogramas de rayos X de las muestras de HACE fabricadas, tanto con aditivo expansivo como sin él, se detecta la presencia de la fase cristalina Etringita desde las edades iniciales de hidratación. En este caso, y aunque la técnica no permita cuantificar con exactitud la proporción concreta de Etringita de cada muestra, sí se puede estimar de un modo semicuantitativo este contenido a partir de los DRX llevados a cabo. Así, se detecta una pequeña variación en el % de esta fase cristalina entre las muestras con aditivo expansivo y sin él, siendo superior en las muestras con aditivo expansivo (Figura 3.14).

A nivel comparativo, en las mezclas HACE-10% y HACE-15% la proporción de Etringita estimada mediante la técnica de DRX es muy similar. Sin embargo, los resultados de expansión determinados sobre ambas mezclas tanto en régimen libre como en restringido difieren prácticamente en un orden de magnitud. Por ello, parece poco probable que la Etringita convencional de estructura cristalina, y por extensión el contenido estimado de ésta mediante DRX, sea el principal responsable de la expansión ocasionada.

A continuación la Figura 3.18 y la Figura 3.19 recogen unos gráficos donde se compara el porcentaje de Etringita cristalina detectada en muestras con 10% y 15 % de aditivo expansivo y el

grado de expansión desarrollado (en este caso se toma la expansión registrada en anillos por registrarse esta desde las etapas iniciales).

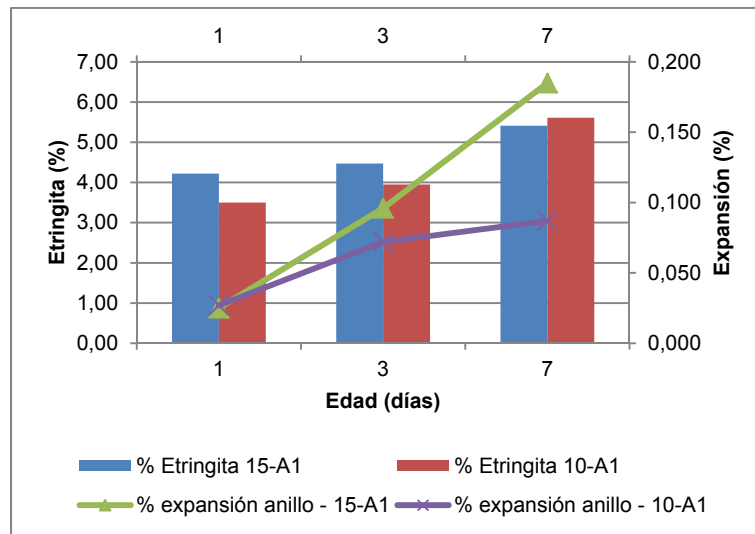


Figura 3.18 Comparativa del % de Etringita estimado mediante DRX y % de expansión desarrollada en ambiente A1.

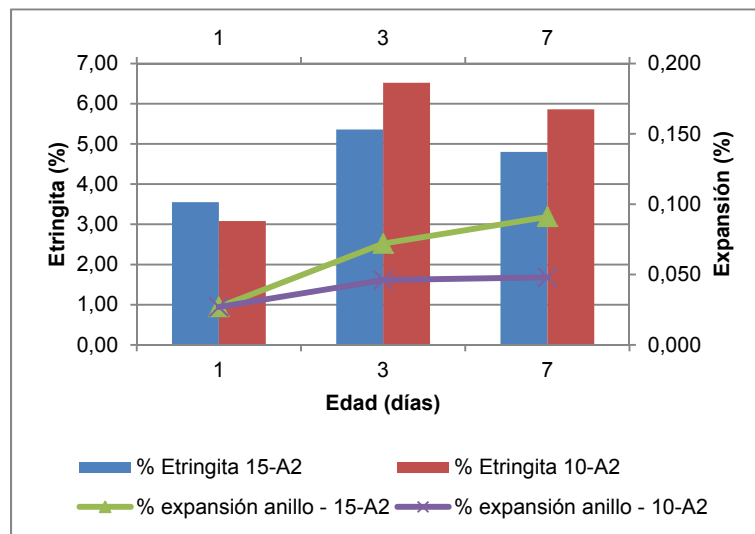


Figura 3.19 Comparativa del % de Etringita estimado mediante DRX y % de expansión desarrollada en ambiente A2.

Lo expuesto en los gráficos anteriores puede justificar, en cierta forma, que:

- la Etringita de morfología convencional cristalina identificable mediante difracción de rayos X no sea la responsable del mecanismo de expansión, ya que para porcentajes similares de Etringita el porcentaje de expansión varía ostensiblemente.
- la técnica no es adecuada para identificar y semicuantificar la Etringita responsable de la expansión por ser esta de carácter amorfo.

Lo que sí parece estar relacionado es el desarrollo de la expansión y el consumo del compuesto anhidro Ye'elemita, ya que, a medida que este anhidro se va agotando la expansión va aumentando (Figura 3.20).

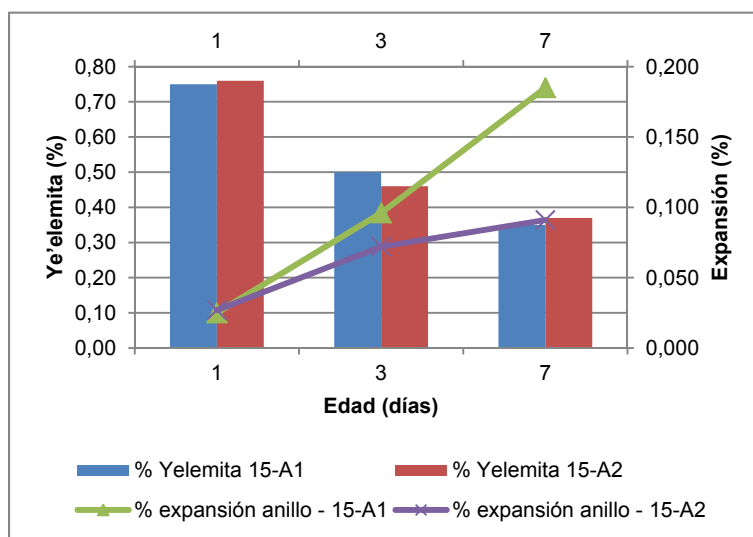


Figura 3.20 Comparativa de % de Ye'elemita detectado mediante DRX y % de expansión desarrollada en ambiente A1 y A2 para las muestras de HACE-15%.

Por último, mencionar que mediante la técnica de difracción de rayos X no se detectan en los difractogramas pertenecientes a las muestras de las distintas mezclas de HACE fabricadas picos apreciables del hidrato monosulfoaluminato cálcico ($C_4A\check{S}H_{12}$), pero sí que se detecta (Angulo $18,06\ 2\theta$) un aumento progresivo de la proporción de Portlandita a medida que avanza el proceso de hidratación en el caso particular de las mezclas HACE-15% y HACE-50.

3.5.1.3 Microscopía electrónica de barrido (BSEM) y microanálisis EDS

La técnica de microscopía electrónica de barrido nos permite identificar visualmente a nivel microestructural los compuestos que integran los hormigones fabricados e identificar, mediante microanálisis por dispersión de energía de rayos X-EDS, fases que con la técnica de DRX no ha sido posible reconocer, como pueden ser distintas fases hidratadas amorfas.

Bajo la condición de curado en régimen libre, las muestras relativas a las mezclas de HACE con aditivo expansivo DENKA CSA 20 presentan una microestructura interna de la matriz de cemento y del hormigón con presencia de múltiples microfisuras en la pasta y la interfase pasta-árido, especialmente a edades iniciales (Figura 3.21). La falta de cohesión que esta fisuración pudiera producir se minora a medida que avanza la hidratación de los HACEs, ya que, gran parte de estas fisuras se rellenan con nuevos productos de hidratación (Figura 3.22) mejorando de esta forma la compacidad de la microestructura interna a la edad de 28 días por densificación de la misma.

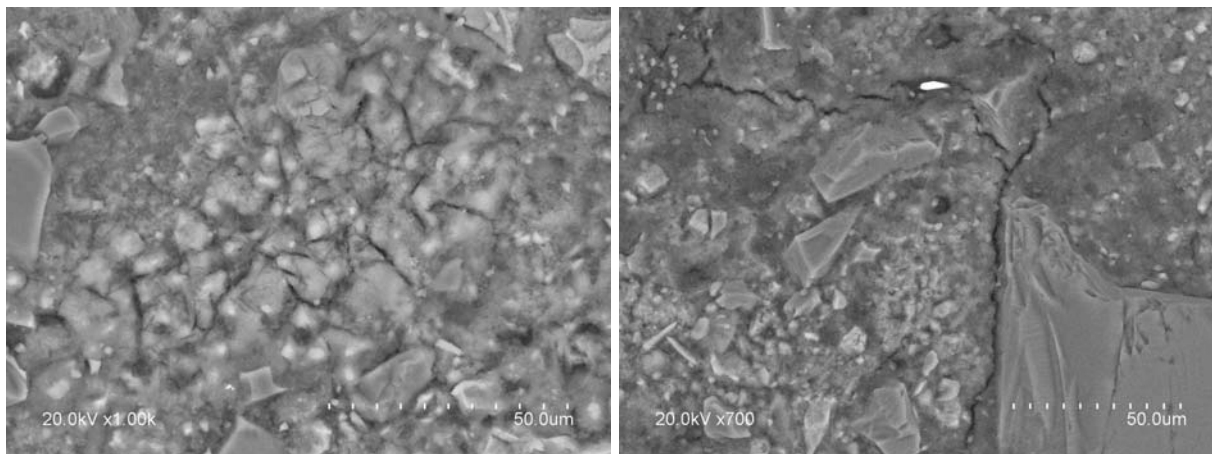


Figura 3.21 Microfisuración de la matriz cemento a edades iniciales.

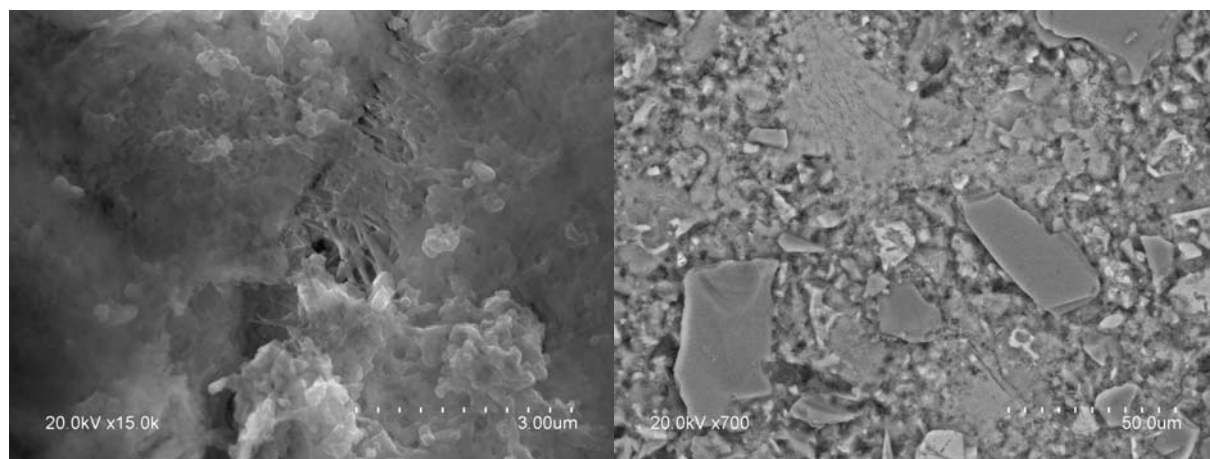


Figura 3.22 Microfisuras rellenándose con nuevos productos de hidratación tipo Etringita (izquierda). Matriz cementicia HACE-10% a 28 días (derecha).

La dosis de aditivo expansivo influye en la microestructura de muestras que se encuentran en régimen libre, ya que, a mayor proporción adicionada, mayor expansión y, por tanto, mayor fisuración de la matriz cementicia. El grado de fisuración inducido por la expansión puede ser de tal magnitud que las microfisuras no lleguen a rellenarse completamente con nuevos productos de hidratación, tal y como ocurre en las muestras de HACE-15% (Figura 3.23), quedando una microfisuración permanente que puede afectar a las características mecánicas presentadas por los HACE con la dosis del 15%.

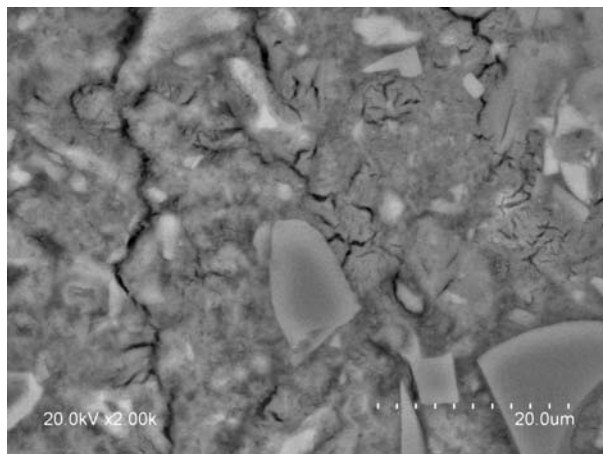


Figura 3.23 Matriz con presencia de microfisuras de la muestra HACE-15% a la edad de 28 días.

Hay que incidir en que esta fisuración generalizada se relaciona con el hecho de una expansión descontrolada en régimen libre, ya que si las muestras estuvieran en régimen restringido, se espera que estas microfisuras acabarían rellenándose con los nuevos productos de hidratación al no haber otro lugar en el que desarrollarse, dando lugar a una microestructura más densa y compacta.

A continuación se muestran una serie de imágenes obtenidas mediante BSEM a distintas edades de hidratación, condición de curado y dosis de aditivo, así como los microanálisis EDS realizados en cada caso para identificar los diferentes compuestos relacionados con la expansión que integran los HACEs fabricados.

De forma general, en la matriz cementicia, se localiza, a modo de núcleos distribuidos aleatoriamente, el compuesto Ye'elemita- $C_4A_3\check{S}$, el cual se identifica con una morfología relativamente circular y un color gris claro (Figura 3.24).

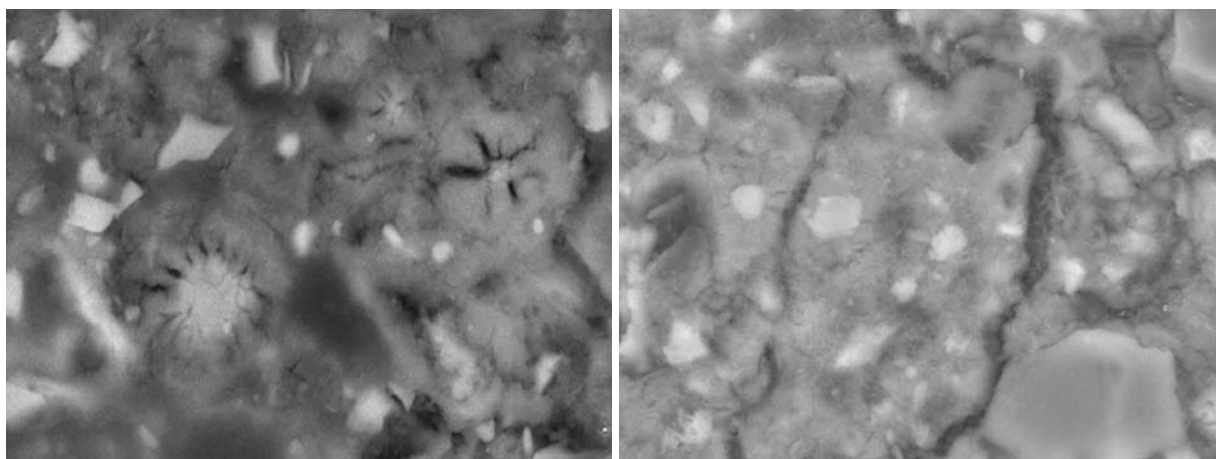


Figura 3.24 Muestra HACE-15% - Núcleos de Ye'elemita- $C_4A_3\check{S}$ distribuidos en la matriz cementicia con distinto nivel de hidratación a las edades de 1 día (izquierda) y 3 días (derecha).

A partir de estos núcleos se disponen radialmente una serie de microfisuras y nuevos productos hidratados base sulfoaluminato cálcico, de tal forma que, en las inmediaciones de estos núcleos y según el microanálisis, se identifica el compuesto $C_6AS_3H_{32}$ (Etringita), compuesto que, a medida que nos alejamos del núcleo, aparece integrado en la estructura del gel C-S-H como reflejan los análisis EDS relativos a la Figura 3.25.

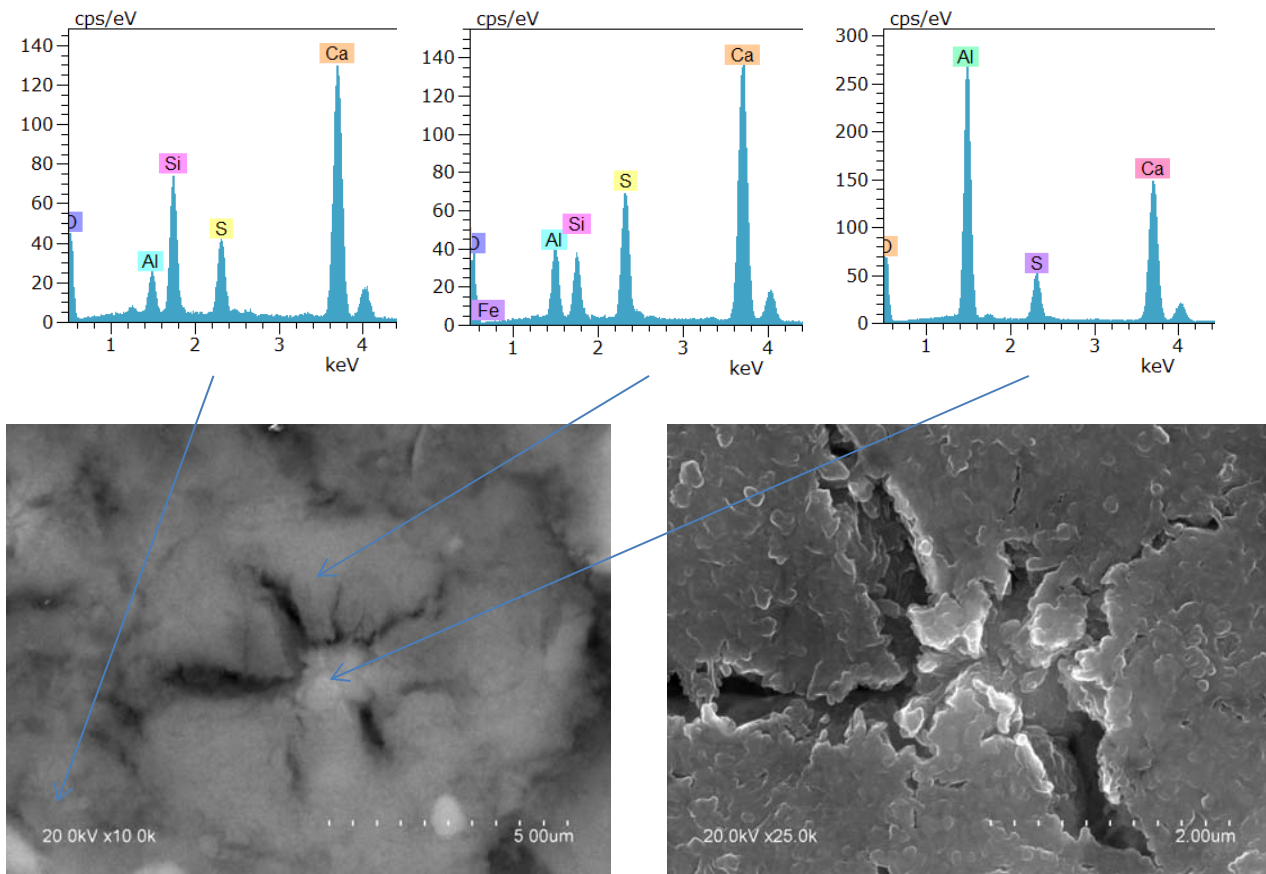


Figura 3.25 Núcleo de Ye'elemite- $C_4A_3\check{S}$ en proceso de hidratación y disposición de los compuestos hidratados a su alrededor. Análisis EDS realizados.

En este caso, destacar que el compuesto Etringita que se produce a partir de los anhidros del aditivo expansivo, en las inmediaciones de estos núcleos e integrado en los geles C-S-H, se presenta con una morfología de cierto carácter amorfo y coloidal (Figura 3.25) integrada en la pasta, frente a la forma más habitual de Etringita formada a partir de los anhidros del cemento que es de carácter cristalino consistente en acículas prismáticas que se suelen localizar en el interior de poros (Figura 3.26). Esta tipología de Etringita amorfa es la que identifican algunos autores⁸⁶ como la responsable de la expansión. La morfología de esta Etringita formada a partir del aditivo expansivo, al ser de carácter eminentemente amorfo, no debe permitir la correcta identificación mediante la técnica de caracterización de DRX, ya que esta técnica identifica fases cristalinas o semicristalinas.

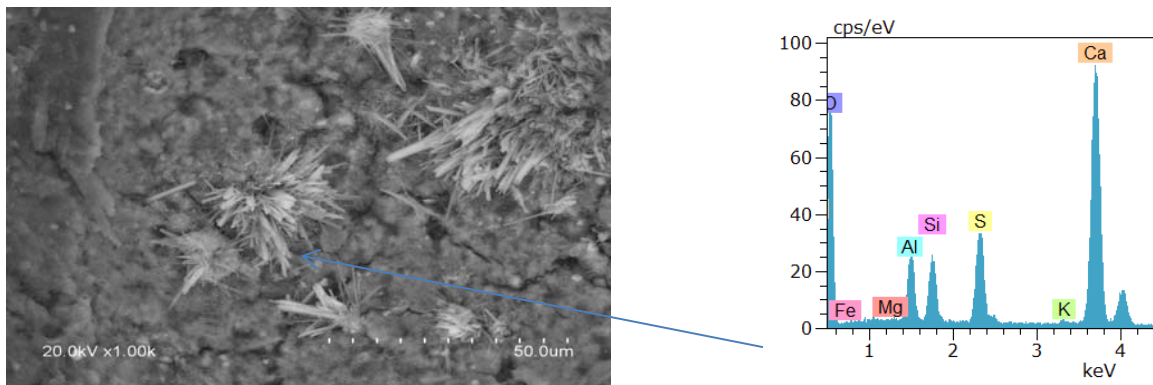


Figura 3.26 Etringita convencional en poro de la matriz cementicia. Análisis EDS realizado.

La Figura 3.27 muestra una zona de la matriz base cemento donde se observa, a la edad de 1 día, un área con aglomeración de componentes de carácter anhidro que se atribuyen al aditivo expansivo DENKA CSA 20. Mediante microanálisis EDS se identifican estos anhidros como Ye'elemita- $C_4A_3\dot{S}$, en forma de grano irregular, anhidrita- $CaSO_4$, en forma de placas, y magnesio, con forma semiesférica.

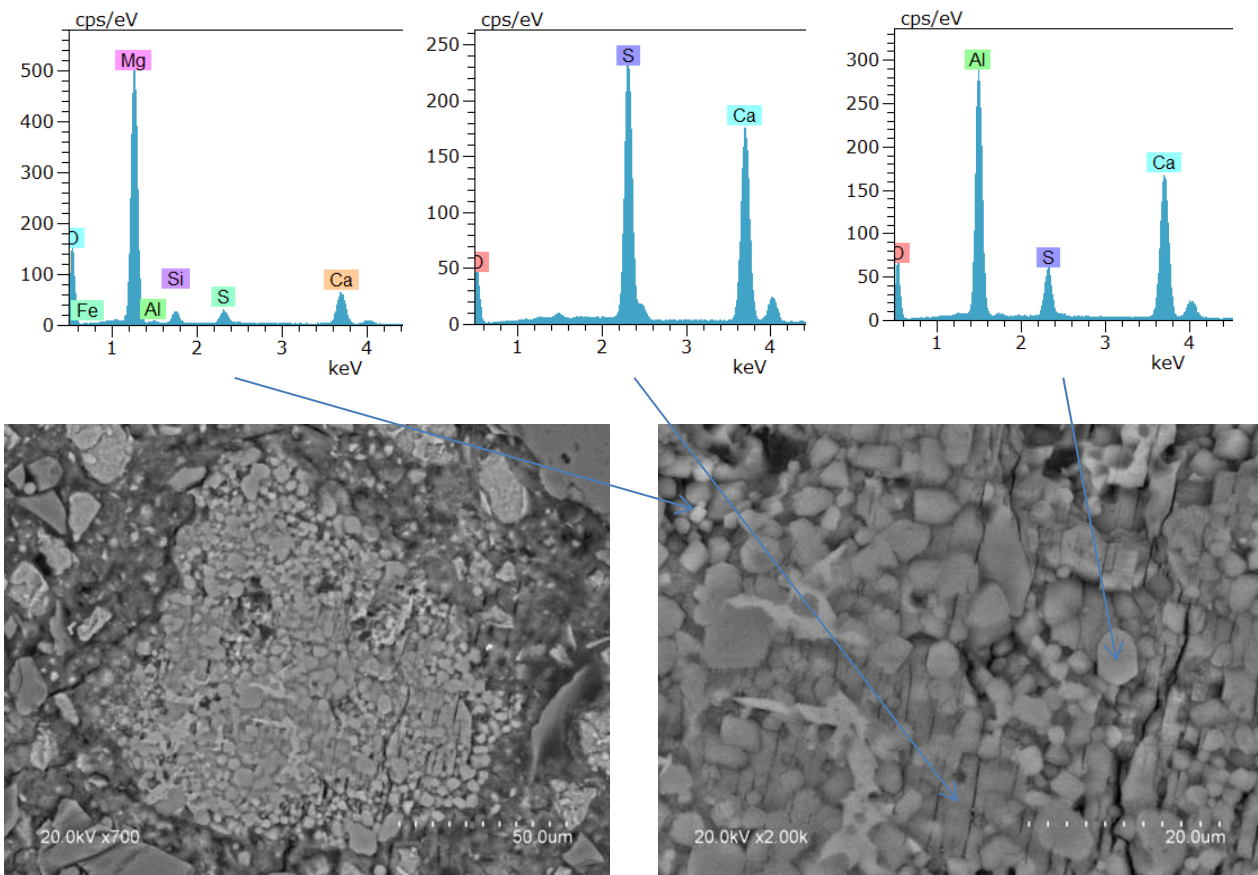


Figura 3.27 HACE-15% - Zona de concentración de anhidros tipo Ye'elemita, anhidrita y magnesio a la edad de 1 día (izquierda). Detalle de una zona de la muestra (derecha). Análisis EDS correspondientes a estos anhidros.

La Figura 3.28 muestra una zona similar a la de la figura anterior, en el mismo tipo de hormigón pero tras 28 días de hidratación. En este caso, se observa que parte de los componentes anhidros iniciales se han hidratado y que alrededor de la aglomeración inicial de anhidros se produce una concentración importante de calcio que se asocia a la formación de Portlandita, según varios EDS realizados en esta zona.

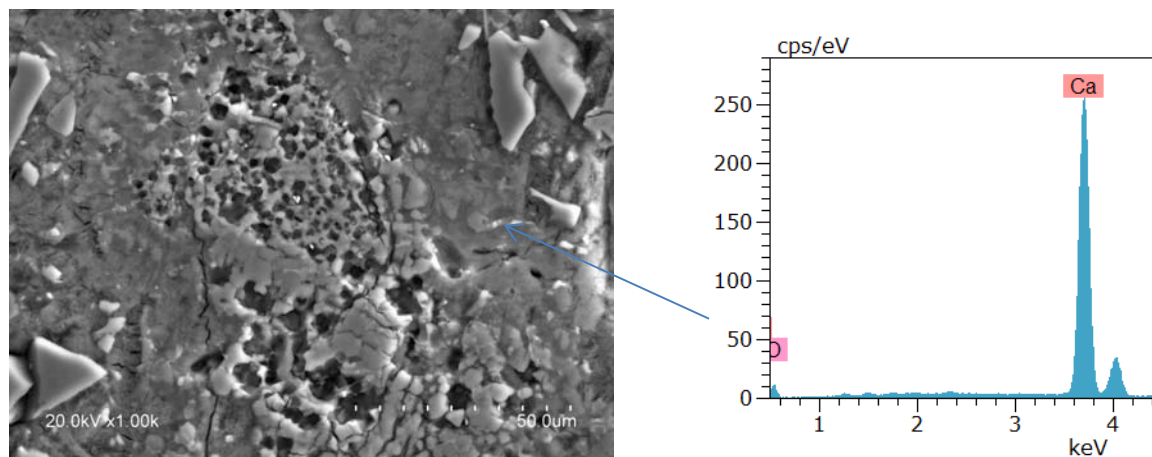


Figura 3.28 HACE-15% - Zona de concentración de anhidros parcialmente hidratados a la edad de 28 días. EDS sobre perímetro alrededor de la concentración de anhidros.

3.5.2 Caracterización del estado fresco de los HACE

La determinación de la autocompactabilidad, así como el resto de propiedades en fresco de los HACE estudiados, se lleva a cabo durante los 15 primeros minutos posteriores al amasado del hormigón, obteniéndose los resultados que se reflejan en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14 Caracterización del hormigón autocompactante en el estado fresco.

Caracterización en fresco					
Ensayo	Parámetro de medida	HACE-0%	HACE-10%	HACE-15%	HACE-50%
UNE EN 12350-8 Hormigón autocompactante. Ensayo del escurrimiento	Escurrecimiento (d_1) (mm)	685	700	695	704
	Escurrecimiento (d_2) (mm)	715	710	720	720
	Escurrecimiento (d_f) (mm)	700	705	707,5	712
	Tiempo de escurrimiento (T_{50}) (s)	1,1	1,1	1,3	1,5
UNE EN 12350-9 Hormigón autocompactante. Ensayo del embudo en V	Tiempo de flujo - T_v (s)	3,0	2,9	3,2	3,0
UNE EN 12350-6 Determinación de la densidad	Densidad (kg/m^3)	2217,8	2168,3	2149,4	2141,4
UNE-EN 12350-7 Determinación del contenido de aire. Métodos de presión.	Contenido de aire (%)	5,1	8,7	10,2	10,6

3.5.2.1 Análisis de resultados

Los rangos admisibles de autocompactabilidad que deben cumplirse se recogen en el Anejo 17 “*Recomendaciones para la utilización del hormigón autocompactante*” de la EHE-08 conforme a la tabla que sigue.

Tabla 3.15 Requisitos generales para la autocompactabilidad, EHE-08.

Ensayo	Parámetro medido	Rango admisible
Escurrimiento	T_{50}	$T_{50} \leq 8 \text{ seg}$
	d_f	$550 \text{ mm} \leq d_f \leq 850 \text{ mm}$
Embudo en V	T_v	$4 \text{ s} \leq T_v \leq 20 \text{ s}$

Así mismo, este Anejo 17 define tres clases o niveles de autocompactabilidad mediante la combinación de las clases correspondientes al escurrimiento (AC-E), Tabla 3.16, y la viscosidad (AC-V), Tabla 3.17.

Tabla 3.16 Clases de escurrimiento, EHE-08.

Clase	Criterio
AC-E1	$550 \text{ mm} \leq d_f \leq 650 \text{ mm}$
AC-E2	$650 \text{ mm} < d_f \leq 750 \text{ mm}$
AC-E3	$750 \text{ mm} < d_f \leq 850 \text{ mm} (*)$

Tabla 3.17 Clases de viscosidad, EHE-08.

Clase	Criterio por el ensayo de escurrimiento	Criterio alternativo por el ensayo del embudo en V
AC-V1	$2,5 \text{ s} < T_{50} \leq 8 \text{ s}$	$10 \text{ s} \leq T_v \leq 20 \text{ s}$
AC-V2	$2 \text{ s} < T_{50} < 8 \text{ s}$	$6 \text{ s} \leq T_v \leq 10 \text{ s}$
AC-V3	$T_{50} \leq 2 \text{ s} (*)$	$4 \text{ s} \leq T_v \leq 6 \text{ s} (*)$

Siendo el nivel más alto de autocompactabilidad (clase 3) la recomendada para los siguientes casos:

- Estructuras muy fuertemente armadas.
- Estructuras en las que el llenado de los encofrados es muy difícil, el hormigón debe pasar por huecos muy pequeños y los puntos de vertido del mismo exigen que se desplace horizontalmente distancias muy largas en el interior del encofrado.
- Elementos estructurales horizontales en los que es muy importante conseguir la autonivelación del propio hormigón.
- Elementos estructurales muy altos, de gran esbeltez y muy fuertemente armados.

Teniendo en cuenta lo expuesto y a partir de los resultados obtenidos se establece que:

- Las dosificaciones diseñadas cumplen, en la práctica, los requisitos de autocompactabilidad recogidos en el Anejo 17 de la EHE-08 relativos al parámetro de escurrimiento, clasificándose las mezclas diseñadas como de clase AC-E2.



Figura 3.29 Escurrimiento dosificación HACE-15%.

- La adición de aditivo expansivo DENKA CSA 20, en las proporciones estudiadas, no modifica la condición de autocompactable del hormigón de referencia HACE-0%, aunque sí se observa un ligero aumento del escurrimiento y del tiempo de flujo a medida que aumenta la proporción adicionada de aditivo expansivo.

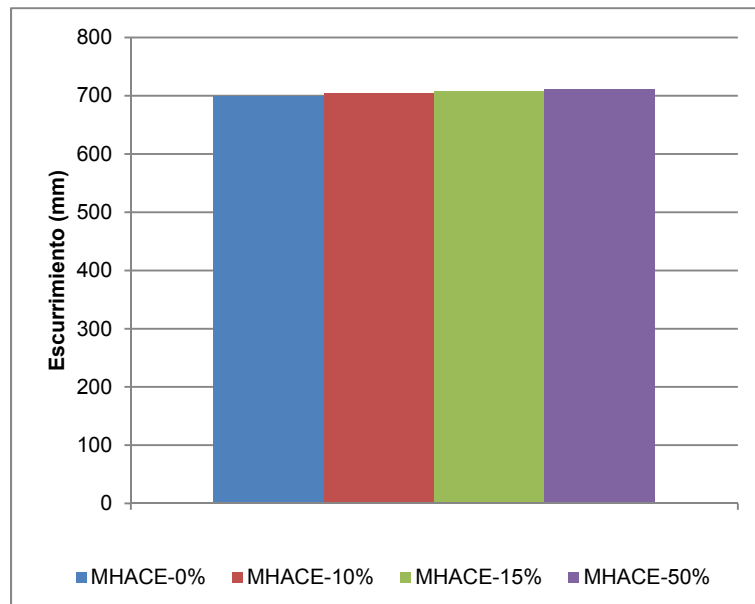


Figura 3.30 Comparativa del escurrimiento determinado según UNE EN 12350-8.

- Realizado el ensayo de escurrimiento no se observan signos de segregación en la torta de hormigón, salvo en el caso de la dosificación HACE-50% donde transcurrido un tiempo de reposo comienzan a observarse signos de segregación haciendo necesario un reamasado previo al vertido de la masa de hormigón en los moldes de fabricación de probetas.
- El ensayo del embudo en V presenta resultados de tiempos de flujo muy similares para las dosificaciones estudiadas. Así mismo, los tiempos registrados tanto en el ensayo de escurrimiento como en el ensayo del embudo clasifican la viscosidad de las mezclas diseñadas como tipo AC-V3, según criterio EHE-08.

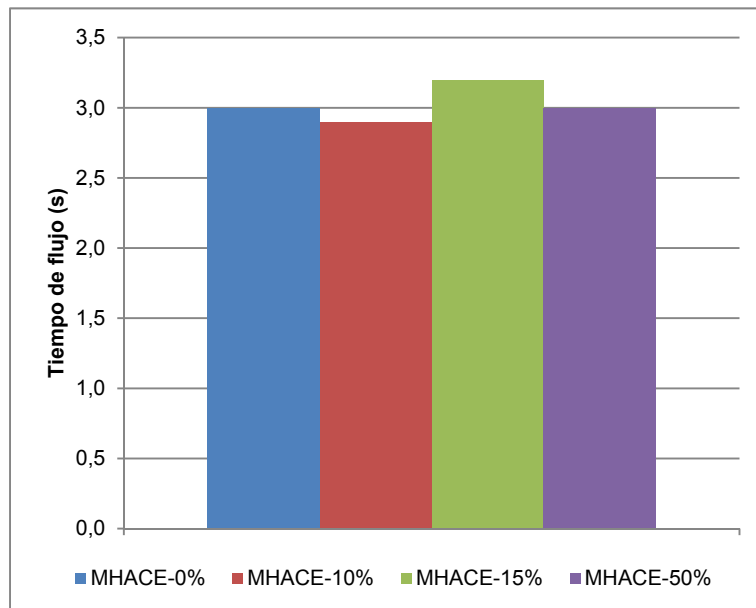


Figura 3.31 Comparativa del tiempo de flujo determinado según UNE EN 12350-9.

- El contenido de aire en estado fresco de las mezclas estudiadas aumenta al incrementar las dosis adicionada de aditivo expansivo DENKA CSA 20 de tal forma que las dosificaciones elaboradas con un 10%, 15% y 50%, incorporan un 71%, 100% y 108% más de aire que el determinado para la dosificación de referencia HACE-0%.

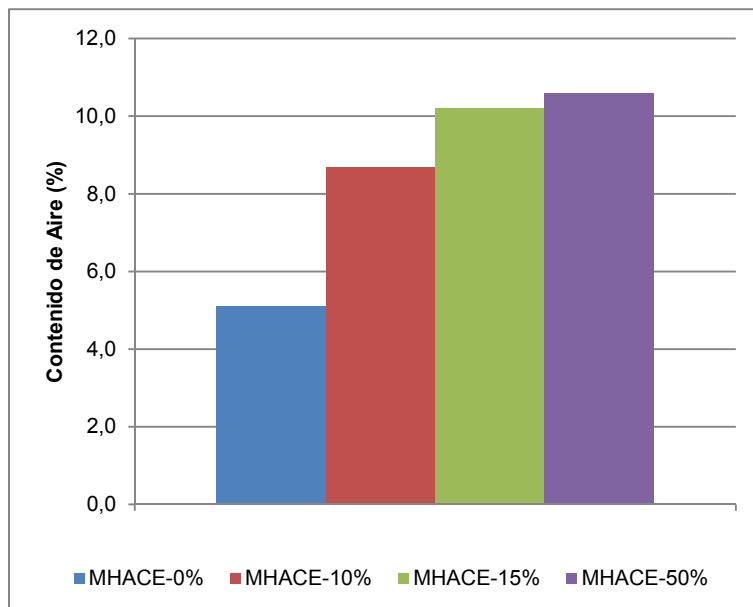


Figura 3.32 Comparativa del contenido de aire determinado según UNE EN 12350-7.

- Por tanto, se podría establecer que la adición de aditivo DENKA CSA 20 tiene un efecto incorporador de aire, que se aprecia incluso a simple vista por un evidente burbujeo superficial en la masa, lo que por un lado puede favorecer la trabajabilidad (efecto plastificante) de las mezclas estudiadas pero por otro puede suponer una posterior reducción del valor de la resistencia a compresión de los hormigones que incorporan este tipo de aditivo expansivo.



Figura 3.33 Presencia de burbujas superficiales.

- La densidad en estado fresco disminuye ligeramente al aumentar la dosis de aditivo expansivo DENKA CSA 20 adicionada, lo que podría relacionarse con el mayor contenido de aire que presentan las mezclas con mayor proporción de aditivo expansivo.

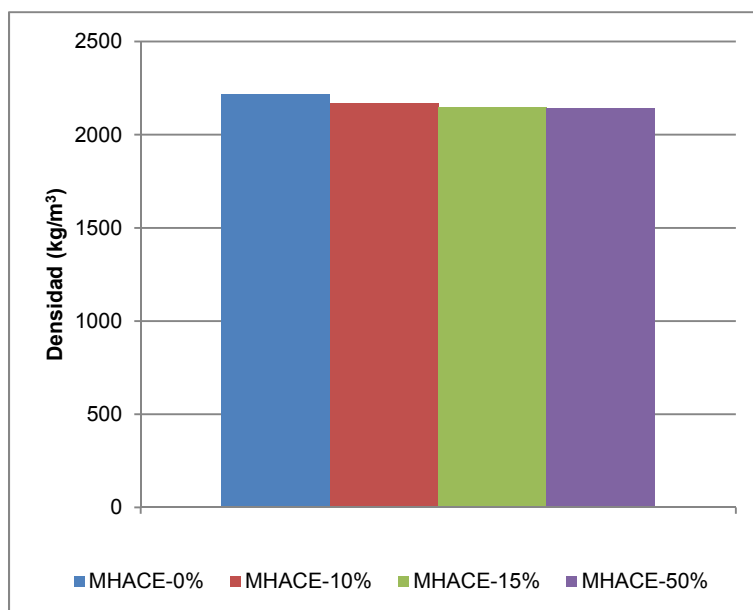


Figura 3.34 Comparativa de la densidad determinada según UNE EN 12350-6.

3.5.3 Caracterización del estado endurecido. Propiedades mecánicas

La caracterización mecánica de las dosificaciones realizadas se refiere a:

- La determinación de la resistencia a flexión y compresión sobre probetas de dimensiones 160 x 40 x 40 mm a las edades de 7 y 28 días, curadas con una humedad relativa $\geq 95\%$ y temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$, analizándose, a la última edad referida, la influencia del tipo de curado (una serie se cubre con film mientras que la otra no) sobre la resistencia del hormigón.
- Evaluación de la resistencia a compresión, a la edad de 7 y 28 días, y módulo de elasticidad estático a la edad de 28 días sobre probetas cilíndricas de dimensiones 150 x 300 mm curadas conforme a lo establecido en la norma UNE-EN 12390-2.

Notar: en este capítulo no se recogen los resultados de caracterización mecánica correspondientes a la dosificación de HACE-50, ya que, el régimen de expansión experimentado, tanto en régimen libre como en restringido, fue de tal magnitud que se produjo la fisuración de las probetas de hormigón lo que imposibilitó la evaluación mecánica de la dosificación referida.

3.5.3.1 Resistencia a flexión y compresión de probetas

La resistencia a flexión se determina sobre probetas prismáticas de dimensiones 160 x 40 x 40 mm que se ensayan a una velocidad de carga de 0,3 MPa/s. La Tabla 3.18 recoge los resultados de resistencia a flexión de cada una de las dosificaciones motivo de estudio.

Tabla 3.18 Resultados resistencia a flexión según UNE-EN 1015-11.

Tipo de hormigón	Edad de ensayo (días)	Morfología	Dimensiones (mm)	Carga Rotura (kN)	Resistencia (Mpa)	Resistencia Promedio (Mpa)	Coefficiente de variación (%)	Recorrido (%)
MHACE-0%	7	Prismática	160 x 40 x 40	1,2	2,8	3,0	6,5%	9,2%
	7	Prismática	160 x 40 x 40	1,3	3,1			
MHACE-10%	7	Prismática	160 x 40 x 40	1,9	4,4	4,4	1,5%	2,1%
	7	Prismática	160 x 40 x 40	1,8	4,3			
MHACE-15%	7	Prismática	160 x 40 x 40	1,7	4,1	4,3	6,1%	8,6%
	7	Prismática	160 x 40 x 40	1,9	4,5			
MHACE-0%	28	Prismática	160 x 40 x 40	1,7	4,0	3,9	5,9%	8,3%
	28	Prismática	160 x 40 x 40	1,6	3,7			
MHACE-10%	28	Prismática	160 x 40 x 40	2,5	6,0	6,2	4,2%	6,0%
	28	Prismática	160 x 40 x 40	2,7	6,3			
MHACE-15%	28	Prismática	160 x 40 x 40	2,6	6,0	5,6	9,0%	12,8%
	28	Prismática	160 x 40 x 40	2,3	5,3			
MHACE-0% (Film)	28	Prismática	160 x 40 x 40	2,1	4,9	4,7	6,2%	8,8%
	28	Prismática	160 x 40 x 40	1,9	4,5			
MHACE-10% (Film)	28	Prismática	160 x 40 x 40	2,5	5,8	6,2	8,4%	11,9%
	28	Prismática	160 x 40 x 40	2,8	6,6			
MHACE-15% (Film)	28	Prismática	160 x 40 x 40	2,4	5,5	5,7	3,4%	4,9%
	28	Prismática	160 x 40 x 40	2,5	5,8			

Así mismo, la Tabla 3.19 recoge los resultados de resistencia a compresión determinados sobre semiprismas obtenidos a partir de la rotura a flexión previa de probetas de 160 x 40 x 40 mm, ensayadas con una velocidad de carga de 0,3MPa/s.

Tabla 3.19 Resultados resistencia a compresión sobre probetas cúbicas según UNE-EN 1015-11.

Tipo de hormigón	Edad de ensayo (días)	Morfología	Dimensiones (mm)	Carga Rotura (kN)	Resistencia (Mpa)	Resistencia Promedio (Mpa)	Coefficiente de variación (%)	Recorrido (%)
HACE-0%	7	Cúbica	40 x 40	24,7	15,5	16,0	2,8%	6,3%
	7	Cúbica	40 x 40	25,3	15,8			
	7	Cúbica	40 x 40	26,0	16,2			
	7	Cúbica	40 x 40	26,4	16,5			
HACE-10%	7	Cúbica	40 x 40	44,9	28,1	29,0	3,2%	7,0%
	7	Cúbica	40 x 40	45,4	28,3			
	7	Cúbica	40 x 40	47,0	29,4			
	7	Cúbica	40 x 40	48,2	30,1			
HACE-15%	7	Cúbica	40 x 40	37,2	23,3	23,6	3,8%	8,6%
	7	Cúbica	40 x 40	36,2	22,6			
	7	Cúbica	40 x 40	38,5	24,1			
	7	Cúbica	40 x 40	39,4	24,7			
HACE-0%	28	Cúbica	40 x 40	34,4	21,5	20,6	4,1%	9,6%
	28	Cúbica	40 x 40	32,7	20,4			
	28	Cúbica	40 x 40	31,3	19,5			
	28	Cúbica	40 x 40	33,6	21,0			
HACE-10%	28	Cúbica	40 x 40	55,4	34,6	36,0	4,4%	8,5%
	28	Cúbica	40 x 40	55,5	34,7			
	28	Cúbica	40 x 40	59,3	37,1			
	28	Cúbica	40 x 40	60,3	37,7			
HACE-15%	28	Cúbica	40 x 40	47,7	29,8	30,2	2,0%	4,1%
	28	Cúbica	40 x 40	48,3	30,2			
	28	Cúbica	40 x 40	49,7	31,1			
	28	Cúbica	40 x 40	47,7	29,8			
HACE-0% (Film)	28	Cúbica	40 x 40	31,9	20,0	20,9	3,6%	8,9%
	28	Cúbica	40 x 40	33,4	20,9			
	28	Cúbica	40 x 40	33,6	21,0			
	28	Cúbica	40 x 40	34,9	21,8			
HACE-10% (Film)	28	Cúbica	40 x 40	59,1	36,9	38,3	3,6%	8,5%
	28	Cúbica	40 x 40	61,1	38,2			
	28	Cúbica	40 x 40	64,3	40,2			
	28	Cúbica	40 x 40	60,5	37,8			
HACE-15% (Film)	28	Cúbica	40 x 40	54,7	34,2	32,5	4,8%	11,1%
	28	Cúbica	40 x 40	53,1	33,2			
	28	Cúbica	40 x 40	48,9	30,6			
	28	Cúbica	40 x 40	51,5	32,2			

Los resultados de resistencia a compresión sobre probetas cilíndricas de dimensiones 150 x 300 mm se recogen en la Tabla 3.20. Este ensayo se realiza empleando una velocidad de carga de 0,5MPa/s.

Tabla 3.20 Resultados resistencia a compresión sobre probetas cilíndricas según UNE EN 12390-3.

Tipo hormigón	Edad de ensayo (días)	Morfología	Dimensiones (mm)	Carga Rotura (kN)	Resistencia (Mpa)	Resistencia Promedio (Mpa)	Coefficiente de variación (%)	Recorrido (%)
MHACE-0%	7	Cilíndrica	150 x 294	355,1	20,1	20,9	5,7%	8,1%
	7	Cilíndrica	150 x 300	385,1	21,8			
MHACE-10%	7	Cilíndrica	150 x 294	404,3	22,9	22,2	4,1%	5,8%
	7	Cilíndrica	150 x 300	381,7	21,6			
MHACE-15%	7	Cilíndrica	150 x 303	334,5	18,9	18,2	5,3%	7,5%
	7	Cilíndrica	150 x 302	310,2	17,6			
MHACE-0%	28	Cilíndrica	150 x 300	462,1	26,1	27,0	4,6%	6,6%
	28	Cilíndrica	150 x 300	493,5	27,9			
MHACE-10%	28	Cilíndrica	150 x 294	523,6	29,6	29,5	0,7%	0,9%
	28	Cilíndrica	150 x 300	518,7	29,4			
MHACE-15%	28	Cilíndrica	150 x 300	415,9	23,5	23,5	0,3%	0,5%
	28	Cilíndrica	150 x 300	413,9	23,4			

3.5.3.2 Módulo de elasticidad estático en compresión

Los resultados del módulo de elasticidad se recogen en la Tabla 3.21.

Tabla 3.21 Resultados de módulo de elasticidad estático en compresión.

Ensayo módulo de elasticidad estático						
Tipo de hormigón	Edad de ensayo (días)	Morfología	Dimensiones (mm)	f _c considerada (MPa)	E (GPa)	E _m (GPa)
HACE-0%	28	Cilíndrica	150 x 300	27,0	28,7	28,0
	28	Cilíndrica	150 x 300		27,2	
HACE-10%	28	Cilíndrica	150 x 300	29,5	28,4	27,8
	28	Cilíndrica	150 x 300		27,3	
HACE-15%	28	Cilíndrica	150 x 300	23,5	23,5	22,5
	28	Cilíndrica	150 x 300		21,5	

3.5.3.3 Análisis de resultados

A partir de los resultados recogidos en los apartados anteriores se observa que:

- En probetas prismáticas de dimensiones 40 x 40 x 160 mm, la adición de aditivo expansivo DENKA CSA 20 en las proporciones estudiadas incrementa los valores de resistencia a flexión y compresión registrados sobre la dosificación de referencia HACE-0% tanto a edades tempranas, 7 días, como a la edad de 28 días, independientemente del ambiente de curado al que se han sometido las probetas.
- Aumentar la dosis adicionada de aditivo expansivo DENKA CSA 20 del 10% al 15% se traduce en una pérdida de características mecánicas. Esta disminución de propiedades mecánicas puede deberse a dos factores, por un lado, el incremento del porcentaje de aire que supone el aumento de la dosis de aditivo expansivo, como se puede ver en la caracterización del estado fresco de los HACE estudiados, y por otro, la mayor magnitud

de la expansión desarrollada en régimen libre por la dosificación HACE-15%, lo que puede conllevar un aumento de la microfisuración de la matriz cementicia.

- El ambiente de curado influye ligeramente en las características mecánicas de las dosificaciones de HACE que incorporan aditivo expansivo DENKA CSA 20 en las proporciones del 10% y del 15%, ya que, como se puede observar en la Figura 3.37 aquellas probetas que se han curado con envoltura de film hasta la edad de 28 días presentan un valor de resistencia a compresión, superior a las curadas en el mismo ambiente pero sin cobertura de film. La razón de este incremento de propiedades mecánicas se puede deber a la menor magnitud de la expansión desarrollada al no haber aporte de agua externo, lo que se traduciría en una menor microfisuración de la matriz cementicia.

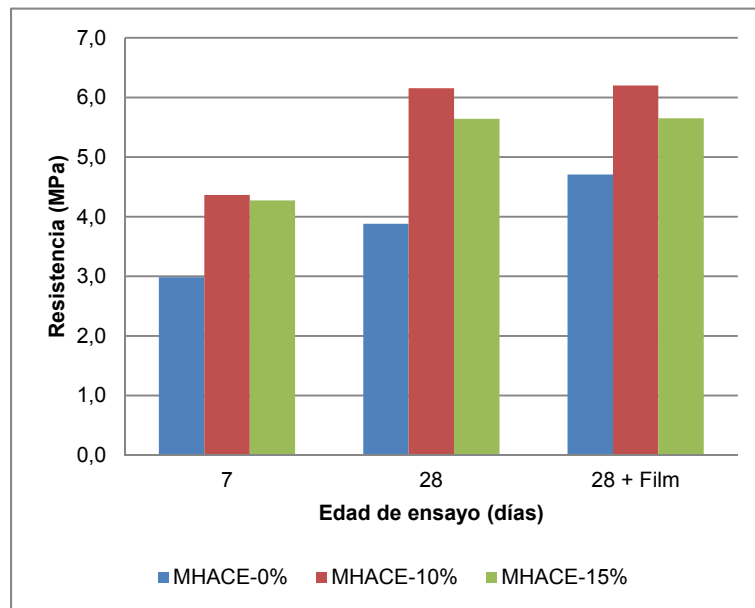


Figura 3.35 Comparativa resistencia a flexión sobre probetas 160 x 40 x 40 mm a las edades de 7 y 28 días.

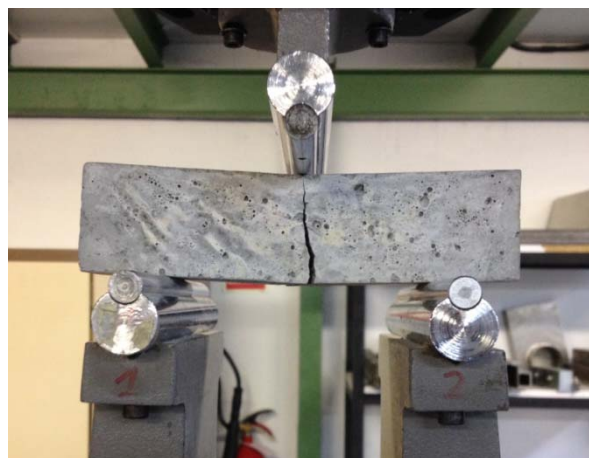


Figura 3.36 Resistencia a flexión conforme UNE EN 1015-11.

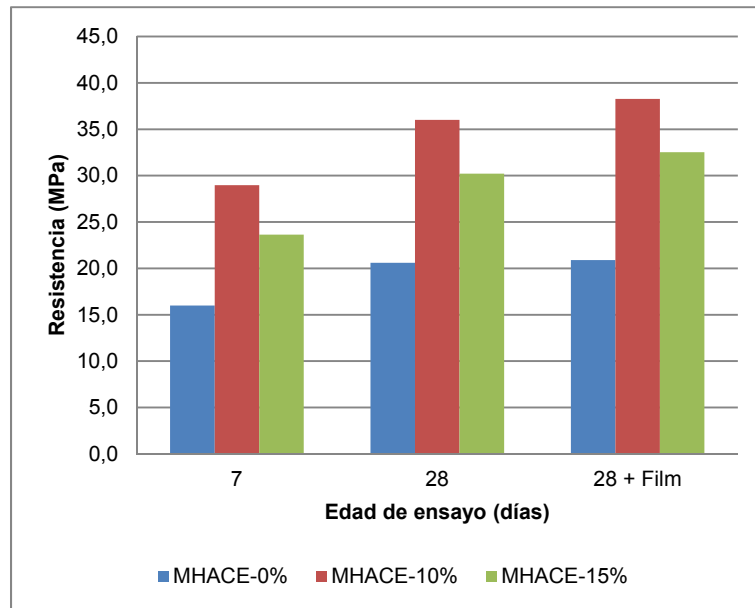


Figura 3.37 Comparativa resistencia a compresión sobre semiprismas obtenidos de probetas de 160 x 40 x 40 mm a las edades de 7 y 28 días.



Figura 3.38 Resistencia a compresión conforme UNE-EN 1015-11.

- En probetas cilíndricas de dimensiones 150 x 300 mm, la adición de aditivo expansivo DENKA CSA 20 en la proporción del 10% incrementa el valor de resistencia a compresión tanto a edades tempranas como a la edad de 28 días, al igual que ocurre en probetas de menor dimensión (40 x 40 mm).

Sin embargo, al incrementar la dosis de aditivo expansivo hasta el 15%, el valor de resistencia a compresión cae no solo por debajo del valor de resistencia registrado en la dosificación HACE-10%, sino también, del valor de resistencia a compresión que presenta el hormigón de referencia HACE-0%. En este caso, se puede suponer que la microfisuración interna que induce la expansión libre tiene mayor incidencia sobre las características mecánicas cuanto mayor son las dimensiones de la probeta.

Esta disminución de propiedades mecánicas al sobrepasar la dosis del 10% de aditivo expansivo corrobora los resultados obtenidos en probetas de menor dimensión poniendo en evidencia la influencia del porcentaje de aire y del grado de expansión desarrollado en régimen libre en las características mecánicas de los hormigones motivo de estudio.

- El tamaño y morfología de probeta empleado influye en la determinación del valor de la resistencia a compresión, registrándose un descenso de este valor de entorno al 20% en los tres HACE estudiados al pasar de una probeta tipo semiprisma a otra de cilíndrica de dimensiones 150 x 300 mm.
- Por lo expuesto, en régimen libre, la dosis del 10% de DENKA CSA 20 se presenta como dosis de aditivo expansivo crítica a partir de la cual se produce una disminución de las características resistentes tanto en probetas prismáticas de dimensiones 40 x 40 x 160 mm como en probetas cilíndricas de 300 x 150 mm independientemente del tipo de curado y de la edad de ensayo.

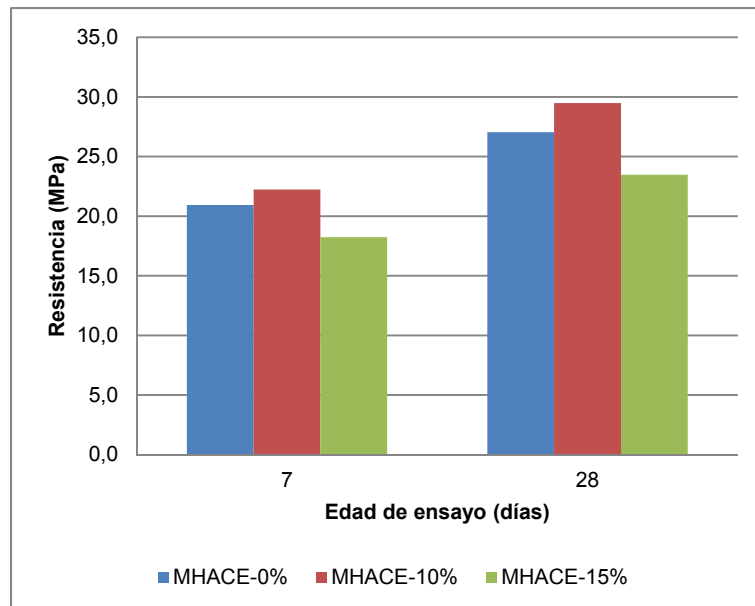


Figura 3.39 Comparativa resistencia a compresión sobre probetas 300 x 150 mm a las edades de 7 y 28 días.

- En cuanto al módulo de elasticidad estático a compresión, decir que la dosificación de HACE-10% presenta un valor medio muy similar al del hormigón de referencia. Sin embargo, el hormigón que incorpora una dosis de aditivo expansivo DENKA CSA 20 en la proporción del 15% manifiesta una disminución de la rigidez de en torno al 20% respecto al valor medio que presenta el hormigón de referencia. Esto pone de manifiesto que, en el caso de encontrarse el hormigón expansivo en la condición de libre sin ningún tipo de restricción, el sobrepasar la dosis del 10% de aditivo puede tener un efecto negativo en las propiedades mecánicas. Esta disminución de la rigidez podría relacionarse de nuevo con la microfisuración interna que se produce por efecto de la expansión.

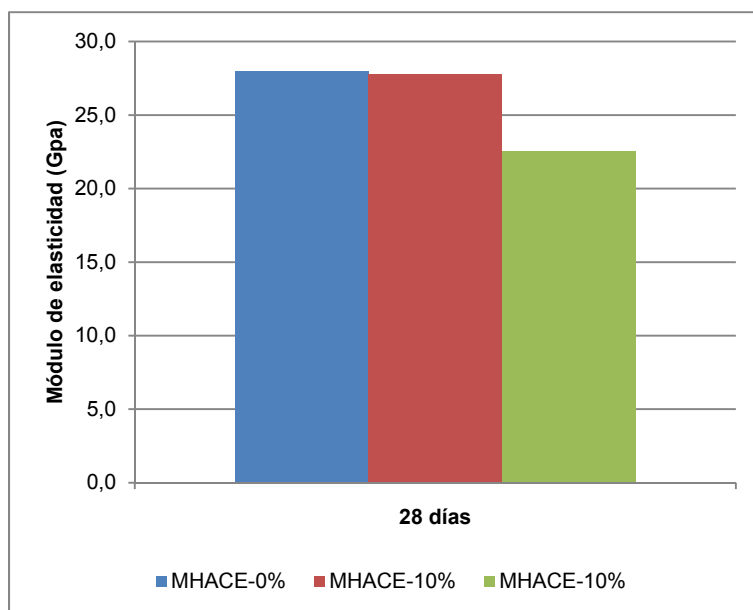


Figura 3.40 Comparativa del valor promedio de módulo de elasticidad estático en compresión a la edad de 28 días.

3.6 Conclusiones capítulo 3

Las conclusiones que se extraen de los trabajos llevados a cabo en esta fase son:

- La proporción de Etringita estimada sobre las mezclas HACE-10% y HACE-15% mediante la técnica de DRX es muy similar. Sin embargo, los resultados de expansión determinados sobre ambas mezclas tanto en régimen libre como en restringido difieren prácticamente en un orden de magnitud. Por ello, parece poco probable que la Etringita convencional de estructura cristalina, y por extensión el contenido estimado de ésta mediante DRX, sea el principal responsable de la expansión ocasionada. Lo que sí parece estar relacionado es el desarrollo de la expansión y el consumo del compuesto anhidro Ye'elemita, ya que, a medida que este anhidro se va agotando, la expansión va aumentando.
- Mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido y microanálisis EDS se detecta un tipo de Etringita amorfa integrada de forma general en las matrices hidratadas del cemento que es la que se identifica como la responsable de la expansión. La morfología de esta Etringita formada a partir del aditivo expansivo, al ser de carácter eminentemente amorfo, no debe permitir la correcta identificación y semicuantificación mediante la técnica de caracterización de DRX, ya que, esta técnica identifica fases cristalinas o semicristalinas.
- La adición de aditivo expansivo DENKA CSA 20 en las proporciones del 10% y 15%, no modifica la condición de autocompactable del hormigón de referencia HACE-0%, aunque sí se observa un ligero aumento del escurrimiento, del tiempo de flujo y del contenido de aire, así como una pequeña disminución de la densidad a medida que aumenta la proporción adicionada de aditivo expansivo.

- La incorporación de la dosis del 50% de aditivo expansivo no es viable, ya que si bien mantiene cierta estabilidad en el estado fresco, aunque con tendencia a la segregación, en el estado endurecido no permite evaluar las propiedades mecánicas básicas, ya que la expansión que induce en el hormigón es de tal magnitud que produce la fisuración completa de las probetas destinadas a los ensayos de caracterización mecánica y de cambios de longitud.
- Aumentar la dosis adicionada de aditivo expansivo DENKA CSA 20 del 10% al 15% se traduce en una pérdida de características mecánicas en lo que se refiere a resistencia a compresión, flexión y módulo de elasticidad estático en compresión. Esta disminución de propiedades mecánicas puede deberse a dos factores: por un lado, el incremento del porcentaje de aire que induce el aumento de la dosis de aditivo expansivo, como se puede ver en la caracterización del estado fresco de los HACE estudiados, y por otro, la mayor magnitud de la expansión desarrollada en régimen libre por la dosificación HACE-15%, lo que puede conllevar una mayor microfisuración de la matriz cementicia.
- El ambiente de curado influye en las características mecánicas de las dosificaciones de HACE que incorporan aditivo expansivo DENKA CSA 20 en las proporciones del 10% y del 15%, ya que, aquellas probetas que se han curado con envoltura de film hasta la edad de 28 días presentan un valor de resistencia, tanto a flexión como a compresión, superior a las curadas en el mismo ambiente pero sin cobertura de film. La razón de este incremento de propiedades mecánicas se puede deber a que, al no haber aporte de agua externo, la magnitud de la expansión desarrollada es menor, lo que se traduciría en una menor microfisuración de la matriz cementicia.
- Bajo la condición de curado en régimen libre, las muestras relativas a las mezclas de HACE con aditivo expansivo DENKA CSA 20 presentan una microestructura interna de la matriz de cemento y del hormigón con presencia de múltiples microfisuras en la pasta y la interfase pasta-árido, sobremanera, a edades iniciales. La falta de cohesión que esta fisuración pudiera producir se minora a medida que avanza la hidratación de los HACEs, ya que, gran parte de estas fisuras se rellenan con nuevos productos de hidratación mejorando de esta forma la compacidad de la microestructura interna a la edad de 28 días por densificación de la misma.

La dosis de aditivo expansivo influye en la microestructura de muestras que se encuentran en régimen libre, ya que, a mayor proporción adicionada, mayor expansión (Apartado 4.5.1) y, por tanto, mayor fisuración de la matriz cementicia. El grado de fisuración inducido por la expansión libre puede ser de tal magnitud que las microfisuras no lleguen a rellenarse completamente con nuevos productos de hidratación, tal y como ocurre en las muestras de HACE-15%, quedando una microfisuración permanente que condiciona las características mecánicas presentadas por los HACE con la dosis del 15%.

Hay que incidir en que esta fisuración generalizada se relaciona con el hecho de una expansión descontrolada en régimen libre, ya que se prevé que, si las muestras estuvieran en régimen restringido, estas microfisuras acabarían rellenándose con nuevos productos de hidratación al no haber otro lugar en el que desarrollarse, dando lugar a una microestructura más densa y compacta.

- La caracterización mecánica a la edad de 28 días de hormigones expansivos de retracción compensada, conforme a las recomendaciones de las guías de uso tipo ACI 223, se puede llevar a cabo tras curado mediante los métodos convencionales de: sumergido en agua o en atmosfera saturada (humedad relativa $\geq 95\%$), ya que, tras la expansión, el desarrollo de resistencias es similar al de los hormigones fabricados con cemento portland convencional. En esta investigación se corrobora este aspecto, ya que, la fisuración producida por la expansión inicial moderada, en el caso del HACE-10%, parece corregirse por la formación de nuevos productos de hidratación en estas microfisuras durante el curado en atmosfera saturada, alcanzándose incluso resistencias a compresión y flexión superiores a las del hormigón de referencia.

Sin embargo, en el caso de hormigones expansivos pretensados químicamente esta caracterización mecánica está condicionada por el propio curado con aporte continuo de agua, ya que, este aporte contribuye al desarrollo de la expansión, la cual, si no está confinada (caso de probetas cilíndricas de 150 x 300 mm destinadas al ensayo de resistencia a compresión) y expande libremente, induce una microfisuración tal, que condiciona las características mecánicas del hormigón estudiado, como se puede ver en el caso del HACE-15%. Teniendo en cuenta que las soluciones constructivas que incorporan hormigones expansivos pretensados químicamente se emplean bajo la condición de restringido se propone analizar las características mecánicas del hormigón bajo la misma condición de servicio para determinar de forma correcta y representativa las propiedades mecánicas de estos hormigones.

- La dosis del 10% de DENKA CSA 20 se presenta, en régimen libre, como dosis de aditivo expansivo crítica a partir de la cual se produce una disminución de las características resistentes tanto en probetas prismáticas de dimensiones 40 x 40 x 160 mm como en probetas cilíndricas de 300 x 150 mm independientemente del tipo de curado y de la edad de ensayo.

4 DETERMINACIÓN DEL GRADO DE EXPANSIÓN EN PROBETAS PRISMÁTICAS SEGÚN MÉTODOS DE ENSAYO NORMALIZADOS

4.1 Introducción

Los hormigones expansivos debidamente restringidos se clasifican en función del grado de expansión desarrollado en:

- hormigones de retracción compensada, si la expansión inicial compensa o es ligeramente superior a la retracción prevista del hormigón,
- hormigones pretensados químicamente si la expansión desarrollada no solo compensa la retracción propia del hormigón sino que, una vez estabilizadas las deformaciones que tienen lugar por efecto de la expansión y retracción, genera un estado tensional (Figura 4.1) permanente a compresión en el hormigón y de tracción en el armado o el elemento de restricción.

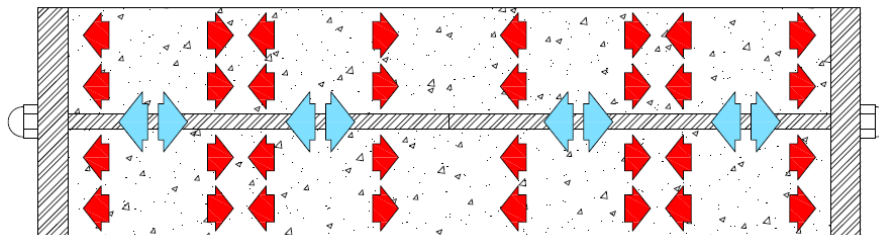


Figura 4.1 Deformaciones y tensiones en un hormigón expansivo restringido linealmente.

Esta investigación pretende el diseño de un HACE pretensado químicamente de tal forma que al aplicarlo como relleno en sistemas de refuerzo por confinamiento de pilares cilíndricos de hormigón mediante encamisados exteriores prefabricados, de acero o FRP que a su vez actúan como encofrado perdido, no sólo compense la retracción del hormigón sino que además induzca un grado de expansión tal que traccione la camisa exterior de refuerzo garantizando la puesta en tensión y la correcta transmisión de esta entre el pilar y el refuerzo exterior desde los instantes iniciales de puesta en obra y de forma permanente, transformando así un refuerzo pasivo, refuerzo directo con FRP, en uno activo capaz de conferir una presión de confinamiento sin necesidad de una deformación adicional del elemento objeto de refuerzo.

El diseño de este hormigón se realiza tomando como referencia las recomendaciones de la Guía ACI 223 y los valores de expansión recogidos en el apartado 2.2.9 y Tabla 2.1, respectivamente, siendo el método de ensayo ASTM C878 el empleado para evaluar los cambios de longitud lineal de los hormigones HACE fabricados.

Se debe tener en cuenta que los aditivos expansivos basados en la formación de Etringita (aditivos fabricados a base de sulfoaluminato cálcico) como es el caso del aditivo DENKA CSA 20,

manifiestan un poder expansivo dependiente, de entre otra serie de factores (apartado 2.2.7), de la dosis adicionada, del grado de restricción y de las condiciones de curado.

Por ello, en esta investigación, se evalúa el comportamiento expansivo en régimen libre y restringido de los HACE diseñados conforme a tres dosis de aditivo sometidas a dos ambientes de curado concretos.

Tabla 4.1 Ambientes de curado de probetas prismáticas.

Ambiente de curado	Referencia	Operación tras moldeo	Curado en cámara húmeda			Curado en cámara seca		
			Tiempo (días)	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Tiempo (días)	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)
Ambiente A1	A1	Ninguna	7 primeros días	20±2	> 95	Resto de días hasta un año	20±2	50±5
Ambiente A2	A2	Aplicar una envoltura de film protector	7 primeros días	20±2	> 95	Resto de días hasta un año	20±2	50±5

La elección de estos dos regímenes de curado se fundamenta en:

- **Ambiente A1:** Simula, durante los primeros 7 días, el ambiente más favorable para el desarrollo del grado de expansión de aditivos expansivos basados en sulfoaluminato cálcico, ya que el aporte externo y continuo de agua en una atmósfera saturada favorece la hidratación de estos compuestos expansivos. Transcurrido este tiempo, las probetas fabricadas se introducen en un ambiente sin aporte de agua y temperatura constante, para estudiar qué efecto tiene la acción de la retracción por secado y en menor medida de la retracción endógena sobre el grado final de expansión alcanzado.
- **Ambiente A2:** Representa el ambiente más susceptible de experimentar el hormigón empleado como relleno en el refuerzo de pilares por camisas prefabricadas, donde el hormigón no tiene ni aporte externo de agua ni pérdidas significativas de la misma. Para ello, se envuelven las probetas con film de polipropileno y se almacena en las mismas condiciones referidas en el apartado anterior, salvo que en este caso al impedirse el intercambio hídrico con el ambiente que rodea a las probetas la hidratación del compuesto expansivo se realiza únicamente con el agua contenida en el interior del hormigón y la acción más significativa sobre la magnitud de la expansión alcanzada vendrá dada por la acción contraria de la retracción endógena.

4.2 Objetivos

Los objetivos de esta fase se definen a continuación:

- Determinar y caracterizar, empleando métodos de ensayo recogidos en normativa ASTM, el cambio de longitud lineal sobre probetas prismáticas tipo viga, tanto en régimen libre como en restringido, que inducen las distintas dosis empleadas de aditivo expansivo DENKA CSA 20.
- Evaluar la influencia del porcentaje de aditivo en la magnitud de la expansión desarrollada.

- Evaluar la influencia de las condiciones de curado en el grado de expansión desarrollado y la retracción posterior
- Evaluar la influencia de las condiciones de restricción en el grado de expansión desarrollado.
- Determinar una dosis eficaz de aditivo expansivo DENKA CSA 20 que venza la restricción y garantice que el régimen de deformaciones permanece en positivo de forma permanente de tal forma que se consiga fabricar un hormigón pretensado químicamente.

4.3 Materiales y equipos

A continuación se definen los materiales y equipos necesarios para ejecutar esta fase de los trabajos.

4.3.1 Materiales

Los materiales que se utilizan en esta fase son los mismos que los referenciados en el apartado 3.3.1.

4.3.2 Equipos de ensayo y medición

4.3.2.1 Equipo comparador de longitud

El comparador de longitud es un equipo que consiste en un soporte vertical metálico, apoyado sobre una base robusta, en cuya parte superior se fija un indicador digital (precisión $\pm 0,002\text{mm}$) que marca la variación de longitud de la probeta fabricada respecto a la longitud de una barra de referencia colocada entre dos apoyos, uno fijo anclado a la base y otro móvil acoplado al indicador digital.

Se utiliza para medir los cambios de longitud que se producen en probetas prismáticas fabricadas a partir de pastas de cemento, mortero y hormigón.



Figura 4.2 Comparador de longitud.

4.3.2.2 Prensa de tracción y extensómetro

Prensa para ensayo a tracción de barras de hierro/acero modelo IBM-U4-1000-MDW de Ibertest, con una capacidad de carga de 1000 kN, clase 1, con registro de la deformación a través de un extensómetro modelo DD1 de HBM, de ± 2.5 mm de rango, con base de 50 mm.



Figura 4.3 Prensa Ibertest IBM-UA-1000-MDW.

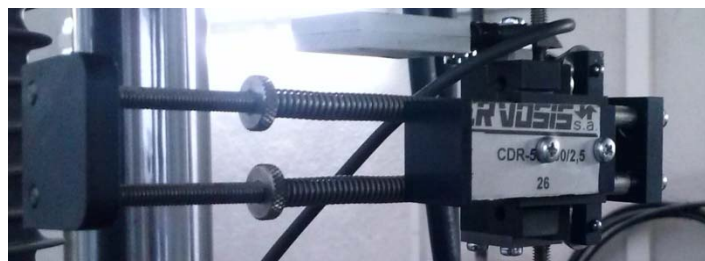


Figura 4.4 Extensómetro DD1.

4.4 Metodología

El programa experimental y métodos de ensayo que se exponen en los apartados siguientes recogen de forma detallada la metodología empleada para dar cumplimiento a los objetivos planteados en el apartado 4.2 de este documento.

4.4.1 Determinación del grado de expansión libre en probetas prismáticas de hormigón

La determinación del grado de expansión lineal en régimen libre de los HACE diseñados se realiza sobre una serie de cuatro probetas por cada dosificación de aditivo expansivo, dos con envoltura de film y dos sin ella, sometidas a los dos ambientes de curado referidos en la Tabla 4.1, utilizando como referencia el método de ensayo que recoge la tabla que sigue.

Tabla 4.2 Métodos de ensayo para determinar cambios de longitud en régimen libre de prismas de hormigón.

TIPO DE ENSAYO	MÉTODO	ENSAYO
CAMBIOS DE LONGITUD	ASTM C490	Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete
	ASTM C157	Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete

El ensayo ASTM C157 (Apartado 2.2.9.1 y Figura 2.32) es utilizado comúnmente para determinar la magnitud de la retracción por secado de los hormigones cuando son sometidos a unas condiciones de curado concretas, pero en este caso se va a emplear para evaluar el grado de expansión lineal sin ningún tipo de restricción cuando las probetas son sometidas a los regímenes de curado referidos en la Tabla 4.1.

Teniendo en cuenta lo expuesto, la metodología seguida para llevar a cabo este ensayo se describe a continuación.

- Una vez amasado el hormigón según el protocolo recogido en el apartado 3.4.2, se procede al vertido de éste en los moldes de acero de dimensiones interiores 286 x 76 x 76 mm, fabricando así una serie de cuatro probetas por cada HACE diseñado. Seguidamente se cubren con film los moldes y se introducen en la cámara de curado durante 24 horas a 20 ± 2 °C.
- Transcurrido este tiempo, se desmoldan las probetas, envolviendo con film las que así lo requieran, y se toma la primera medida, “*medida referencia*”, de peso, en la balanza, y longitud, en el comparador. Así mismo, en este instante, se marca la probeta para indicar la dirección en la que se ha de realizar la medida de longitud a lo largo de todo el ensayo.
- Acto seguido, conforme a los dos ambientes de curado descritos en la Tabla 4.1, se introducen las probetas en la cámara correspondiente, realizándose las medidas de peso y cambio de longitud diariamente hasta el día 14, semanalmente hasta el día 28 y mensualmente hasta completar un año.

4.4.2 Determinación del grado de expansión restringido en probetas prismáticas de hormigón

La determinación del grado de expansión lineal restringida de los HACE diseñados se realiza sobre una serie de cuatro probetas por cada dosificación de aditivo expansivo, dos con envoltura de film y dos sin ella, sometidas a dos ambientes de curado, utilizando como referencia el método de ensayo y la guía de uso que aparecen recogidos en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Métodos de ensayo para determinar la expansión restringida en prismas de hormigón.

TIPO DE ENSAYO	MÉTODO	ENSAYO
CAMBIOS DE LONGITUD	ACI 223	Guide for the Use of Shrinkage-Compensating Concrete
	ASTM C878	Standard Test Method for Restrained Expansion of Shrinkage-Compensating Concrete
	ASTM C157	Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete

Previo a la evaluación de los cambios de longitud en probetas prismáticas y con objeto de disponer de forma más sencilla de varillas roscadas con las características de carga y deformación que especifica la norma ASTM C878 se deciden seleccionar 5 varillas roscadas de carácter comercial fabricadas en España para ser ensayadas y comparadas con una varilla patrón que cumple con las especificaciones de la ASTM C878.

El ensayo a llevar a cabo sobre las varillas roscadas seleccionadas es un ensayo de tracción que se realiza con la prensa referenciada en el Apartado 4.3.2.2.

La Tabla 4.4 recoge las tipologías y características de las varillas roscadas ensayadas mientras que la Figura 4.5 muestra el gráfico derivado del ensayo a tracción con registro de la carga y la deformación.

Tabla 4.4 Características de las varillas roscadas.

Referencia	Nombre del producto	Estándar	Material	Acabado	Métrica
V-1	Varilla roscada	DIN 975	Hierro	plano/roscado	M-5
V-2	Varilla roscada	DIN 975	Acero	cincado/roscado	M-5
V-3	Varilla roscada	DIN 975	Acero inoxidable A2	plano/roscado	M-5
V-4	Varilla roscada	DIN 975	Latón	plano/roscado	M-5
V-5	Varilla roscada	DIN 975	Hierro	plano/roscado	5/32

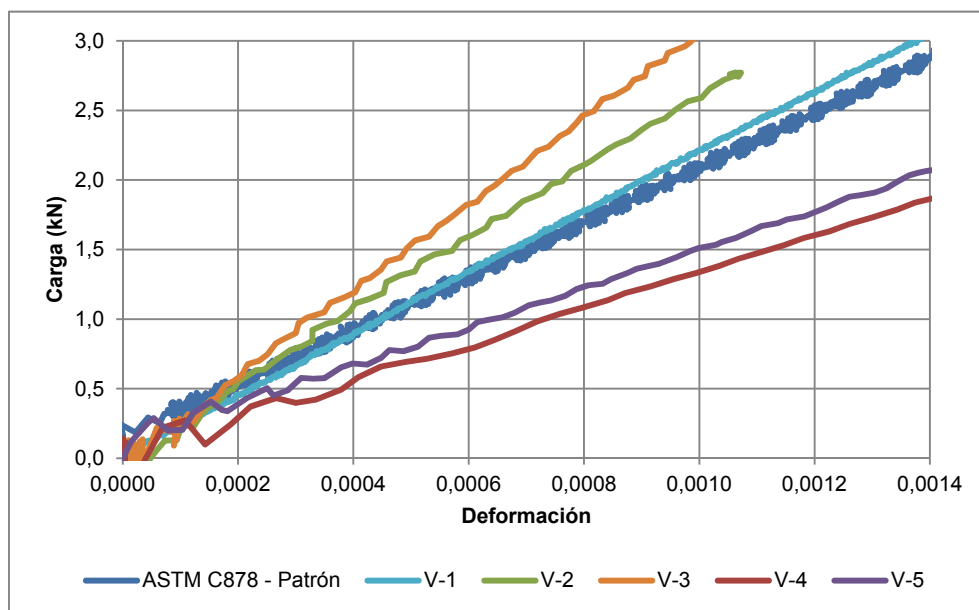


Figura 4.5 Gráfica comparativa Carga-Deformación.

A la vista de los resultados obtenidos en el ensayo a tracción de las varillas roscadas se selecciona para la realización del dispositivo *restraining cage* la varilla referenciada como V-1 ya que es la que más se aproxima al comportamiento carga-deformación de la varilla patrón y cumple además con los requisitos fijados en la norma ASTM C878.

Teniendo en cuenta lo expuesto, la metodología seguida para llevar a cabo el ensayo ASTM C878 (Apartado 2.2.9.2, Figura 2.36) se describe a continuación.

- Una vez amasado el hormigón según el protocolo recogido en el apartado 3.4.2, se procede al vertido de éste en los moldes de acero, en cuyo interior se dispone el dispositivo *restraining cage*, fabricando así una serie de cuatro probetas por cada HACE diseñado. Seguidamente se cubren con film los moldes y se introducen en la cámara de curado durante 24 horas a 20 ± 2 °C

** (La norma ASTM C878 indica que el desmolde de las probetas ha de hacerse a las 6 horas pero a esta edad el hormigón aún no ha endurecido lo suficiente como para garantizar que la probeta mantenga su integridad durante la manipulación de la misma por lo que se decide esperar hasta las 24 horas).*

- Transcurrido este tiempo, se desmoldan las probetas, envolviendo con film las que así lo requieran, y se toma la primera medida, “*medida referencia*”, de peso, en la balanza, y longitud, en el comparador. Así mismo, en este instante, se marca la probeta para indicar la dirección en la que se ha de realizar la medida de longitud a lo largo de todo el ensayo.
- Acto seguido, conforme a los dos ambientes de curado descritos en la Tabla 4.1, se introducen las probetas en la cámara húmeda, realizándose las medidas de peso y cambio de longitud diariamente hasta el día 14, semanalmente hasta el día 28 y mensualmente hasta completar un año.

4.5 Resultados y discusión

Este capítulo recoge los resultados obtenidos como consecuencia de la aplicación del programa experimental expuesto en el apartado anterior.

En los apartados que siguen se muestran los resultados de cambios de longitud, en régimen libre y restringido, y secado de las dosificaciones de HACE fabricadas, excepto los correspondientes a la dosis del 50% de aditivo expansivo DENKA CSA 20, dosis que en cualquiera de los regímenes de curado y condiciones de restricción estudiados, produce un grado de expansión tal que provoca la fisuración generalizada de la probeta de hormigón en la condición libre y una deformación transversal excesiva en la probeta en la condición restringida, haciendo imposible un registro fiable de la medida de cambio de longitud.

La Figura 4.6 muestra el efecto que produce la sobredosificación de aditivo expansivo DENKA CSA 20 (dosis del 50%).



Figura 4.6 Probeta prismática con 50% de aditivo expansivo.

4.5.1 Determinación del grado de expansión lineal libre en probetas prismáticas de hormigón

La determinación del grado de expansión lineal libre se realiza conforme a lo descrito en el apartado 4.4.1, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 4.5 Resultados de variación de longitud y peso en régimen libre – HACE-0%.

Hormigón-R restricción-Curado	Medidas	Día	Día	Día	Día	Día
		0	7	14	28	56
HACE-0% - SR - (CH+CS)	Δ Longitud (%)	0,000	0,017	-0,019	-0,045	-0,062
	Δ Peso (%)	0,000	0,789	-1,372	-2,169	-2,873
HACE-0% - SR - (CH+CS+Film)	Δ Longitud (%)	0,000	-0,006	-0,016	-0,022	-0,034
	Δ Peso (%)	0,000	0,018	-0,128	-0,196	-0,387

Hormigón-R restricción-Curado	Medidas	Día	Día	Día	Día
		84	112	224	476
HACE-0% - SR - (CH+CS)	Δ Longitud (%)	-0,072	-0,078	-0,083	-0,086
	Δ Peso (%)	-3,232	-3,392	-3,528	-3,678
HACE-0% - SR - (CH+CS+Film)	Δ Longitud (%)	-0,042	-0,053	-0,060	-0,063
	Δ Peso (%)	-0,485	-0,817	-1,496	-2,123

*SR: Sin Restricción

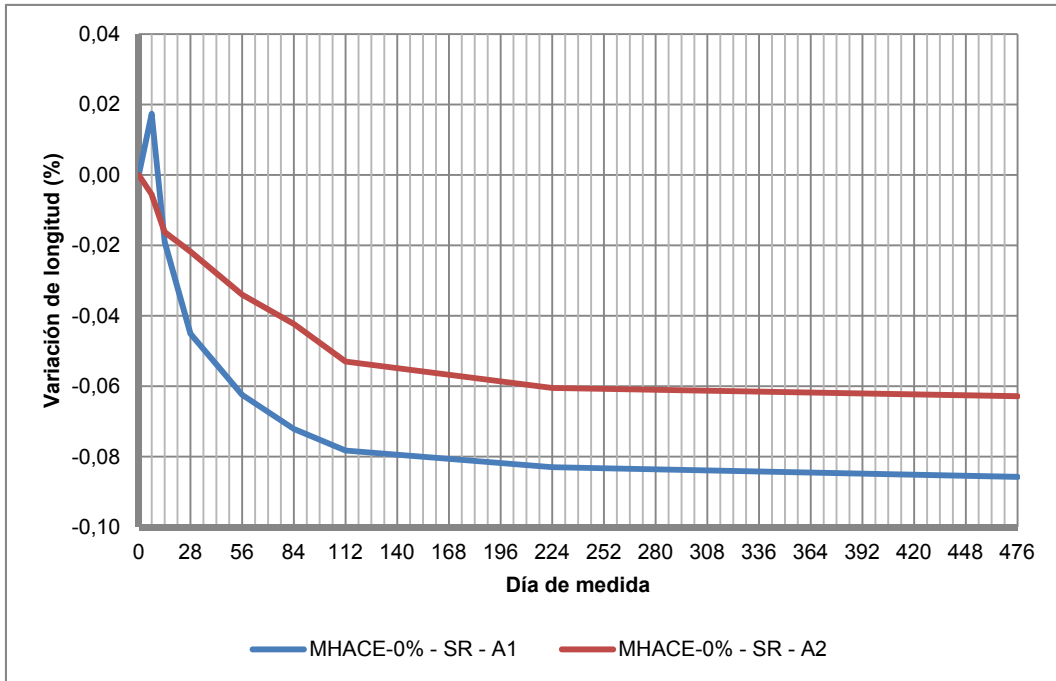


Figura 4.7 Curvas variación de longitud HACE-0%.

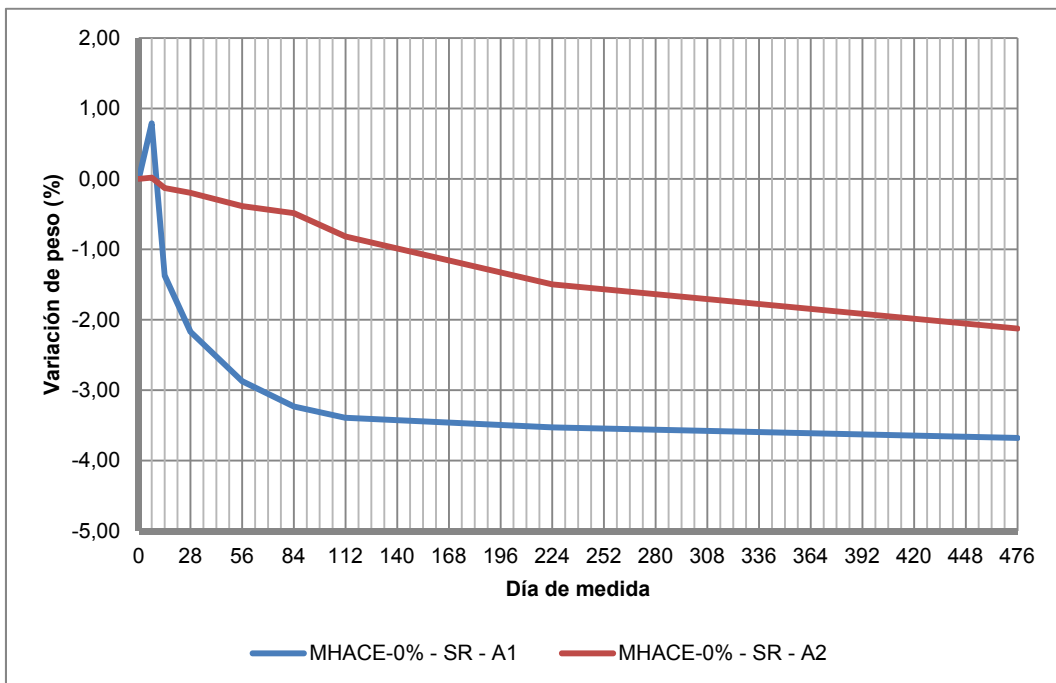


Figura 4.8 Curvas variación de peso HACE-0%.

Tabla 4.6 Resultados de variación de longitud y peso en régimen libre – HACE-10%.

Hormigón-R restricción-Curado	Medidas	Día	Día	Día	Día	Día
		0	1	2	3	7
HACE-10% - SR - (CH+CS)	Δ Longitud (%)	0,000	0,030	0,036	0,043	0,060
	Δ Peso (%)	0,000	0,085	0,207	0,442	0,808
HACE-10% - SR - (CH+CS+Film)	Δ Longitud (%)	0,000	0,032	0,035	0,036	0,040
	Δ Peso (%)	0,000	0,007	0,044	0,075	0,165

Hormigón-R restricción-Curado	Medidas	Día	Día	Día	Día	Día
		14	21	28	56	84
HACE-10% - SR - (CH+CS)	Δ Longitud (%)	0,040	0,026	0,023	0,017	0,013
	Δ Peso (%)	-1,234	-1,883	-2,028	-2,195	-2,305
HACE-10% - SR - (CH+CS+Film)	Δ Longitud (%)	0,035	0,033	0,031	0,029	0,026
	Δ Peso (%)	-0,008	-0,162	-0,228	-0,265	-0,362

Hormigón-R restricción-Curado	Medidas	Día	Día	Día	Día	Día
		112	140	168	224	476
HACE-10% - SR - (CH+CS)	Δ Longitud (%)	0,007	-0,004	-0,007	-0,012	-0,015
	Δ Peso (%)	-2,488	-2,792	-2,916	-3,075	-3,177
HACE-10% - SR - (CH+CS+Film)	Δ Longitud (%)	0,020	0,014	0,007	0,004	-0,008
	Δ Peso (%)	-0,509	-0,830	-1,424	-1,708	-2,226

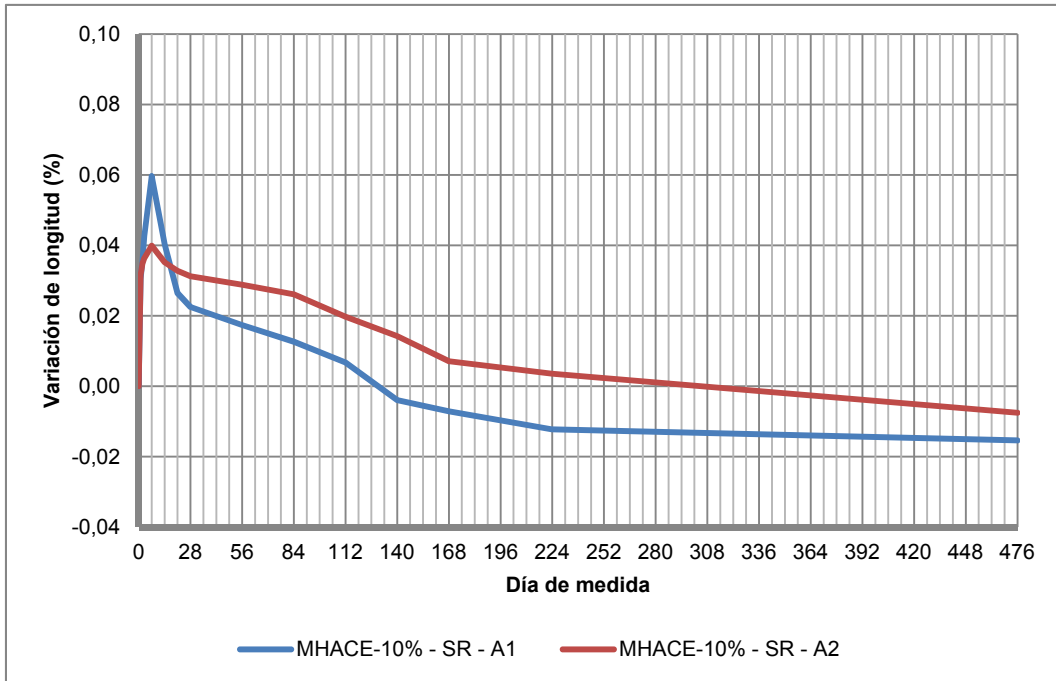


Figura 4.9 Curvas variación de longitud HACE-10%.

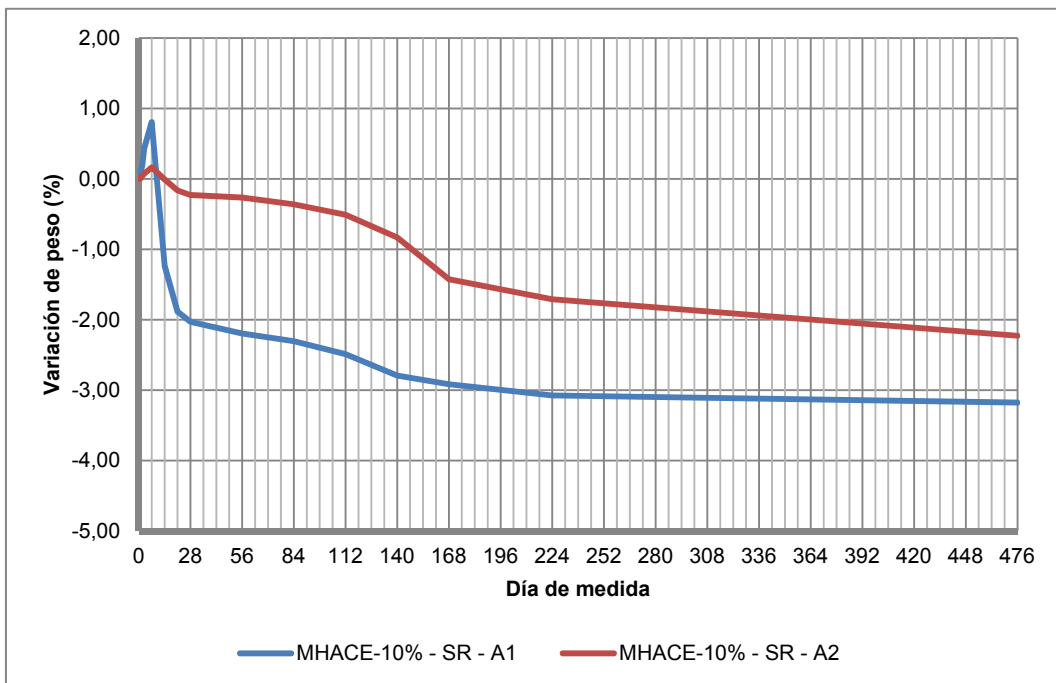


Figura 4.10 Curvas variación de peso HACE-10%.

Tabla 4.7 Resultados de variación de longitud y peso en régimen libre – HACE-15%.

Hormigón-R restricción-Curado	Medidas	Día	Día	Día	Día	Día
		0	1	2	3	7
HACE-15% - SR - (CH+CS)	Δ Longitud (%)	0,000	0,158	0,441	0,732	0,996
	Δ Peso (%)	0,000	0,095	0,233	0,395	1,144
HACE-15% - SR - (CH+CS+Film)	Δ Longitud (%)	0,000	0,097	0,254	0,403	0,505
	Δ Peso (%)	0,000	0,055	0,076	0,099	0,184

Hormigón-R restricción-Curado	Medidas	Día	Día	Día	Día	Día
		14	21	28	56	84
HACE-15% - SR - (CH+CS)	Δ Longitud (%)	0,940	0,911	0,893	0,867	0,853
	Δ Peso (%)	-2,606	-3,120	-3,379	-3,728	-3,872
HACE-15% - SR - (CH+CS+Film)	Δ Longitud (%)	0,512	0,510	0,506	0,495	0,489
	Δ Peso (%)	-0,091	-0,214	-0,288	-0,612	-0,842

Hormigón-R restricción-Curado	Medidas	Día	Día	Día	Día	Día
		112	140	168	224	476
HACE-15% - SR - (CH+CS)	Δ Longitud (%)	0,848	0,847	0,849	0,848	0,828
	Δ Peso (%)	-3,895	-3,889	-3,845	-3,805	-3,834
HACE-15% - SR - (CH+CS+Film)	Δ Longitud (%)	0,482	0,479	0,474	0,468	0,434
	Δ Peso (%)	-1,017	-1,142	-1,338	-1,719	-2,574

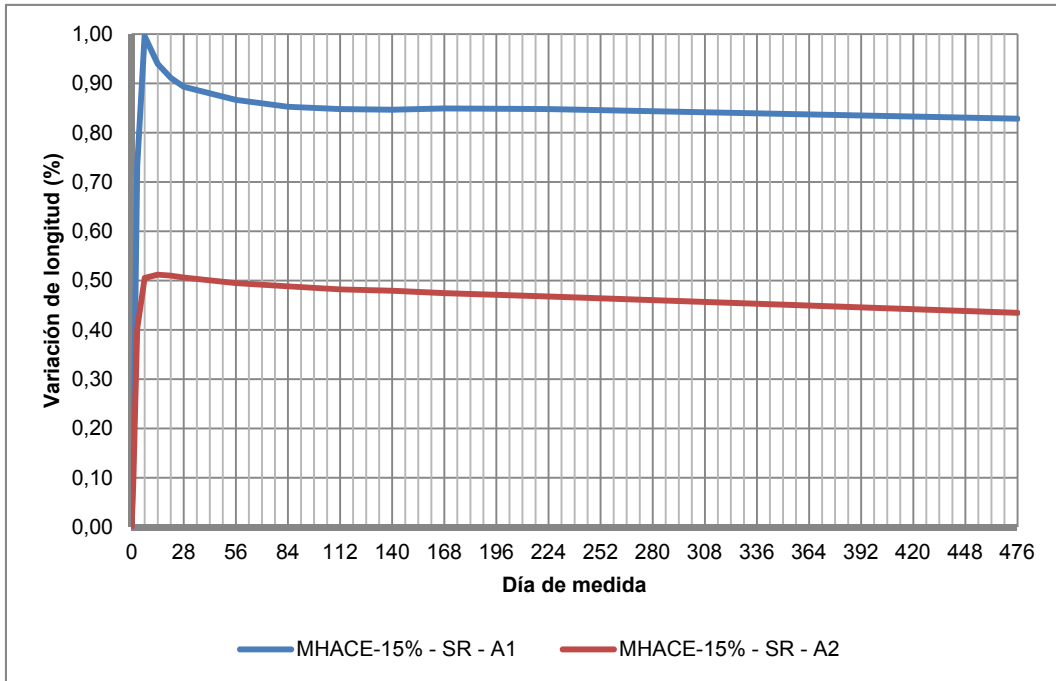


Figura 4.11 Curvas variación de longitud HACE-15%.

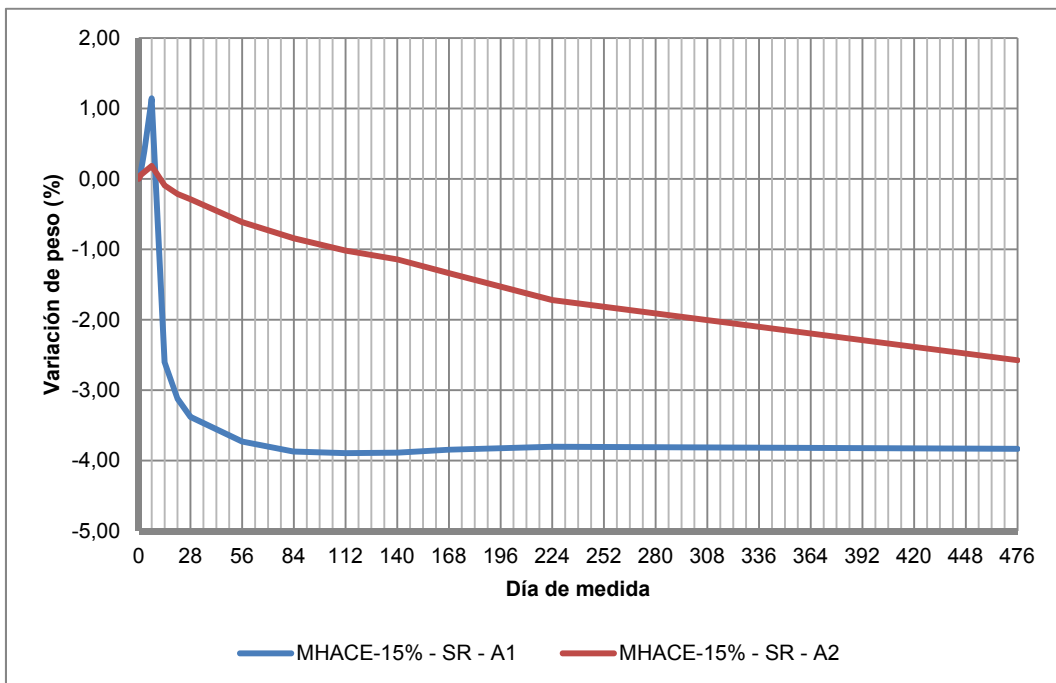


Figura 4.12 Curvas variación de peso HACE-15%.

4.5.2 Determinación del grado de expansión lineal restringido en probetas prismáticas de hormigón

La determinación del grado de expansión lineal restringida se realiza conforme a lo descrito en el apartado 4.4.2, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 4.8 Resultados de variación de longitud y peso en régimen restringido – HACE-10%.

Hormigón-Restricción-Curado	Medidas	Día	Día	Día	Día	Día
		0	1	2	3	7
HACE-10% - CR - (CH+CS)	Δ Longitud (%)	0,000	0,023	0,025	0,030	0,043
	Δ Peso (%)	0,000	0,020	0,171	0,343	0,656
HACE-10% - CR - (CH+CS+Film)	Δ Longitud (%)	0,000	0,018	0,020	0,021	0,022
	Δ Peso (%)	0,000	-0,005	0,017	0,050	0,120

Hormigón-Restricción-Curado	Medidas	Día	Día	Día	Día	Día
		14	21	28	56	84
HACE-10% - CR - (CH+CS)	Δ Longitud (%)	0,024	0,013	0,011	0,007	0,002
	Δ Peso (%)	-0,795	-1,292	-1,410	-1,476	-1,648
HACE-10% - CR - (CH+CS+Film)	Δ Longitud (%)	0,020	0,015	0,012	0,009	0,006
	Δ Peso (%)	0,002	-0,051	-0,080	-0,148	-0,204

Hormigón-Restricción-Curado	Medidas	Día	Día	Día	Día	Día
		112	140	168	224	476
HACE-10% - CR - (CH+CS)	Δ Longitud (%)	-0,004	-0,010	-0,014	-0,019	-0,024
	Δ Peso (%)	-1,809	-1,990	-2,159	-2,391	-2,529
HACE-10% - CR - (CH+CS+Film)	Δ Longitud (%)	0,004	0,000	-0,006	-0,010	-0,018
	Δ Peso (%)	-0,278	-0,491	-0,795	-1,333	-2,022

*CR: Con Restricción

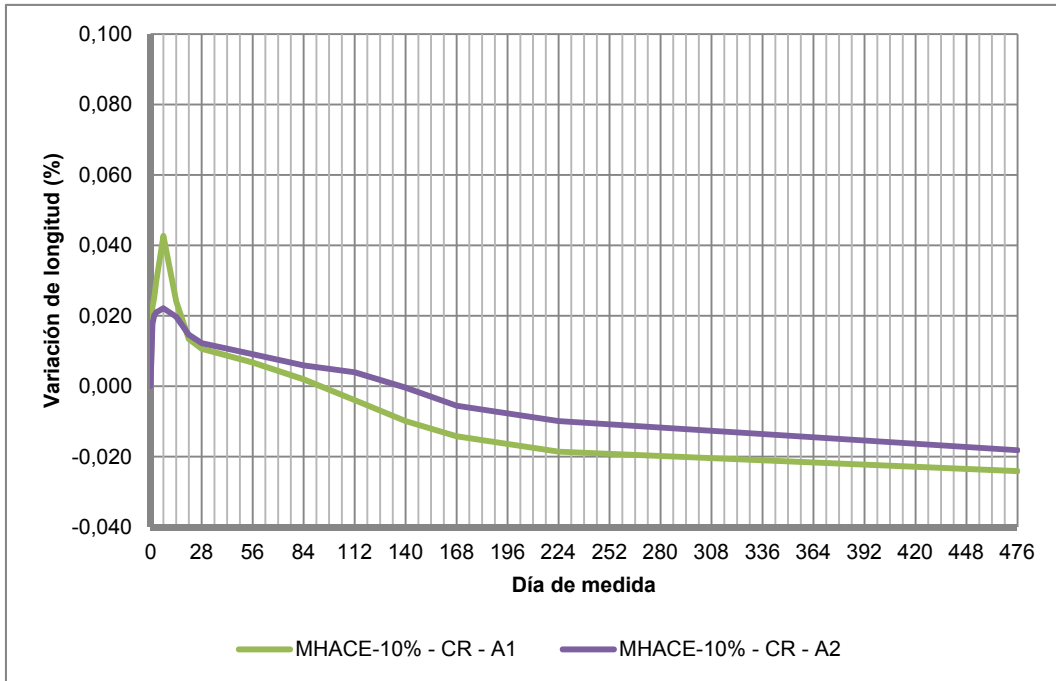


Figura 4.13 Curvas variación de longitud HACE-10%.



Figura 4.14 Curvas variación de peso HACE-10%.

Tabla 4.9 Resultados de variación de longitud y peso en régimen restringido – HACE-15%.

Hormigón-R restricción-Curado	Medidas	Día	Día	Día	Día	Día
		0	1	2	3	7
HACE-15% - CR - (CH+CS)	Δ Longitud (%)	0,000	0,058	0,121	0,189	0,253
	Δ Peso (%)	0,000	0,056	0,134	0,266	0,768
HACE-15% - CR - (CH+CS+Film)	Δ Longitud (%)	0,000	0,064	0,122	0,166	0,198
	Δ Peso (%)	0,000	0,041	0,060	0,086	0,152

Hormigón-R restricción-Curado	Medidas	Día	Día	Día	Día	Día
		14	21	28	56	84
HACE-15% - CR - (CH+CS)	Δ Longitud (%)	0,217	0,200	0,189	0,177	0,160
	Δ Peso (%)	-1,627	-1,961	-2,236	-2,557	-2,679
HACE-15% - CR - (CH+CS+Film)	Δ Longitud (%)	0,193	0,191	0,187	0,179	0,165
	Δ Peso (%)	0,137	0,070	0,013	-0,230	-0,403

Hormigón-R restricción-Curado	Medidas	Día	Día	Día	Día	Día
		112	140	168	224	476
HACE-15% - CR - (CH+CS)	Δ Longitud (%)	0,156	0,157	0,157	0,161	0,147
	Δ Peso (%)	-2,753	-2,818	-2,872	-2,838	-2,953
HACE-15% - CR - (CH+CS+Film)	Δ Longitud (%)	0,148	0,141	0,136	0,132	0,112
	Δ Peso (%)	-0,534	-0,629	-0,782	-1,116	-1,876

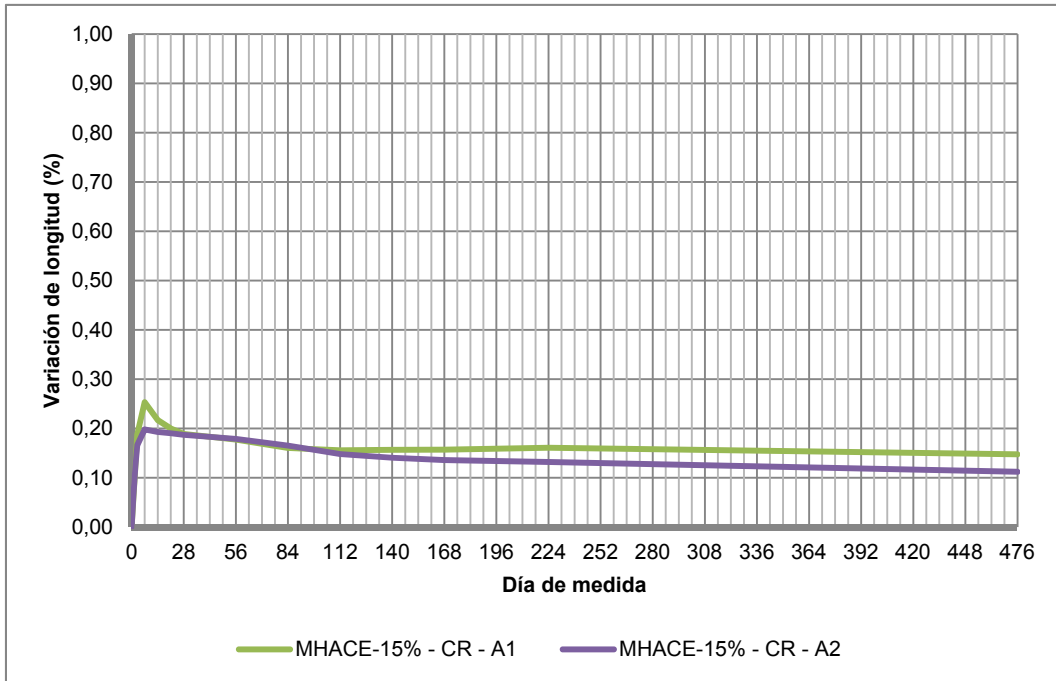


Figura 4.15 Curvas variación de longitud HACE-15%.

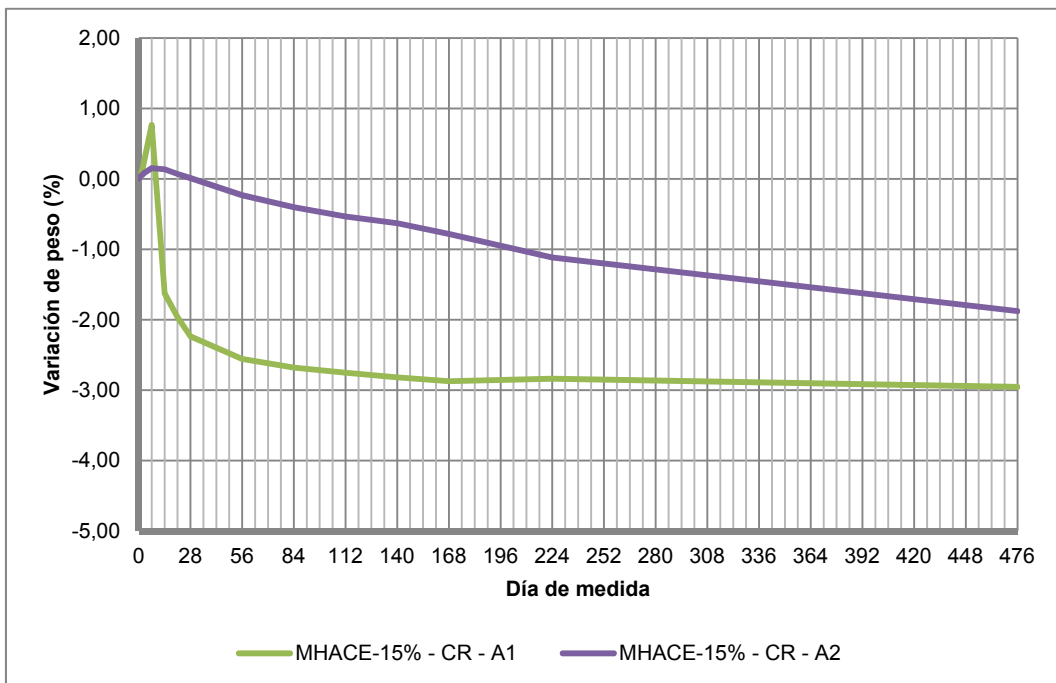


Figura 4.16 Curvas variación de peso HACE-15%.

4.5.3 Análisis de resultados

Conforme a los resultados expuestos en los dos apartados anteriores se analizan las curvas de expansión y secado teniendo en cuenta cómo influyen en el desarrollo de la expansión los siguientes factores:

- Tipo de curado.
- Dosis adicionada de aditivo expansivo.
- Grado de restricción.

4.5.3.1 Periodo Inicial en cámara húmeda

- La expansión de las probetas con 10% y 15% de aditivo expansivo DENKA CSA 20 curadas en ambiente A1, cámara húmeda sin envoltura de film de polipropileno, se produce claramente durante los 7 primeros días de curado, en los que las probetas están expuestas a una atmósfera saturada ($HR > 95\%$) y por tanto hay un aporte externo y continuo de agua que favorece la hidratación del compuesto expansivo y la formación de Etringita facilitando así el desarrollo de las reacciones expansivas.
- En ambiente de curado tipo A2, donde las probetas se curan en cámara húmeda con cobertura de film, la expansión de las dosis estudiadas se desarrolla, al igual que el ambiente A1, durante los primeros 7 días, prolongándose incluso hasta el día 14 en el caso de la dosis del 15%, aunque el aumento de la expansión entre el día 7 y el 14 es de un 1%. En el caso del ambiente de curado tipo A2, la hidratación del compuesto expansivo se produce fundamentalmente con el agua propia de composición del hormigón ya que la cobertura de film impide, aunque no totalmente, el intercambio hídrico con el ambiente (aporte externo de agua). Por tanto, en ambiente A2, la cantidad de agua disponible para la hidratación del aditivo expansivo es inferior que en ambiente A1, lo que justifica el menor valor de expansión registrado en este ambiente A2 a igual dosis de aditivo expansivo y condición de restricción.
- Las curvas que recogen el desarrollo de la expansión de los HACE fabricados, con las dosis propuestas y en las condiciones de restricción y ambiente referidas, presentan un comportamiento en deformación en cámara húmeda similar, alcanzando el máximo de expansión a la edad de 7 días.
- Si bien el régimen de expansión es similar, sí que se observa que, en los casos estudiados, el desarrollo de la expansión no es completamente lineal pudiéndose diferenciar dos periodos en lo que se refiere al desarrollo y velocidad de la expansión: uno inicial, de fuerte pendiente, que se relaciona con un rápido desarrollo temprano de la expansión y otro, posterior, correspondiente con una evolución más progresiva de dicha expansión.
- El periodo de duración de cada tramo se muestra dependiente en primera instancia de la dosis de aditivo expansivo, de esta forma se observa como los HACE con un 15% de aditivo DENKA CSA 20 presentan una expansión inicial hasta el día 3, mientras que los que incorporan una dosis del 10% la tendencia cambia a partir del día 1.

Remarcar que en 6 de las 8 curvas de expansión estudiadas el cambio de pendiente referido se produce cuando se alcanza un valor de la expansión en torno al 80% de la expansión máxima alcanzada al final del periodo de curado dentro de la cámara húmeda, Figura 4.17 y Figura 4.18.

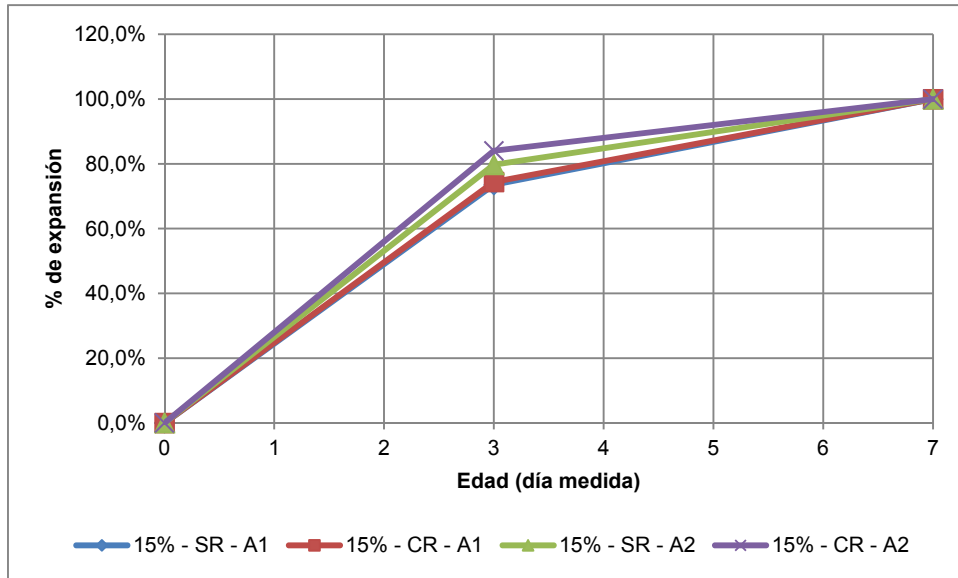


Figura 4.17 HACE-15% - Relación entre la expansión a 3 días y a 7.

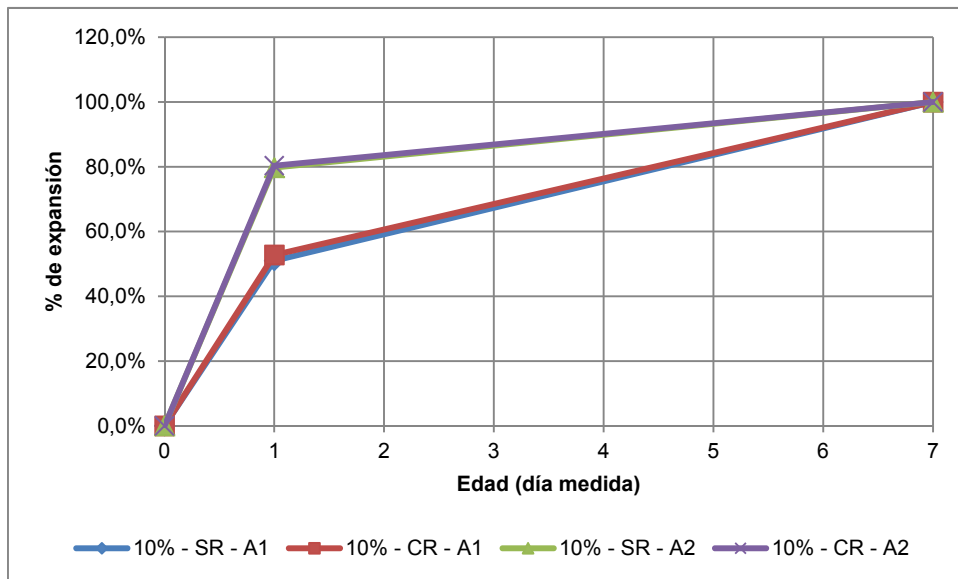


Figura 4.18 HACE-10% - Relación entre la expansión a 3 días y a 7.

4.5.3.2 Periodo sucesivo en cámara seca

- Una vez se sacan las probetas de la cámara húmeda (cesa el aporte externo de agua) y se introducen en cámara seca ($HR = 50 \pm 5\%$), se produce, en todos los casos, la contracción de las mismas debido al fenómeno de retracción, salvo en el caso mencionada anteriormente de dosis del 15% en régimen libre y protección del film donde los fenómenos de retracción no se manifiestan hasta el día 14. Los fenómenos de retracción predominantes en este estudio son la retracción endógena y la retracción de secado. La mayor o menor influencia de uno u otro tipo de retracción depende del modo (ambiente) de curado.
- En ambiente A1, donde las probetas no tienen cobertura de film, al introducir las probetas en cámara seca se observa, durante los primeros días, un brusco cambio de longitud en sentido contrario (contracción) acompañado de una fuerte pérdida de peso, asociada a la pérdida de agua al ambiente, que tiende a estabilizarse con el tiempo. En este caso el mecanismo de retracción predominante es la retracción por secado.

El comportamiento en deformación y de pérdida de peso descrito se observa en las dos condiciones de restricción impuestas y en los tres HACE analizados de lo que se deduce que dichos comportamientos son inherentes al hormigón e independientes de la dosis de aditivo adicionada y de la condición de restricción impuesta.

En cuanto a los regímenes de secado, la velocidad del mismo es similar e independiente de la dosis de aditivo.

En cierta forma, a la vista de los resultados obtenidos, se podría relacionar la magnitud de la retracción por secado con la dosis adicionada de aditivo expansivo DENKA CSA 20 ya que es de esperar que al incrementar la dosis de aditivo expansivo adicionada aumente la formación de Etringita y por ende el agua fijada en el interior del hormigón (cabe recordar que la Etringita, compuesto expansivo, está compuesta por 32 moléculas de agua).

Esto es una hipótesis a corroborar en trabajos posteriores, ya que, en este estudio no puede asegurarse en el caso de las probetas fabricadas a partir del HACE-10% porque tanto la curva de cambio de longitud como la de variación de peso se ven alteradas debido a un problema con el control de la humedad relativa de la cámara seca donde se realiza el curado, lo que imposibilita comparar la magnitud de la retracción por secado con la dosis de aditivo.

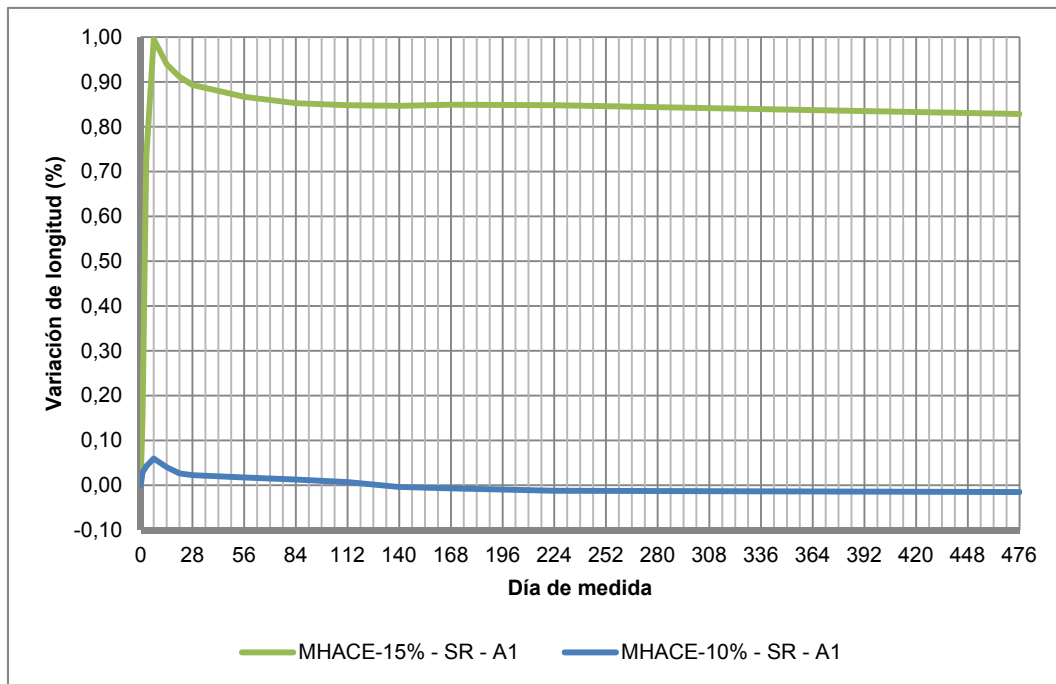


Figura 4.19 Ambiente de curado A1 - Influencia de la dosis de aditivo expansivo en la magnitud de la expansión máxima y remanente en régimen libre.

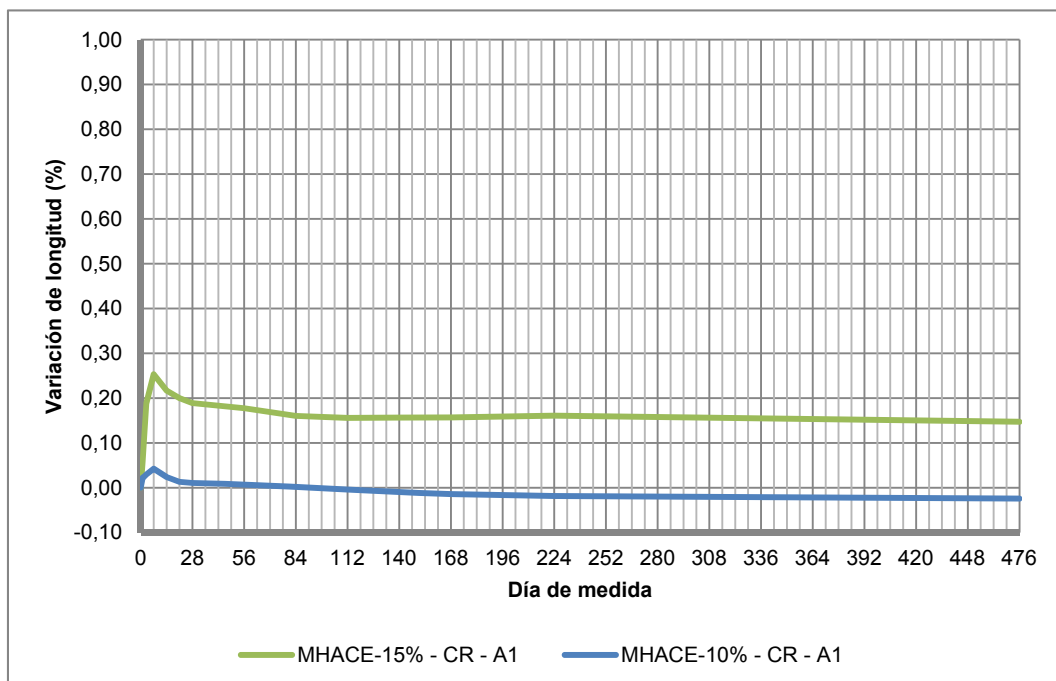


Figura 4.20 Ambiente de curado A1 - Influencia de la dosis de aditivo expansivo en la magnitud de la expansión máxima y remanente en régimen restringido.

- En ambiente A2, al sacar las probetas de la cámara húmeda e introducirlas en cámara seca, se observa un cambio de longitud en sentido contrario progresivo acompañado de una pérdida de peso gradual, al contrario de lo que ocurre en el ambiente descrito anteriormente donde dichos cambios suceden de forma brusca. El comportamiento en deformación se relaciona con la retracción endógena de los hormigones que se considera el mecanismo de retracción predominante en este caso ya que el efecto de la retracción de secado queda minimizado por la cobertura de film que impide de forma parcial la pérdida de agua o el intercambio hídrico con el ambiente.

En este ambiente de curado se ha de tener en cuenta que, debido a la manipulación de las probetas para llevar a cabo las medidas de cambio de longitud y peso, la cobertura de film se va desgastando con el paso del tiempo por lo que la acción de aislamiento que ejerce esta no es completa y se pierde con el paso del tiempo.

Al igual que en el ambiente A1, el comportamiento en deformación y de pérdida de peso descrito se observa en las dos condiciones de restricción impuestas y en los dos HACE analizados de lo que se deduce que dichos comportamientos son, como se decía anteriormente, inherentes al propio hormigón e independientes de la dosis de aditivo adicionada y de la condición de restricción impuesta.

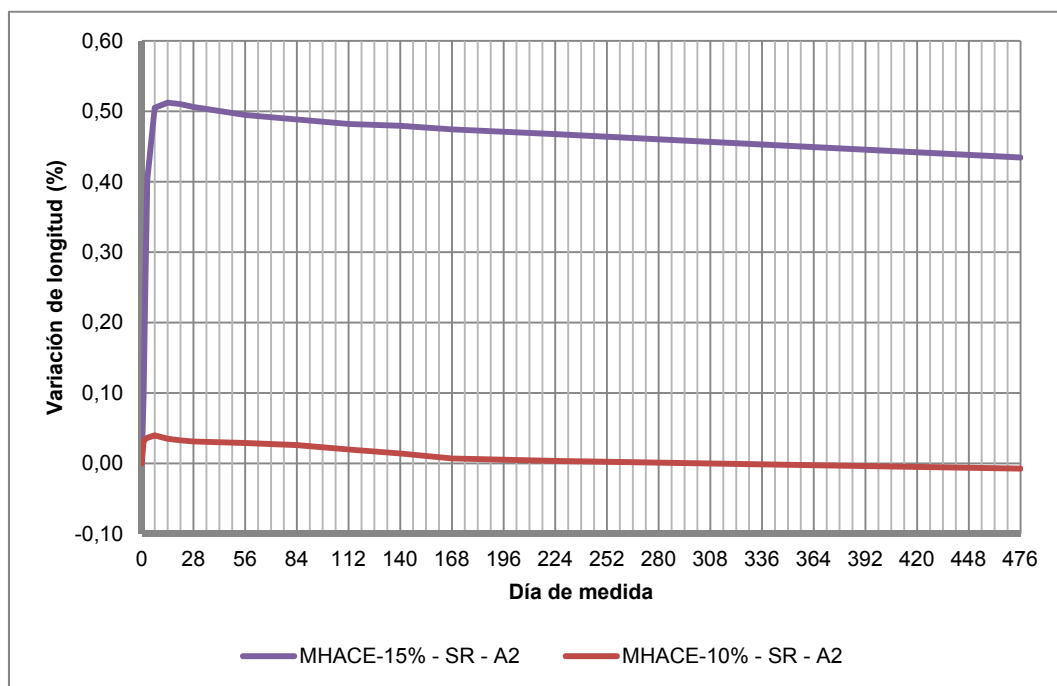


Figura 4.21 Ambiente de curado A2 - Influencia de la dosis de aditivo expansivo en la magnitud de la expansión máxima y remanente en régimen libre.

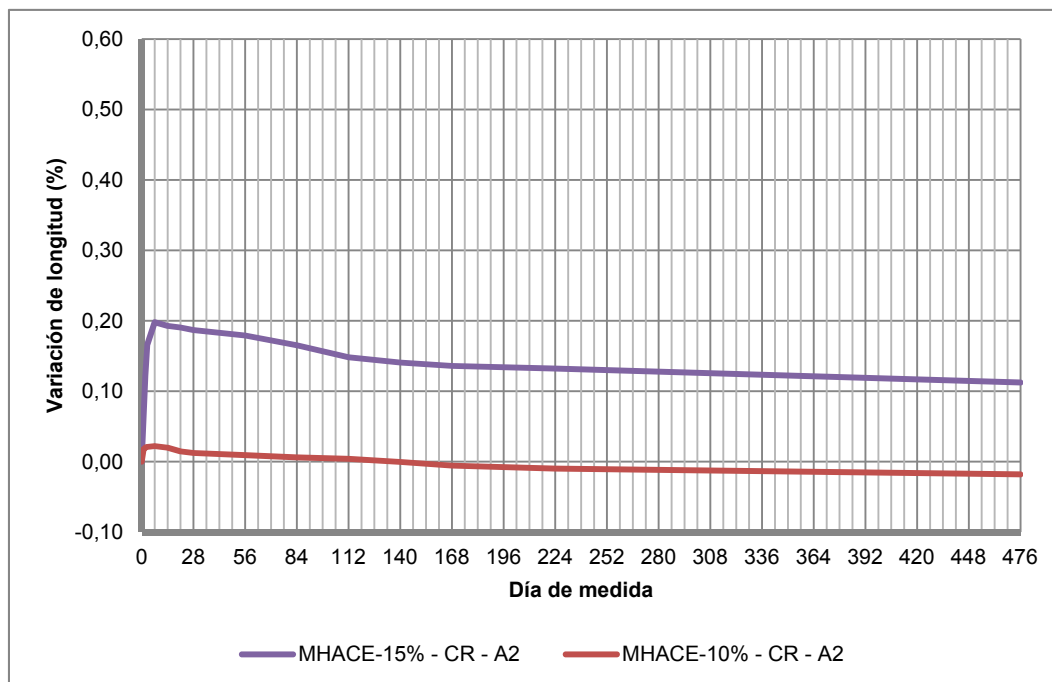


Figura 4.22 Ambiente de curado A2 - Influencia de la dosis de aditivo expansivo en la magnitud de la expansión máxima y remanente en régimen restringido.

En resumen:

- El porcentaje de aditivo expansivo influye en la magnitud de las expansiones desarrolladas de tal forma que a mayor porcentaje de aditivo mayor es la magnitud de la expansión. Las dosis empleadas en este estudio, 10 y 15%, son suficientes, en primera instancia, para vencer la restricción impuesta y desarrollar deformaciones en sentido positivo alcanzándose el valor máximo de expansión para cada HACE estudiado, tanto en ambiente A1 como en ambiente A2, al final del curado en cámara húmeda.

El valor máximo de expansión en el ambiente de curado A1 para la dosis del 10% frente a la del 15% es del 6,0% en la condición de libre y del 17,0% en la de restringido, mientras que en el ambiente de curado tipo A2, es del 7,9% en libre y 11,1% en régimen coaccionado.

Sin embargo, al introducir las probetas en cámara seca se comprueba que la dosis del 10% no es suficiente para impedir la retracción global del elemento, ya que transcurridos un tiempo desde la amasada las probetas experimentan una pérdida de longitud respecto al tamaño inicial.

- El curado en ambiente A1 con aporte externo y continuo de agua frente al curado en ambiente A2, probetas aisladas mediante cobertura de film, favorece el desarrollo de un mayor grado de expansión. Este hecho es de esperar si se tiene en cuenta que la hidratación del compuesto expansivo se ve favorecida por el aporte de agua externo.

En los casos estudiados los HACE-10% presentan un grado de expansión en el ambiente A2 respecto del ambiente A1 del 66,9% en la condición SR y un 51,9% en la condición CR. Del mismo modo, aunque en porcentajes distintos, las probetas de HACE-15% muestran un comportamiento similar, siendo el valor de la expansión máxima registrada del 51,4% en la condición SR y del 78,2% en la CR.

- El efecto de la restricción sobre la expansión máxima desarrollada se hace patente en los dos ambientes de curado estudiados, ya que en ambos casos el desarrollo de la expansión es inferior al obtenido en régimen libre. De esta forma, en el ambiente de curado tipo A1 la expansión restringida frente a la libre es de un 71,5% en el HACE-10% y de un 25,4% en el HACE-15%, mientras que en el ambiente de curado tipo A2 es de un 55,4% para el HACE-10% y de un 38,7% para el HACE-15%.
- Por otro lado, como se refiere en el apartado anterior 4.5.3.2, una vez se extraen los probetas de la cámara húmeda y se introducen en cámara seca se produce un fenómeno de retracción condicionado por el tipo de ambiente de curado (con o sin film protector) de tal forma que para los HACE-15% el valor máximo de la expansión se reduce entre un 9-15% para las probetas sin restricción y entre un 33-37% para las probetas con restricción, manteniendo por tanto en todos los casos una expansión remanente. Por el contrario, en los HACE fabricados con la dosis del 10% no ocurre igual que el caso anterior ya que la retracción experimentada hace que todos los HACE pasen a régimen negativo de deformaciones.

4.6 Conclusiones capítulo 4

Las conclusiones que se extraen en esta fase son:

- El porcentaje de aditivo expansivo DENKA CSA 20 influye en la magnitud de las expansiones desarrolladas de tal forma que a mayor porcentaje adicionado de aditivo expansivo mayor es la magnitud de la expansión desarrollada. El incremento de expansión al aumentar la dosis de aditivo no es directamente proporcional, quedando para estudios posteriores el establecer la relación existente entre porcentaje adicionado y magnitud de la expansión inducida.
- Las dosis empleadas en este estudio, 10% y 15%, son suficientes inicialmente (durante curado en cámara húmeda) para vencer la restricción y desarrollar deformaciones en sentido positivo. Si bien es cierto lo anterior, la dosis del 15% se muestra como la más efectiva para los objetivos de este estudio, ya que para cualquiera de las condiciones de curado y restricción impuestas desarrolla la mayor magnitud de expansión y garantiza un régimen de deformaciones en positivo una vez se han estabilizado los cambios dimensionales que acontecen en la probeta, mientras que la dosis del 10% de aditivo expansivo DENKA CSA 20, en las condiciones particulares de curado y restricción de este estudio, no es suficiente para impedir la retracción global del elemento en la condición de restringido, ya que, transcurridos un tiempo desde la amasada, las probetas experimentan una pérdida de longitud respecto al tamaño inicial (retracción).
- La dosis de aditivo expansivo DENKA CSA 20 influye en la velocidad inicial de desarrollo de la expansión y a la magnitud máxima de ésta, de tal forma que, al incrementar la

proporción adicionada de aditivo expansivo DENKA CSA 20 aumenta la velocidad de la expansión y el valor máximo de ésta.

- El tipo de curado influye en la magnitud máxima de la expansión desarrollada, de tal forma que, el curado de probetas de HACE en ambiente A1, con aporte continuo de agua, induce deformaciones en sentido positivo de mayor magnitud que las desarrolladas en el curado en ambiente A2, tanto en la condición de libre como en la de restringido para cualquiera de las dosis empleadas. La razón de ello se debe a que el aporte suplementario y continuo de agua de una fuente exterior favorece la hidratación del compuesto expansivo, facilitando las reacciones expansivas y la formación de un mayor porcentaje de Etringita (compuesto expansivo).
- El agua de composición del hormigón, siempre que se evite su pérdida (ambiente A2), es suficiente para hidratar el aditivo expansivo y generar deformaciones en sentido positivo que venzan la restricción impuesta inicialmente garantizando bien la compensación de la retracción posterior, caso de la dosis del 10%, o bien un sistema de deformaciones positivas de carácter permanente, tal y como ocurre para la dosis de aditivo expansivo DENKA CSA 20 del 15%.
- Al cesar el aporte de agua externo y/o interno, se manifiestan deformaciones en sentido negativo denominados retracción. Los principales fenómenos de retracción que acontecen para las condiciones particulares de esta investigación son dos: la retracción por secado y la retracción endógena. La mayor influencia de uno u otro depende del ambiente o condiciones de curado, de tal forma que, en probetas curadas sin protección de film, ambiente A1, el fenómeno de retracción predominante es el de retracción por secado, mientras que en el caso de probetas con cobertura de film, ambiente A2, es el de retracción endógena.
- La restricción condiciona la magnitud de la expansión desarrollada independientemente de la dosis adicionada. El efecto de la restricción se hace más evidente cuanto mayor es la expansión libre determinada.
- Relacionando las deformaciones determinadas sobre probetas prismáticas normalizadas en los distintos ambientes de curado y condiciones de restricción con los valores que recogen las guías de uso y diseño de los hormigones expansivos se establece que:
 - La dosis del 10%, según los términos de expansión que recoge la Tabla 2.1 no es efectiva para diseñar un hormigón pretensado químicamente (% de Expansión a la edad de 7 días $\geq 0,2\%$) que es el objetivo buscado. Sin embargo sí que es efectiva, en las condiciones de curado del ambiente A1, para conseguir un hormigón de retracción compensada (Expansión a la edad de 7 días = 0,04-0,06%). Así mismo cabe mencionar que, en régimen restringido (CR) el régimen de deformaciones pasa a negativo a partir del día 112 en ambiente A1 y del día 140 en ambiente A2 (Figura 4.13).
 - La dosis del 15% sí que permite el diseño de un hormigón pretensado químicamente en la condición de restringido ya que, independientemente del ambiente de curado, presenta una expansión a la edad de 7 días $\geq 0,2\%$ manteniendo de forma posterior el régimen de deformaciones en positivo de forma permanente en el tiempo (Figura 4.15).

5 DETERMINACIÓN DEL GRADO DE EXPANSIÓN EN DISPOSITIVO TIPO ANILLO

5.1 Introducción

El confinamiento de pilares cilíndricos de hormigón por encamisados aplicados directamente (refuerzo directo) o prefabricados exteriores con interposición de un relleno de hormigón convencional (refuerzo indirecto) constituye un sistema de refuerzo pasivo que no contribuye para las solicitaciones actuantes en el momento de ejecución del refuerzo ya que la camisa/enconfrado exterior sólo contribuye mecánicamente cuando el elemento objeto de refuerzo se deforma por acción de las cargas actuantes (Figura 5.1) las cuales inducen una deformación circunferencial en el elemento a reforzar, que al alcanzar un determinado valor, activan la acción del encamisado exterior.

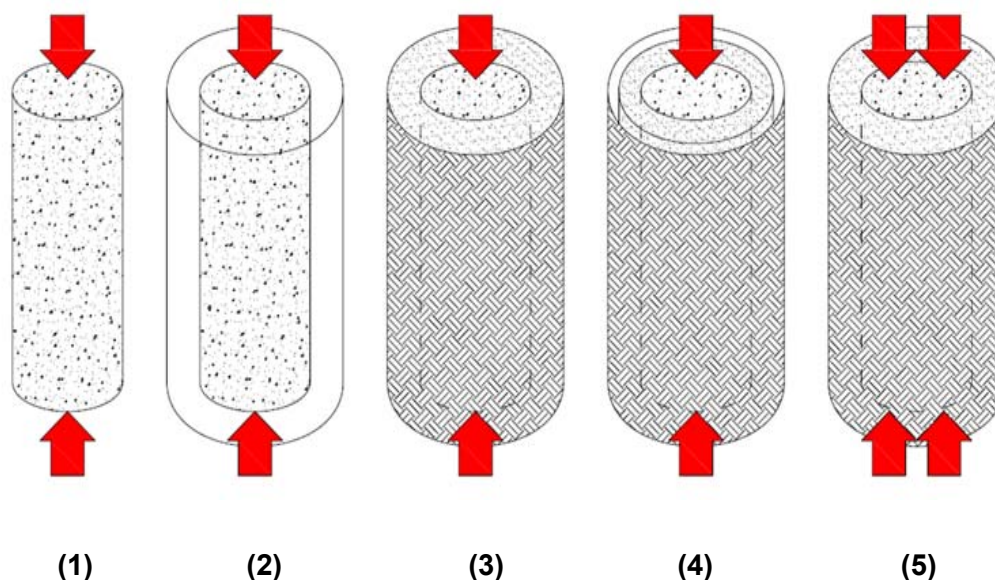


Figura 5.1 Comportamiento del sistema de confinamiento por encamisados exteriores con HAC convencional. Pilar a reforzar (1), colocación del encamisado prefabricado (2), relleno del espacio con HAC convencional (3), endurecimiento y retracción del HAC de relleno (4) y ante acción de sobrecarga y deformación del pilar aparece la contribución del refuerzo (5).

El uso de hormigones autocompactantes expansivos con la característica de pretensado químicamente empleados como relleno en el refuerzo por confinamiento mediante encamisados prefabricados exteriores (confinamiento indirecto) soluciona este inconveniente ya que, por un lado, garantiza el correcto llenado del espacio comprendido entre elemento y refuerzo, y por otro, debido a su acción expansiva, tracciona la camisa exterior contribuyendo a la distribución homogénea de tensiones entre elemento y refuerzo desde los instantes iniciales de su puesta en obra (Figura 5.2 y Figura 5.3).

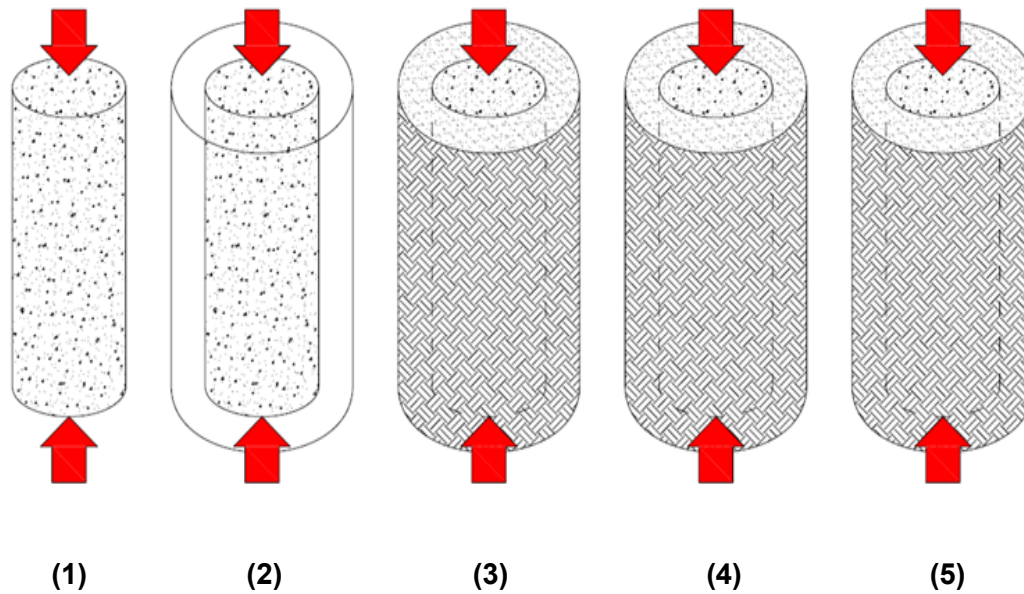


Figura 5.2 Comportamiento del sistema de confinamiento por encamisados exteriores con HAC expansivo (HACE) pretensado químicamente. Pilar a reforzar (1), colocación del encamisado prefabricado (2), relleno del espacio con HAC expansivo (3), endurecimiento y expansión del HACE de relleno (4) y contribución del sistema de refuerzo para las cargas actuantes y sobrecargas posteriores (5).

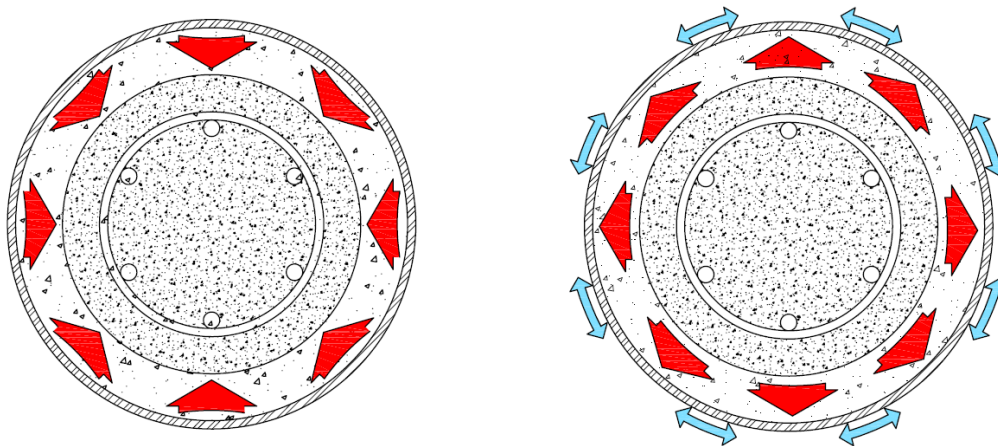


Figura 5.3 Retracción del HAC de relleno convencional sin efecto tensional sobre la camisa (izquierda). Efecto de la solución de refuerzo por confinamiento con HAC expansivo (derecha).

El sistema de refuerzo de pilares cilíndricos de hormigón mediante encamisados prefabricados exteriores y relleno de hormigón expansivo presenta una situación similar al de las probetas sometidas a la restricción que ejerce la *restraining cage*, ya que, hay un cierto grado de restricción impuesto por la camisa a la expansión aunque este grado de restricción es desconocido (varía en función de las características físicas de la camisa). En un caso ideal, la restricción respecto de la expansión podría representarse mediante una línea recta, equivalente a una determinada cuantía de refuerzo, tal y como refiere el ábaco que recoge la guía de diseño ACI 223 para el caso de probetas prismáticas (Figura 2.31).

Actualmente, en países como Estados Unidos, Japón e Italia los métodos normativos de ensayo que se emplean en laboratorio para medir la expansión lineal de un hormigón refieren a la determinación de la expansión lineal en régimen restringido sobre elementos tipo probeta prismática con una configuración igual o similar a la descrita en el Apartado 2.2.9.2 de este documento.

Sin embargo, debido a las condiciones concretas de esta investigación y a la falta de métodos de laboratorio para evaluar la expansión circunferencial en el tipo de configuración de refuerzo motivo de estudio, se propone un procedimiento de medida o dispositivo de ensayo a escala de laboratorio que permite evaluar el grado de expansión sobre elementos de sección circular y determinar el grado de restricción de encamisados prefabricados exteriores de refuerzo en elementos circulares. El dispositivo propuesto no obedece a ninguna norma concreta, si bien la configuración de partida tiene como base lo recogido en la norma de referencia ASTM C1581¹⁴⁴.

5.2 Objetivos

Los objetivos de esta fase se definen a continuación:

- Determinar y caracterizar, empleando un dispositivo de doble anillo diseñado en el IETcc que simula la configuración real del esquema de refuerzo por encamisados exteriores prefabricados, las deformaciones circunferenciales que producen las distintas dosis empleadas de aditivo expansivo DENKA CSA 20, 10% y 15%, sobre la camisa de refuerzo en tres ambientes de curado.
- Evaluar la influencia del porcentaje de aditivo en la magnitud de la expansión desarrollada.
- Evaluar la influencia de las condiciones de curado en el grado de expansión desarrollado.
- Determinar una dosis eficaz de aditivo expansivo DENKA CSA 20 que garantice que el régimen de deformaciones permanece en positivo de forma permanente.
- Comparar las deformaciones circunferenciales determinadas en el elemento de doble anillo respecto de las lineales registradas sobre probetas prismáticas (Apartado 4.5.2) y determinar el grado de correlación existente entre el método estándar, ASTM C878, y el método propuesto en esta tesis, doble anillo.
- El objeto de evaluar y comparar la magnitud de dichas expansiones es proponer, dado el caso de que pueda establecerse una relación entre ambos métodos, la utilización del dispositivo de ensayo de doble anillo como método de ensayo alternativo válido en el diseño de hormigones expansivos conocidos un grado de restricción y el régimen de curado.
- Seleccionar una dosis efectiva de aditivo expansivo DENKA CSA 20, en función de los resultados obtenidos en probetas prismáticas y dispositivo de doble anillo, para la fabricación de un HACE con la característica de pretensado químicamente con el fin de ser utilizado como elemento de relleno efectivo en sistemas de refuerzo por confinamiento con encamisados exteriores prefabricados de acero o FRP.

5.3 Materiales y equipos

A continuación se definen los materiales y equipos necesarios para ejecutar esta fase de los trabajos.

5.3.1 Materiales

Los materiales que se utilizan en esta fase son los mismos que los referenciados en el apartado 3.3.1. y adicionalmente:

5.3.1.1 Fibra de carbono

En la investigación se utiliza la fibra de carbono denominada comercialmente como SIKAWRAP 530 C que es un tejido de fibra de carbono unidireccional para aplicación en húmedo con el sistema epoxídico SIKADUR 300, producto de dos componentes, completamente compatible y desarrollado específicamente para el sistema SIKAWRAP. Ambos productos han sido suministrados por la empresa SIKA S.A.U.



Figura 5.4 Fibra de carbono SIKAWRAP 530 C. Sistema epoxídico SIKADUR 300.

Las características técnicas de la fibra de carbono y el sistema epóxico se mencionan a continuación.

Tabla 5.1 Propiedades de la fibra de carbono SIKAWRAP 530 C.

Tipo de fibra	Construcción del tejido					Elongación a la rotura (%)	Longitud de la tela/rollo	Ancho de la tela
	Orientación de la fibra	Longitudinal	Transversal	Peso por área (g/m ²)	Densidad de la fibra (g/cm ³)			
Fibras de carbono	0°	Fibras de carbono negras (99% del peso total por área)	Fibras termoplásticas blancas (1% del peso total por área)	530 ± 20	1,8	1,64	> 50 m	300 mm

Tabla 5.2 Propiedades del sistema epóxico SIKADUR 300.

Viscosidad (cps)	Temperatura de transición vítrea (Tg)		Resistencia a la tracción (N/mm ²)	Módulo de tracción (N/mm ²)	Elongación a la rotura (%)	Módulo de flexión (N/mm ²)	Resistencia a flexión (N/mm ²)
550	79°C luego de 48 hs/curado 60 °C	46°C luego de 120 hs/curado 21 °C	73,5	3213	4,8	3.164	125,3

Tabla 5.3 Propiedades de la fibra de carbono SIKAWRAP 530 C antes y después de la aplicación del sistema epoxídico SIKADUR 300.

Propiedades de la fibra seca			Propiedades de la lámina curada (fibra y epóxico)		
Espesor de diseño de la tela (mm)	Resistencia a la tracción (N/mm ²)	Módulo de elasticidad a tracción (N/mm ²)	Espesor de lámina (mm)	Carga última (kN/m)	Módulo de elasticidad a tracción (N/mm ²)
0,293	3800	231000	1	700	63000

5.3.2 Equipos de ensayo y medición

5.3.2.1 Bandas extensométricas

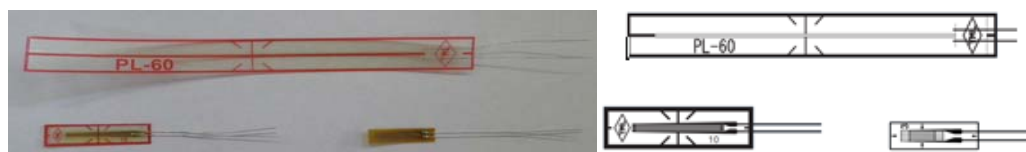
Las deformaciones sobre los anillos del dispositivo se miden mediante bandas extensométricas adheridas a la superficie del material. Estas galgas son transductores eléctricos pasivos cuyo funcionamiento está basado en el efecto piezorresistivo. Dispuestos sobre un elemento permiten medir la fuerza ejercida sobre él a partir de la deformación resultante. Así, los distintos esfuerzos aplicados sobre los materiales, generan deformaciones que son transmitidas a la galga, respondiendo esta con una variación de su propia resistencia eléctrica. La deformación y la variación de resistencia se relacionan por la fórmula siguiente:

$$\varepsilon = \frac{R_i - R_0}{K \cdot R_0}$$

Ecuación 5.1.

donde ε es la deformación lineal, R_0 es la resistencia inicial y R_i la resistencia en un instante determinado y K es el factor de galga que se refiere a la sensibilidad de elongación y es un dato aportado por el fabricante.

En este estudio se emplean tres tipos las bandas extensométricas denominadas PL-60-11, PFL-10-11, BFLA-5-5 suministradas por la casa comercial Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.

**Figura 5.5 Bandas extensométricas.**

La elección de tres tipos de galgas se debe a la idoneidad de cada una de ellas para ser adheridas a un tipo de material distinto. A continuación se exponen las características principales de cada tipo de galga utilizado.

Tabla 5.4 Características de las bandas extensométricas utilizadas.

Referencia	Uso recomendado	Longitud y ancho de galga (mm)	Material de la galga	Longitud y ancho de la base de apoyo (mm)	Material de la base	Resistencia eléctrica (Ω)	Deformación límite (%)	Adhesivo (rango de temperatura)
PL-60-11	Hormigón, morteros y rocas	60 x 1	Cobre-Níquel	74 x 8	Poliéster	120	2	Cianocrilato (-20°C/+80°C)
PFL-10-11	Metal, Hormigón, morteros y rocas	10 x 0,9	Cobre-Níquel	17,5 x 5	Poliéster	120	2	Cianocrilato (-20°C/+80°C)
BFLA-5-5	Materiales compuestos	5 x 1,5	Cobre-Níquel	12,3 x 3,3	Poliamida	120	3	Cianocrilato (-20°C/+120°C)

5.3.2.2 Equipo de adquisición de datos - Data logger

El registro de deformaciones, tan importante en esta investigación, se lleva a cabo a partir de un sistema compacto comercial de adquisición de datos de hasta 60 canales denominado Agilent 34970A suministrado por la empresa Agilent Technologies. Dicho equipo de adquisición de datos está equipado con un panel frontal con todas las funciones para una configuración independiente, solución de problemas y visualización de datos, ofreciendo la posibilidad de configurar manualmente cada canal de forma independiente. Además permite cambiar la configuración, tiempos de adquisición, visualización y análisis de datos a través de un software con interfaz de Windows denominado "Agilent BenchLink Data Logger".



Figura 5.6 Equipo de adquisición de datos Data Logger Agilent 34970A.

Las características técnicas del equipo de adquisición de datos se recogen en la tabla siguiente.

Tabla 5.5 Características del Equipo de adquisición de datos Data Logger Agilent 34970^a.

Rango de medida	Resolución	Precisión	Lecturas	Software	Funciones
De 1 a 60 canales de entrada analógica	6½ dígitos (22 bits)	precisión de DCV básica a un año del 0,004 %	50000	BenchLink Data Logger 3	Medidas de: - Tensiones DC y AC - Temperatura con termopar, RTD y termistor - Resistencia a 2 y 4 hilos - Corriente DC y AC, - Frecuencia y periodo

En la investigación que motiva esta tesis el equipo se configura para medir resistencias de 4 hilos en escala de microhmios para asegurar una mayor precisión de la medida. En el apartado 5.3.2.1, que hace referencia al tipo de las bandas extensométricas utilizadas, se describe la fórmula de conversión de resistencia a deformación.

5.4 Metodología

El programa experimental y los métodos de ensayo que se exponen en los apartados siguientes recogen de forma detallada la metodología empleada para dar cumplimiento a los objetivos planteados en el apartado 5.2 de este documento.

5.4.1 Determinación del grado de expansión circunferencial y restricción en elementos cilíndricos. Propuesta de método de ensayo en elementos tipo anillo

En esta investigación, para reproducir experimentalmente a escala de laboratorio el sistema de refuerzo por confinamiento de pilares cilíndricos con encamisados exteriores prefabricados y con objeto de determinar el grado de restricción impuesto por los mismos, se diseña en el IETcc un dispositivo de ensayo de doble anillo que simula la configuración real del sistema de refuerzo. Este dispositivo se basa en 2 anillos concéntricos que se disponen sobre una superficie plana no absorbente de acero a la que se fijan con bulones para mantener la equidistancia. El espacio libre entre anillos se rellena con el HACE.

La Figura 5.7 muestra la disposición real del refuerzo por confinamiento indirecto con encamisados prefabricados y relleno de hormigón y la configuración del dispositivo de laboratorio diseñado simulando dicho sistema.

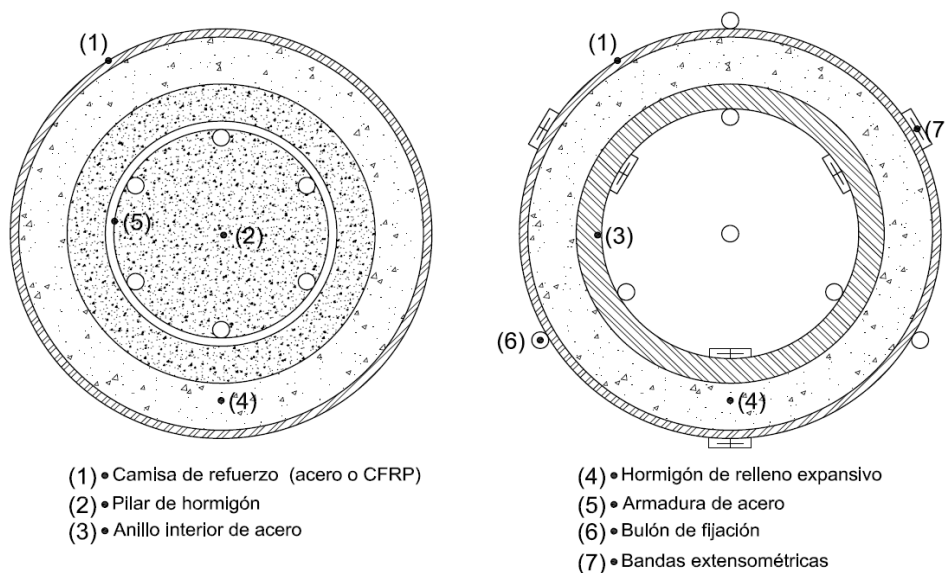


Figura 5.7 Esquema de elementos que componen el sistema de refuerzo real y la disposición del elemento de ensayo diseñado en el IETcc.

El anillo interior, que simula el pilar de hormigón armado objeto de refuerzo, se fabrica en acero con espesor suficiente para dotarlo de una rigidez que impida su deformación, mientras que el anillo exterior, que simula el encamisado exterior de refuerzo, se fabrica en dos de los materiales más utilizados en la fabricación de camisas prefabricadas para confinamiento, concretamente en acero y fibra de carbono.

La Tabla 5.6 recoge las dimensiones y materiales de los anillos utilizados.

Tabla 5.6 Dimensiones del dispositivo de ensayo diseñado en el IETcc.

Tipo anillo	Material	Diámetro exterior (mm)	Diámetro interior (mm)	Espesor (mm)	Altura (mm)
Interior	Acero	406	364	21	40
Exterior	Acero	518	506	6	40
Exterior	Fibra de carbono	508	506	1	40

El estudio de deformaciones se realiza a través de bandas extensométricas que se disponen a 120° en el intradós del anillo interior, y en el extradós del anillo exterior. La razón de esta disposición de galgas es, por un lado, verificar el comportamiento rígido del anillo interior, para lo que no deberían registrarse deformaciones en dicho anillo, y, por otro lado, confirmar la puesta en tensión de la camisa exterior debido a las deformaciones que produce la acción expansiva de los HACE diseñados.

Se ha de tener en cuenta que el dispositivo de doble anillo permite un registro de deformaciones continuo desde el vertido de hormigón tomándose por ello como medida de referencia la lectura de las galgas tras el vertido. Recordar que, en el caso de probetas prismáticas, sobre manera aquellas que se configuran con índices (expansión libre), para asegurar un correcto endurecimiento que garantice la manipulación de las probetas sin daños, el desmolde y medida de referencia inicial se realizan transcurridas 24 horas del vertido del hormigón, perdiendo parte de las deformaciones positivas que se producen tras el fraguado y primer endurecimiento del HACE fabricado.



Figura 5.8 Galga para el registro de deformaciones en los anillos interior y exterior.

Adicionalmente mencionar que se presta especial atención a la elección del tipo de galga que se coloca en cada anillo para lo cual se seleccionan los tipos adecuados de banda extensométricas en función del material del elemento sobre el que queremos registrar las deformaciones.

La Figura 5.9 refleja la disposición real del dispositivo de ensayo de doble anillo utilizado en laboratorio.

En el dispositivo de doble anillo, al igual que ocurre con las probetas prismáticas, la magnitud de la deformación estará condicionada, además de por otros factores, por la dosis de aditivo expansivo DENKA CSA 20 empleada, el grado de restricción y por el ambiente de curado.

Con objeto de determinar sobre el dispositivo de doble anillo la influencia de la dosis de aditivo expansivo, del grado de restricción y del ambiente de curado en la magnitud de las expansiones desarrolladas, y correlacionar los valores de deformación obtenidos en este dispositivo de ensayo con los alcanzados en el método de ensayo normalizado ASTM C878 se evalúan dos grados de restricción (en función del material) y tres regímenes de curado por cada dosis de aditivo empleada.

El grado de restricción viene impuesto por las características del encamisado exterior, razón por la cual se realizan 2 configuraciones del dispositivo de ensayo, una, elaborando 3 anillos exteriores de acero, y otra, fabricando 3 anillos exteriores de CFRP, simulando de esta manera la restricción impuesta por dos de los encamisados prefabricados de refuerzo por confinamiento más habituales. Los anillos de fibra de carbono se fabrican con una longitud de solape de al menos $\frac{1}{4}$ de la longitud de circunferencia (mínimo recomendado por las guías de aplicación)^{145,146}.

Los anillos que integran cada una de las configuraciones de ensayo mencionadas se someten a los ambientes de curado referidos en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7 Regímenes de curado de los elementos tipo anillo.

Ambiente de curado	Referencia	Operación tras moldeo	Curado en cámara húmeda			Curado en cámara seca		
			Tiempo (días)	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Tiempo (días)	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)
Ambiente A1	A1	Ninguna	7 primeros días	20±2	> 95	-	-	-
Ambiente A2	A2	Aplicar una envoltura de film protector	-	-	-	7 primeros días	20±2	50±5
Ambiente A3	A3	Ninguna	-	-	-	7 primeros días	20±2	50±5

La justificación de los regímenes de curado seleccionados es la siguiente:

- **Ambiente A1:** Simula el ambiente más favorable para el desarrollo de las expansiones ya que el aporte exterior y continuo de agua favorecería la hidratación del compuesto expansivo.
- **Ambiente A2:** Representa el ambiente más susceptible de experimentar el hormigón empleado como relleno en el refuerzo de pilares por camisas prefabricadas, donde el hormigón no tiene ni aporte externo de agua ni pérdidas significativas de la misma, ya que la superficie expuesta se limita a los extremos superior e inferior de la camisa. En este caso, la hidratación del compuesto expansivo se realiza con el agua propia de composición del hormigón.

- **Ambiente A3:** Simula la condición ambiental que puede producirse en los extremos superior e inferior de la camisa, donde la superficie queda expuesta al ambiente exterior. En esta situación la pérdida de agua, dificultaría la hidratación del compuesto expansivo y acentuaría la posterior retracción de secado, por lo que se espera que en este ambiente las deformaciones registradas en sentido positivo sean inferiores a las registradas en los otros dos ambientes.

Teniendo en cuenta lo expuesto, la metodología seguida para llevar a cabo este ensayo se describe a continuación:

- En primer lugar, se instrumentan (colocación de galgas y conectores a 120° tanto en anillo exterior como en interior) y disponen los anillos de forma equidistante con una separación de 50 mm asegurando con bulones atornillados la equidistancia e inmovilidad de los mismos durante el proceso de hormigonado. Así mismo, se protegen las galgas y conectores para evitar que durante el proceso de hormigonado se adhiera cualquier resto de hormigón que pudiera alterar el registro de deformaciones.

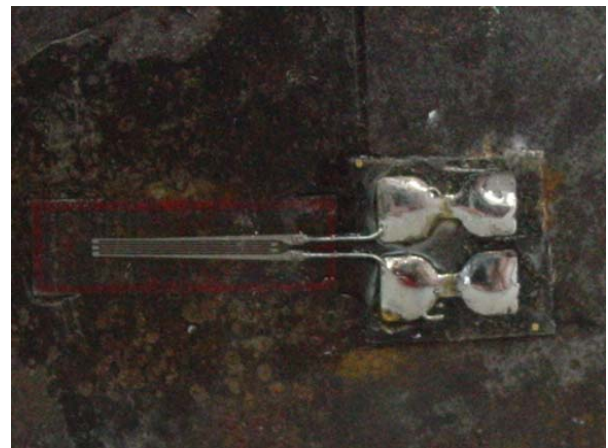


Figura 5.9 Disposición del elemento de ensayo diseñado en el IETcc.

- A continuación se conectan las bandas extensométricas, dispuestas en ambos anillos (exterior-interior), al equipo encargado de registrar de forma periódica las deformaciones. En nuestro estudio el equipo de medida se configura para registrar cambios de resistencia en unidades de μohm , para posteriormente y a partir de la aplicación de la fórmula recogida en la Ecuación 5.1, realizar la conversión a deformaciones.
- Amasado el hormigón, según el protocolo recogido en el apartado 3.4.2, se procede al vertido de éste en el espacio que queda entre los dos anillos que configuran el dispositivo de ensayo, fabricando así una serie de tres anillos por cada dosis y material de refuerzo (camisa exterior acero o CFRP) empleados.
- Seguidamente se dispone cada anillo conforme a los regímenes de curado especificados en la Tabla 5.7, retirando los bulones exteriores atornillados para permitir así el libre desplazamiento de los anillos que simulan los encamisados prefabricados.



Figura 5.10 Anillo relleno destinado a curado en ambiente A2.

- El registro de las deformaciones se realiza cada 24 horas durante un periodo de una semana. En este caso la primera medida, *medida referencia*, se corresponde con la registrada por el Data Logger una vez finalizado el vertido del hormigón.

5.4.2 Determinación del grado de correlación existente entre las deformaciones registradas a primeras edades en elementos tipo viga y tipo anillo

De acuerdo con el código ACI 223, existe una relación lineal, Figura 2.31, entre el grado de expansión medido sobre probetas prismáticas, de acuerdo con la Norma ASTM C878, y la expansión efectiva en el elemento de hormigón.

El refuerzo de pilares por camisas prefabricadas presenta una situación similar al de las probetas fabricadas conforme al método de ensayo ASTM C878, ya que hay un cierto grado de restricción impuesto a la expansión (camisa exterior); pero el grado de restricción es desconocido. En un caso ideal, podría representarse mediante una línea recta, equivalente a una determinada cuantía de refuerzo.

En el presente estudio, finalizado el periodo de registro de medidas, se determina el grado de correlación existente entre las expansiones registradas sobre los elementos tipo anillo y las determinadas en elementos tipo viga en función de los diferentes ambientes de curado a los que han sido sometidos. La comparativa se lleva a cabo durante el periodo en el que se desarrolla la mayor parte de la expansión (0-7 días).

El objeto de evaluar y comparar la magnitud de dichas expansiones es proponer, dado el caso que exista una relación, la utilización del dispositivo de ensayo de doble anillo como método de ensayo alternativo válido en el diseño de hormigones expansivos para la caracterización del régimen de expansión conocidos el grado de restricción y el régimen de curado.

Si bien el dispositivo de doble anillo es aplicable, principalmente, al caso propuesto de caracterización de la expansión de HACEs de relleno en sistemas de refuerzo mediante camisas prefabricadas, su sencilla configuración, tanto por los medios a disponer como por la instrumentación requerida, facilitaría su implementación a escala de laboratorio, permitiendo simular no solo varias configuraciones de refuerzo con encamisados prefabricados exteriores distintos, sino también, sistemas constructivos alternativos como el denominado Concrete Filled Tube. Una ventaja adicional del dispositivo de doble anillo, respecto de los métodos de ensayo actuales, es que permitiría un registro preciso de la expansión desde el vertido del hormigón sin tener que depender del tiempo de fraguado y endurecimiento del mismo para realizar las operaciones de desmolde, durante las cuales, además, se pueden dañar las probetas objeto de estudio.

5.5 Resultados y discusión

5.5.1 Determinación del grado de expansión restringido en dispositivo de doble anillo

A continuación se muestran los resultados de expansión obtenidos al emplear el dispositivo de doble anillo propuesto.

La exposición de resultados se subdivide en dos apartados:

5.5.1.1 Grado de expansión desde el vertido del hormigón

El registro de la expansión se realiza desde que el hormigón es vertido en el dispositivo de doble anillo, de tal forma que al ser un registro continuo se registran todas las deformaciones que acontecen desde el fraguado y primer endurecimiento del hormigón.

Tabla 5.8 Resultados de deformación circunferencial del HACE-15% en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de acero.

Hormigón-Anillo-Curado	Día	Día	Día	Día	Día	Día	Día
	0	1	2	3	4	7	8
HACE-15% - Acero - A1	0,000	0,007	0,016	0,026	0,035	0,038	0,039
HACE-15% - Acero - A2	0,000	0,008	0,014	0,017	0,018	0,019	0,019
HACE-15% - Acero - A3	0,000	0,008	0,009	0,010	0,010	0,009	0,009

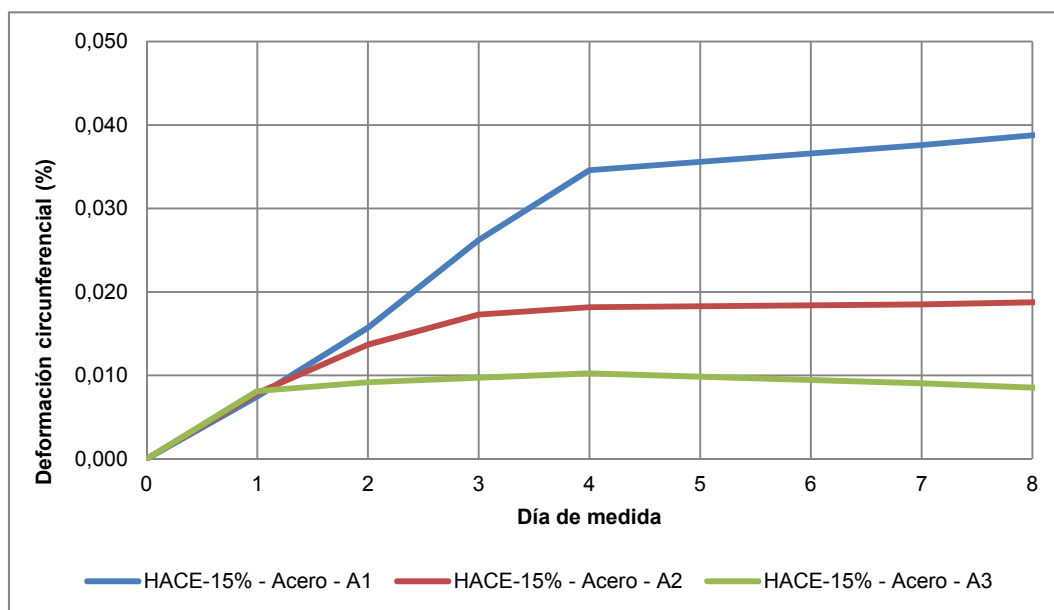
**Figura 5.11 Resultados de expansión del HACE-15% registrados en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de acero.**

Tabla 5.9 Resultados de deformación circunferencial del HACE-10% en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de acero.

Hormigón-Anillo-Curado	Día	Día	Día	Día	Día	Día	Día
	0	1	2	3	4	7	8
HACE-10% - Acero - A1	0,000	0,005	0,009	0,012	0,010	-0,001	-
HACE-10% - Acero - A2	0,000	0,005	0,007	0,007	0,006	-0,004	-
HACE-10% - Acero - A3	0,000	0,005	0,006	0,007	0,003	-0,012	-

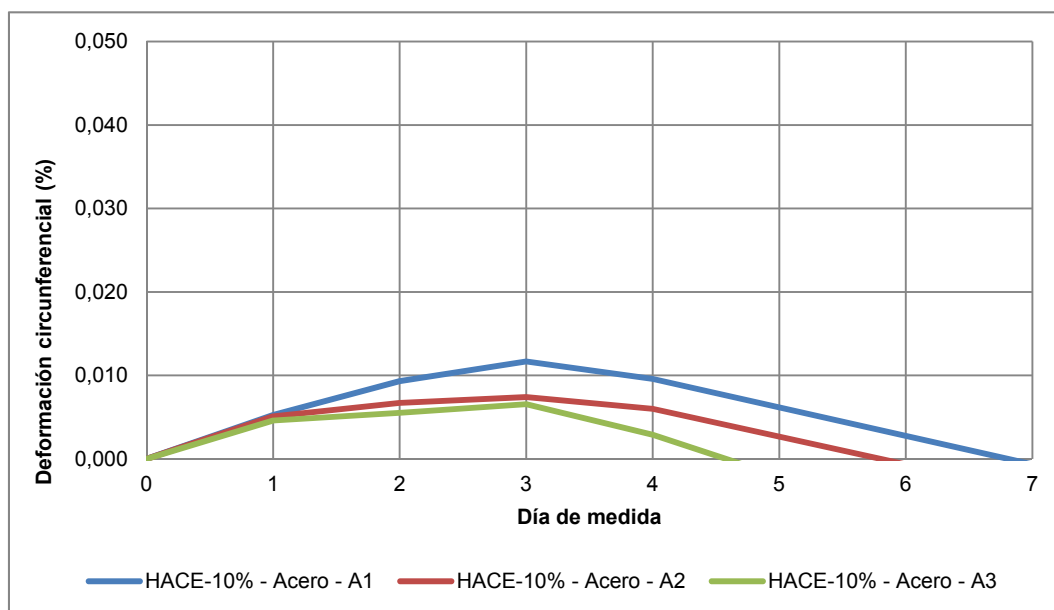
**Figura 5.12 Resultados de expansión del HACE-10% registrados en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de acero.**

Tabla 5.10 Resultados de deformación circunferencial del HACE-15% en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de fibra de carbono (CFRP).

Hormigón-Anillo-Curado	Día	Día	Día	Día	Día	Día	Día
	0	1	2	3	4	7	8
HACE-15% - CFRP - A1	0,000	0,025	0,059	0,096	0,134	0,185	0,187
HACE-15% - CFRP - A2	0,000	0,027	0,053	0,072	0,085	0,091	0,093
HACE-15% - CFRP - A3	0,000	0,024	0,031	0,038	0,040	0,045	0,044

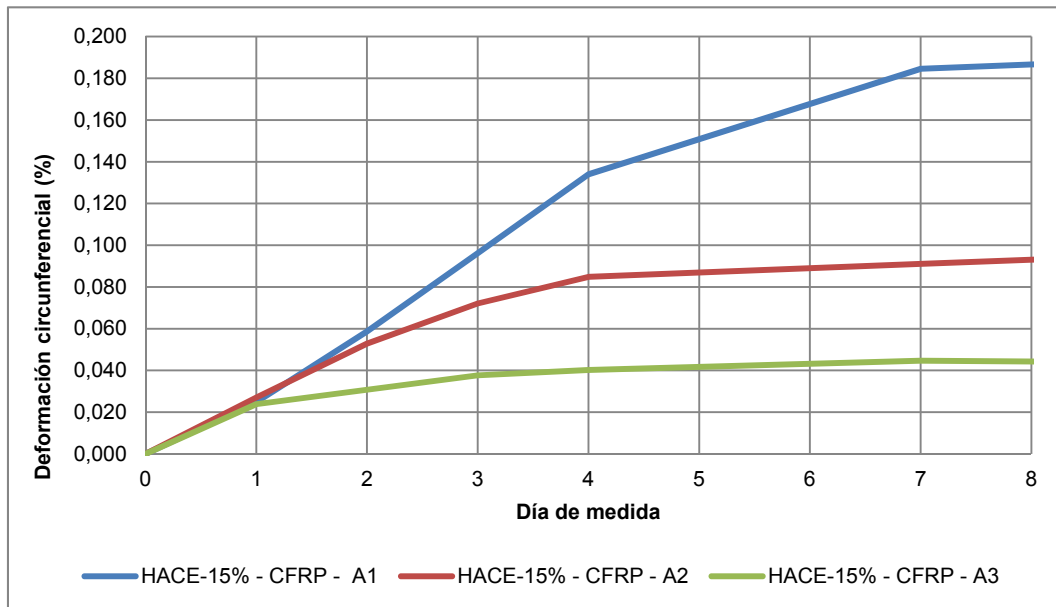
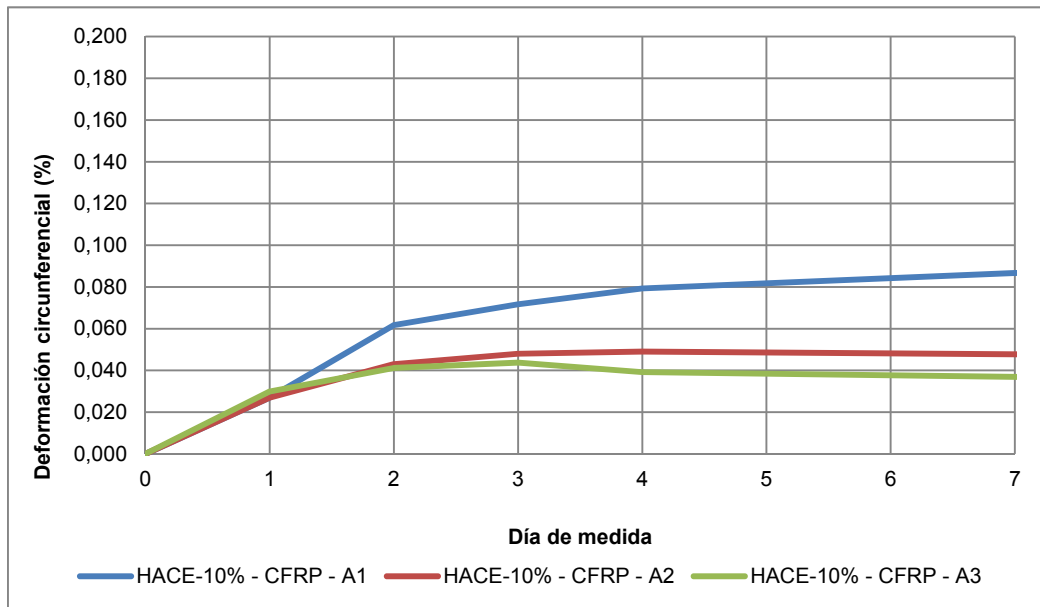


Figura 5.13 Resultados de expansión del HACE-15% registrados en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de fibra de carbono (CFRP).

Tabla 5.11 Resultados de deformación circunferencial del HACE-10% en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de fibra de carbono (CFRP).

Hormigón-Anillo-Curado	Día	Día	Día	Día	Día	Día	Día
	0	1	2	3	4	7	8
HACE-10% - CFRP - A1	0,000	0,027	0,062	0,072	0,079	0,087	0,087
HACE-10% - CFRP - A2	0,000	0,027	0,043	0,046	0,049	0,048	0,048
HACE-10% - CFRP - A3	0,000	0,030	0,041	0,044	0,039	0,037	0,036

**Figura 5.14 Resultados de expansión del HACE-10% registrados en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de fibra de carbono (CFRP).**

5.5.1.2 Grado de expansión desde el día 1 de medida

El registro de la expansión en este caso corresponde con el recogido en el apartado anterior, con la salvedad de que las expansiones se suprimen y ajustan para que la medida de referencia sea la que se registra a la edad de un día, edad correspondiente con el desmolde y medida de referencia de las probetas prismáticas, con objeto de poder comparar ambos métodos.

Tabla 5.12 Resultados de deformación circunferencial del HACE-15% en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de acero.

Hormigón-Anillo-Curado	Día	Día	Día	Día	Día	Día	Día
	0	1	2	3	4	7	8
HACE-15% - Acero - A1 - 1 día	0,000	0,000	0,008	0,019	0,027	0,030	0,031
HACE-15% - Acero - A2 - 1 día	0,000	0,000	0,006	0,009	0,010	0,011	0,011
HACE-15% - Acero - A3 - 1 día	0,000	0,000	0,001	0,002	0,002	0,001	0,000

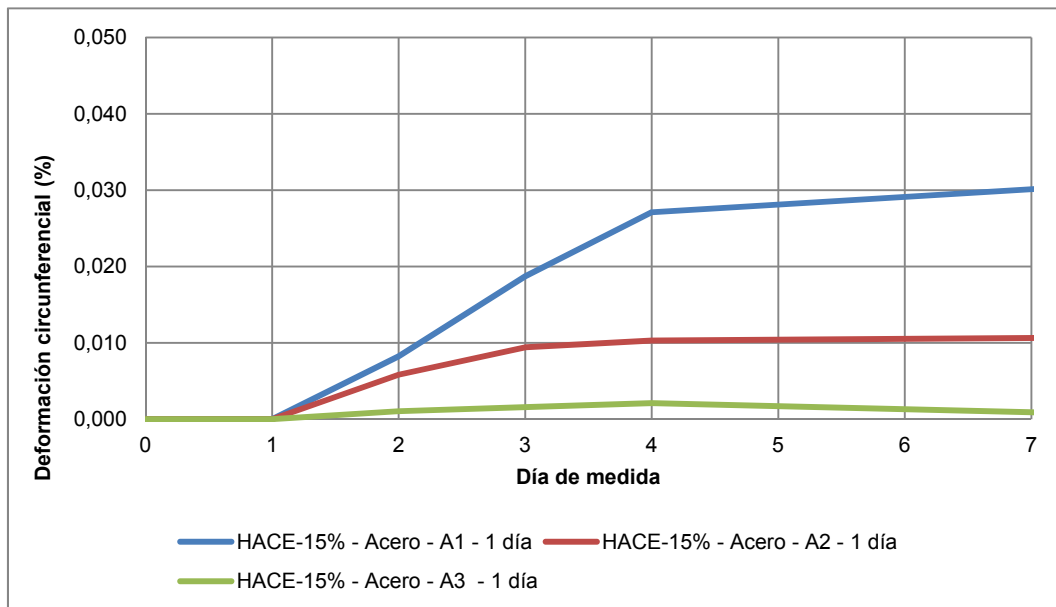


Figura 5.15 Resultados de expansión del HACE-15% registrados en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de acero.

Tabla 5.13 Resultados de deformación circunferencial del HACE-10% en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de acero.

Hormigón-Anillo-Curado	Día	Día	Día	Día	Día	Día	Día
	0	1	2	3	4	7	8
HACE-10% - Acero - A1 - 1 día	0,000	0,000	0,004	0,006	0,004	-0,006	-
HACE-10% - Acero - A2 - 1 día	0,000	0,000	0,002	0,002	0,001	-0,009	-
HACE-10% - Acero - A3 - 1 día	0,000	0,000	0,001	0,002	-0,002	-0,017	-

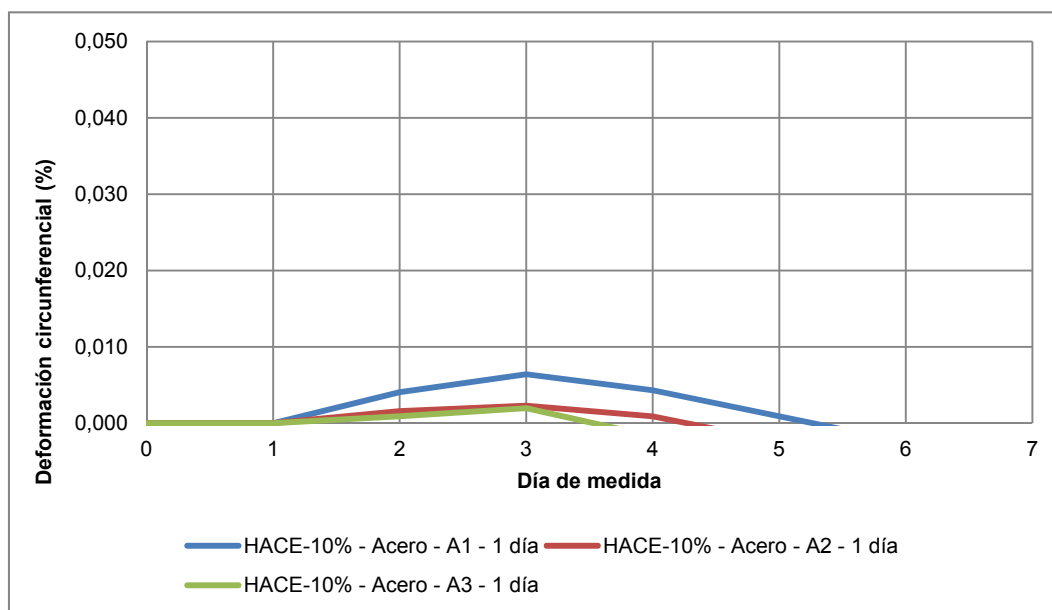
**Figura 5.16 Resultados de expansión del HACE-10% registrados en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de acero.**

Tabla 5.14 Resultados de deformación circunferencial del HACE-15% en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de fibra de carbono (CFRP).

Hormigón-Anillo-Curado	Día	Día	Día	Día	Día	Día	Día
	0	1	2	3	4	7	8
HACE-15% - CFRP - A1 - 1 día	0,000	0,000	0,034	0,071	0,109	0,160	0,162
HACE-15% - CFRP - A2 - 1 día	0,000	0,000	0,026	0,045	0,058	0,064	0,066
HACE-15% - CFRP - A3 - 1 día	0,000	0,000	0,007	0,014	0,016	0,021	0,020

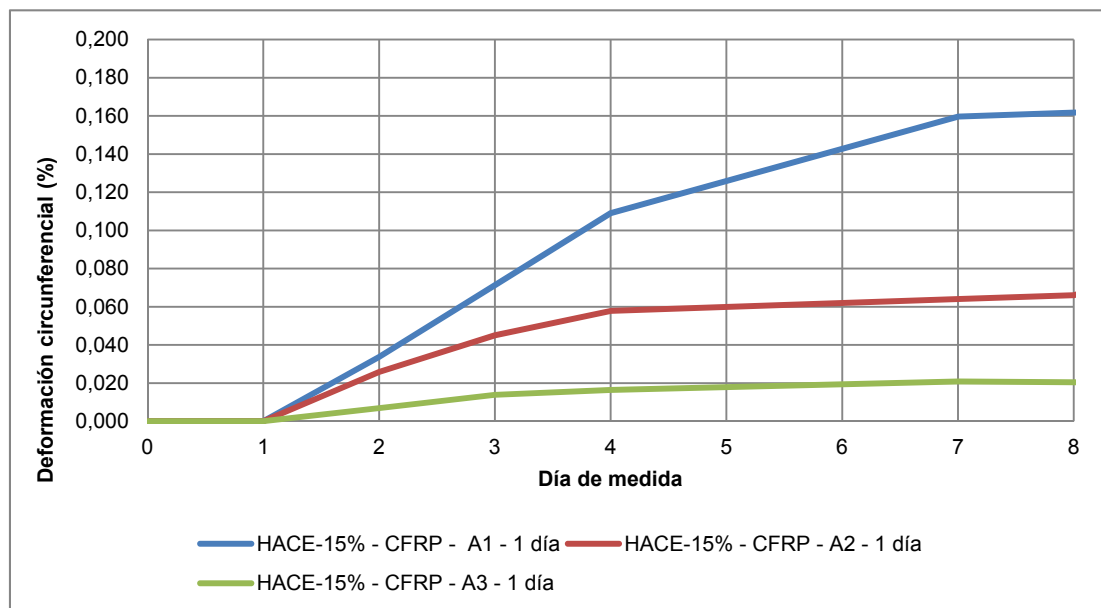
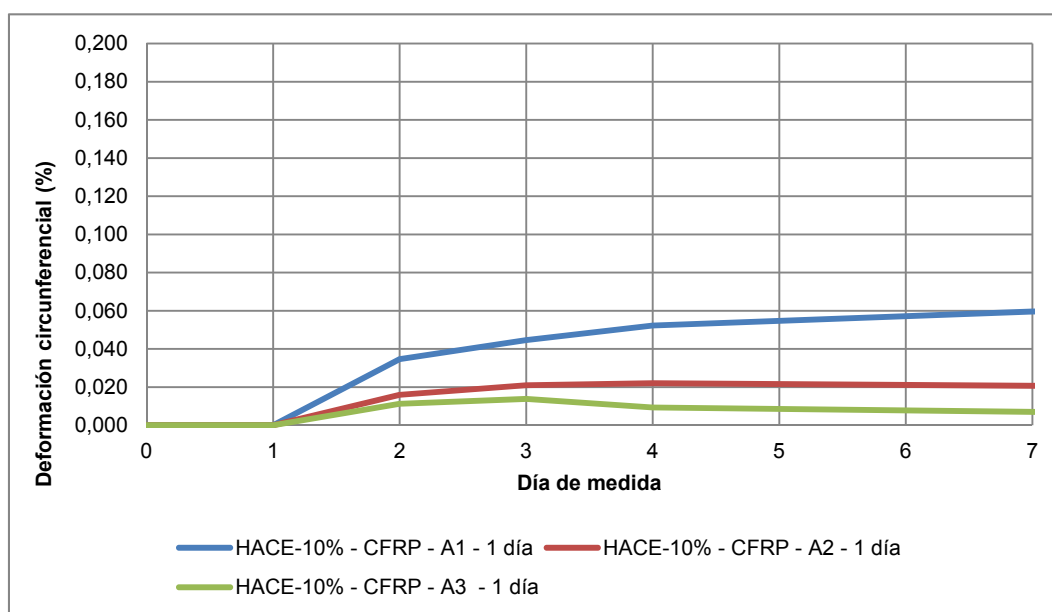
**Figura 5.17 Resultados de expansión del HACE-15% registrados en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de fibra de carbono (CFRP).**

Tabla 5.15 Resultados de deformación circunferencial del HACE-10% en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de fibra de carbono (CFRP).

Hormigón-Anillo-Curado	Día	Día	Día	Día	Día	Día	Día
	0	1	2	3	4	7	8
HACE-10% - CFRP - A1 - 1 día	0,000	0,000	0,035	0,045	0,052	0,060	0,060
HACE-10% - CFRP - A2 - 1 día	0,000	0,000	0,016	0,021	0,022	0,021	0,021
HACE-10% - CFRP - A3 - 1 día	0,000	0,000	0,011	0,014	0,009	0,007	0,006

**Figura 5.18 Resultados de expansión del HACE-10% registrados en el dispositivo de doble anillo con encamisado exterior de fibra de carbono (CFRP).**

5.5.2 Determinación del grado de correlación existente entre las deformaciones registradas a primeras edades en elementos tipo viga y tipo anillo

El registro de las expansiones medidas sobre los anillos permite la comparación con los resultados de expansión medidos sobre las probetas tipo viga almacenadas en ambientes similares.

En este apartado se muestran los resultados obtenidos al comparar las deformaciones registradas en las probetas prismáticas con las deformaciones medidas sobre los anillos cuando las condiciones de curado son las de los ambientes A1 y A2. La comparación se realiza en base a los resultados obtenidos con la dosis del 15% de aditivo expansivo, por ser la dosis que genera en el hormigón la expansión suficiente para vencer el efecto de la restricción de forma permanente en cualquiera de los ambientes propuestos.

Se debe tener en cuenta que el registro de deformaciones en las probetas tipo viga comienza a las 24 horas de su fabricación tanto en régimen restringido como en libre, para asegurar, en el

caso de este último, el correcto fraguado del hormigón y la adherencia de los índices colocados en los extremos. Esta operación tiene la ventaja de asegurar un correcto fraguado pero implica la desventaja de perder el registro de las deformaciones en ese periodo inicial.

Por tanto, para que la comparación del desarrollo y magnitud de las deformaciones que tienen lugar en los anillos y vigas sea representativa se deben tomar como valores de deformación aquellos que acontecen a la misma edad. Teniendo en cuenta esto, en la comparativa que recogen las Figura 5.19 y Figura 5.20 se prescinde de la deformación registrada en el dispositivo de doble anillo durante las primeras 24 horas (datos que se recogen en el Apartado 5.5.1.2.

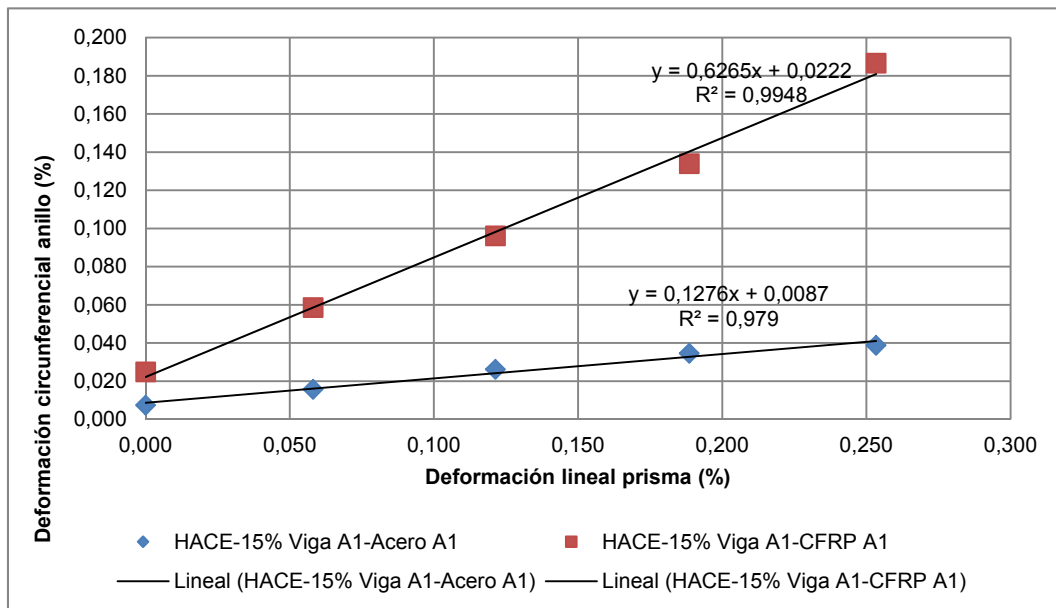


Figura 5.19 Correlación lineal de la expansión registrada en los anillos con camisa de acero y CFRP en ambiente A1 y la de probetas prismáticas ASTM C878 en ambiente A1.

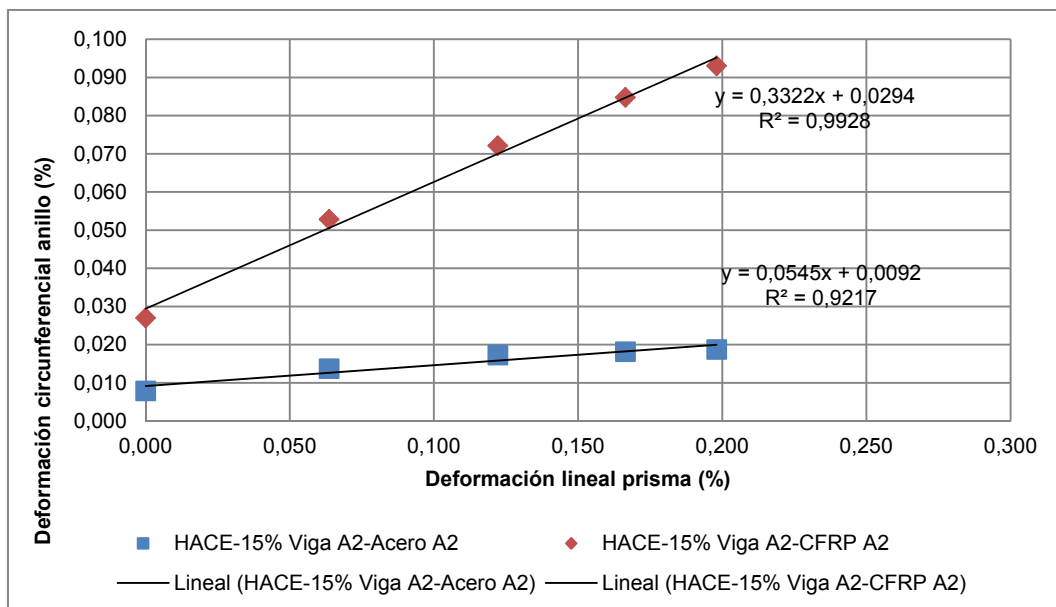


Figura 5.20 Correlación lineal de la expansión registrada en los anillos con camisa de acero y CFRP en ambiente A2 y la de probetas prismáticas ASTM C878 en ambiente A2.

En este apartado no se muestra la comparativa con el anillo expuesto al aire, ya que la expansión cesa prematuramente y el ambiente de curado no se considera en las probetas tipo viga.

5.5.3 Análisis de resultados

Conforme a los resultados expuestos en los dos apartados anteriores se analizan las curvas de expansión registradas mediante el dispositivo de doble anillo considerando como referencia el registro de medidas tanto desde el inicio como transcurridas 24 horas. Así mismo, se analiza la correlación existente entre las deformaciones determinadas con el dispositivo de doble anillo y las determinadas conforme el método de ensayo ASMT C878 en prismas de hormigón transcurridas 24 horas.

5.5.3.1 Deformaciones en dispositivo de doble anillo

Los resultados permiten comprobar que:

- La camisa exterior, independientemente del material de que se trate, entra en todos los casos en tensión debido a la acción expansiva del HACE que se emplea para rellenar el hueco entre la camisa exterior y el anillo de acero interior.
- Las deformaciones medidas sobre el anillo interior son inapreciables, lo que indica que el dispositivo de ensayo propuesto simula de forma efectiva el efecto de un pilar macizo de hormigón.
- El desarrollo inicial de la expansión, representado por la pendiente de las curvas en las primeras 24 horas, para las dosis estudiadas y las dos condiciones de restricción impuesta es muy similar (se solapan) en las tres condiciones ambientales estudiadas, lo que hace pensar que el desarrollo inicial de la expansión se produce fundamentalmente con el agua de composición del hormigón fabricado.
- Los anillos de carbono y acero correspondientes a las dosis del 10 y 15% conservados en ambiente A1, cámara húmeda, son los que presentan el mayor grado de expansión, debido al aporte externo y continuo de agua que favorece la hidratación del aditivo expansivo y la formación del compuesto Etringita lo que facilita el desarrollo de las reacciones expansivas.

En este ambiente, la curva que representa el desarrollo de la expansión presenta dos tramos bien diferenciados, uno de fuerte pendiente inicial que se relaciona con un rápido desarrollo inicial de la expansión y otro posterior correspondiente con una evolución más progresiva de dicha expansión.

El periodo de duración de cada tramo se muestra dependiente en primera instancia de la dosis de aditivo expansivo, de esta forma, se observa como para la dosis del 15% de DENKA CSA 20, la velocidad inicial de expansión cambia, ralentizándose, a partir del día 4 de medida, Figura 5.21, (día 3 si no consideramos la deformación de las primeras 24 horas-caso de los prismas), mientras que en la dosis del 10% este cambio se localiza a partir del día 2 de medida, Figura 5.22, (día 1 si no consideramos la deformación de las primeras 24 horas-caso de los prismas). Este efecto también se observaba a la misma edad en probetas prismáticas (ver Apartado 4.5.3.1, Figura 4.17 y Figura 4.18).

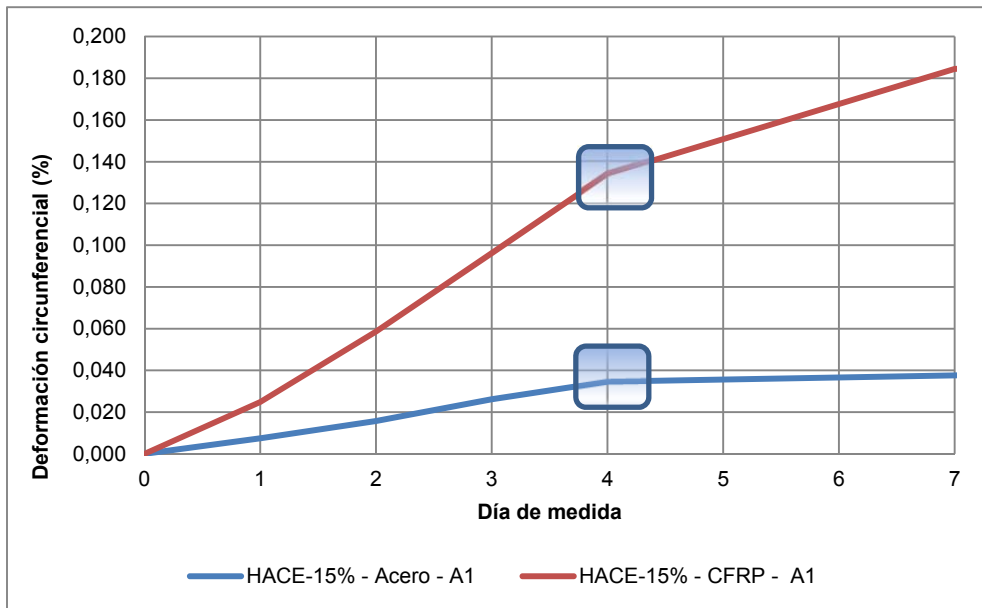


Figura 5.21 Ambiente A1: Cambio en la velocidad del desarrollo de la expansión para el HACE-15%.

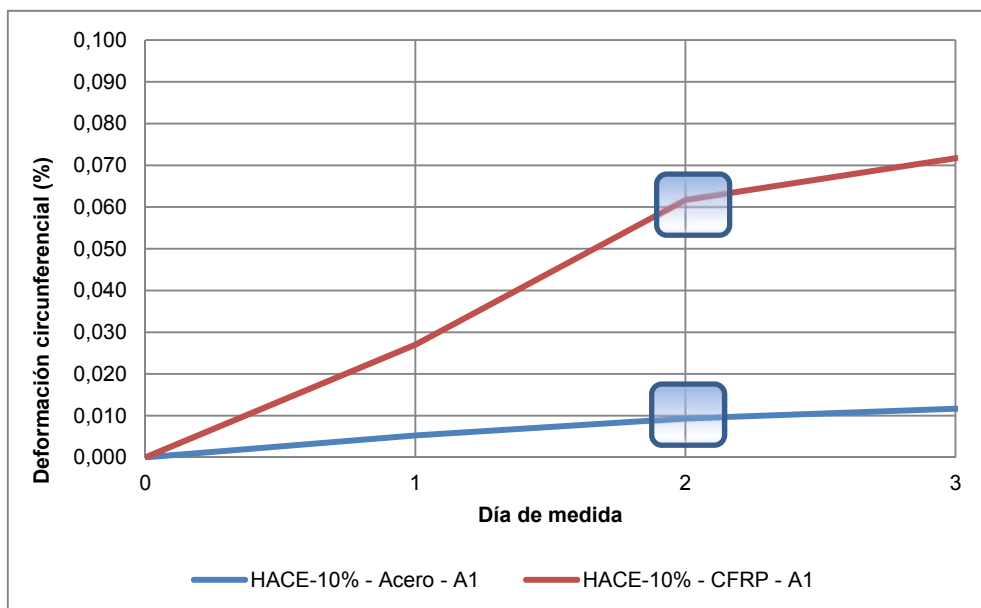


Figura 5.22 Ambiente A1: Cambio en la velocidad del desarrollo de la expansión para el HACE-10%.

Según varios autores (2.2.7.1), este comportamiento de cambio de pendiente puede asociarse a la disminución del porcentaje de sulfatos fácilmente hidratables disponibles para la formación del compuesto expansivo Etringita a medida que se va desarrollando la hidratación del hormigón.

- En ambiente A2* el desarrollo de la expansión es más progresivo que en el caso del ambiente A1, observándose un cambio de pendiente entre los días 1 y 2 para la dosis del 10% y entre los días 3 y 4 para la del 15%. En este ambiente A2, la cobertura de film restringe el intercambio hídrico y la desecación superficial del HACE pero también impide el aporte externo de agua por lo que el grado de hidratación del compuesto expansivo se ve afectado desarrollando un menor porcentaje de expansión. Para la dosis del 15%, la magnitud de la expansión máxima alcanzada en ambiente A2 es de un 48,4% en el anillo de acero y de un 49,8% en el anillo de CFRP de la magnitud registrada en ambiente A1, mientras que para la dosis del 10% es del 63,4 y 54,5%, respectivamente.

Si se considera el uso al que se quiere destinar los HACE objeto de diseño como relleno en sistemas de refuerzo de pilares cilíndricos mediante encamisados exteriores prefabricados hay que tener en cuenta que en este caso, ambiente A2, el agua necesaria para llevar a cabo las reacciones de expansión proviene de la contenida inicialmente en el propio hormigón, y que este caso es el que más se puede asimilar a la situación real de refuerzo de un pilar, en el que el HACE de relleno no tiene contacto con la atmósfera exterior. En cualquier caso, se considera que esta situación es igualmente satisfactoria, ya que el experimento demuestra que el aporte de agua interna es suficiente como para asegurar que se produce un efecto expansivo que es capaz de poner en tensión la camisa de refuerzo.

Cabe mencionar que, en esta etapa del estudio con el dispositivo de doble anillo se repiten los ensayos llevados a cabo en ambiente A2, ya que se detecta que la temperatura de curado estaba siendo de 10°C, e incluso inferior, cuando la prevista en las condiciones de curado iniciales era de 20±2 °C. En estas circunstancias, se observa un comportamiento en deformación a tener en cuenta y que deberá ser corroborado en estudios posteriores, donde el anillo conservado con protección de film y temperatura de 10°C registra una expansión lineal y progresiva (Tabla 5.16 y Figura 5.23) sin cambios de pendiente importantes que alcanza, a la edad de 8 días, un valor de expansión muy similar al registrado sobre el anillo curado en las condiciones fijadas para ambiente A2.

Tabla 5.16 Datos de influencia de la temperatura en régimen de expansión en anillos con cobertura de film y dosis de aditivo expansivo 15%.

Hormigón-Anillo-Curado	Día	Día	Día	Día	Día	Día	Día
	0	1	2	3	4	7	8
HACE-15% - Acero - A2	0,000	0,008	0,014	0,017	0,018	0,019	0,019
HACE-15% - Acero - (Tª=10°C o inferior)	0,000	0,003	0,006	0,009	0,011	0,017	0,018
HACE-15% - CFRP - A2	0,000	0,027	0,053	0,072	0,085	0,091	0,093
HACE-15% - CFRP - (Tª=10°C o inferior)	0,000	0,010	0,022	0,035	0,050	0,082	0,088

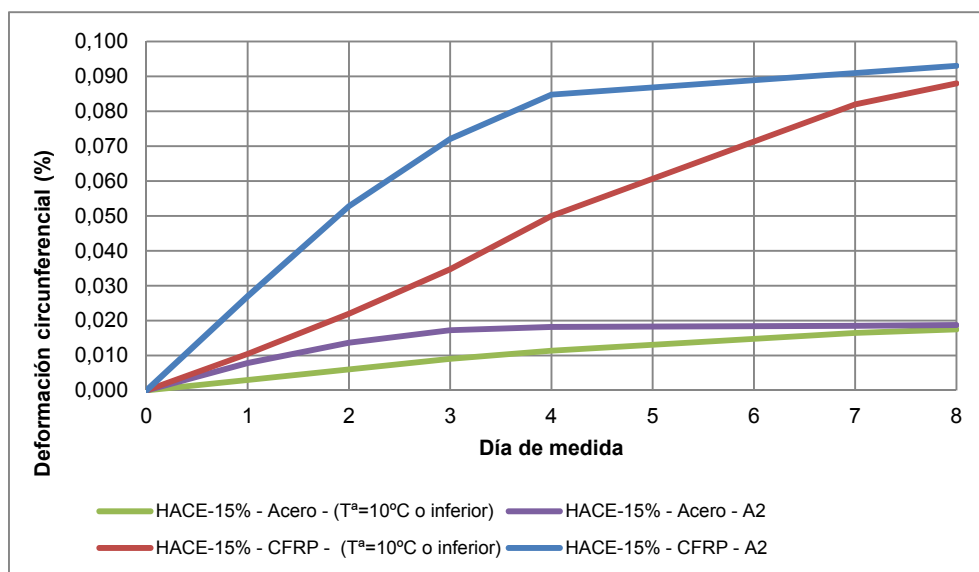


Figura 5.23 Comparativa influencia de la temperatura en régimen de expansión en anillos con cobertura de film y dosis de aditivo expansivo 15%.

La influencia de la temperatura en el desarrollo de la expansión esta referenciada por varios autores y se recoge en el apartado 2.2.7.5 de este documento.

- En ambiente A3, donde el anillo está expuesto directamente al aire, el desarrollo inicial de la expansión (primeras 24 horas) coincide en todos los casos estudiados, salvo pequeñas desviaciones, con el registrado en el ambiente A1. Sin embargo, el desarrollo posterior de la expansión se ve limitado tanto por la desecación superficial que sufre el HACE por exposición a un ambiente seco como por la falta de un aporte externo de agua, cesando las reacciones de expansión al no poder llevarse a acabo la hidratación del compuesto expansivo.

El ambiente A3 es el que registra una menor magnitud de expansión siendo para la dosis del 15% de un 22,0% en el anillo de acero y de un 23,7% en el anillo de CFRP de la magnitud registrada en ambiente A1, mientras que para la dosis del 10% es del 56,2% y 40,9% respectivamente.

Desde el punto de vista del sistema de refuerzo que se plantea en este estudio se considera que esta situación, ambiente A3, es la más limitante desde el punto de vista del desarrollo de la expansión y podría ser la que se diera en los extremos de una camisa real de refuerzo. Sin embargo, el pequeño tamaño de esa área hace que no sea muy relevante su estudio. Aun así, el observar que se producen expansiones mientras la masa de hormigón pierde agua garantiza que toda la camisa entre en tensión inicialmente, por lo que se evita que se produzcan posibles pérdidas de contacto entre el hormigón de relleno, el pilar y la camisa de refuerzo.

- El grado de restricción, que confiere cada camisa en función del material del que está fabricada, influye en la magnitud de la expansión desarrollada ya que para igual dosis y mismo ambiente de curado el HACE fabricado induce una mayor expansión en los anillos de CFRP que en los anillos de acero. Esto es así en todos los ambientes estudiados.

Comparando los valores máximos obtenidos de deformación circunferencial, para la dosis del 15%, el efecto de la restricción que confiere el acero se traduce en una disminución de la magnitud de la expansión de un 80% respecto a la registrada en los anillos de CFRP, Figura 5.24, mientras que, para la dosis del 10%, esta disminución se sitúa en torno al 85%, Figura 5.25, (hasta día de medida 3).

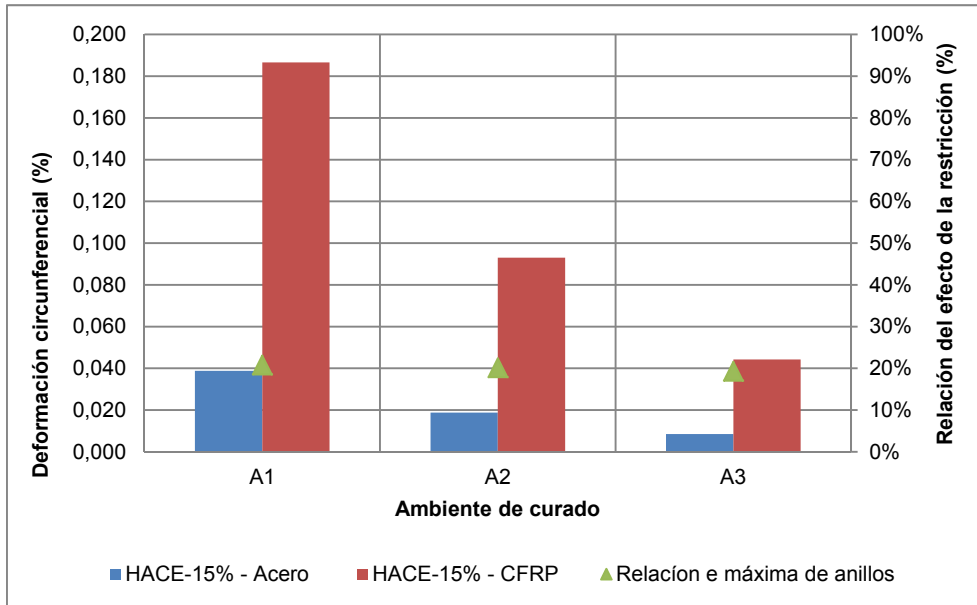


Figura 5.24 Efecto de la restricción en la deformación circunferencial para la dosis del 15% y diferentes ambientes de curado.

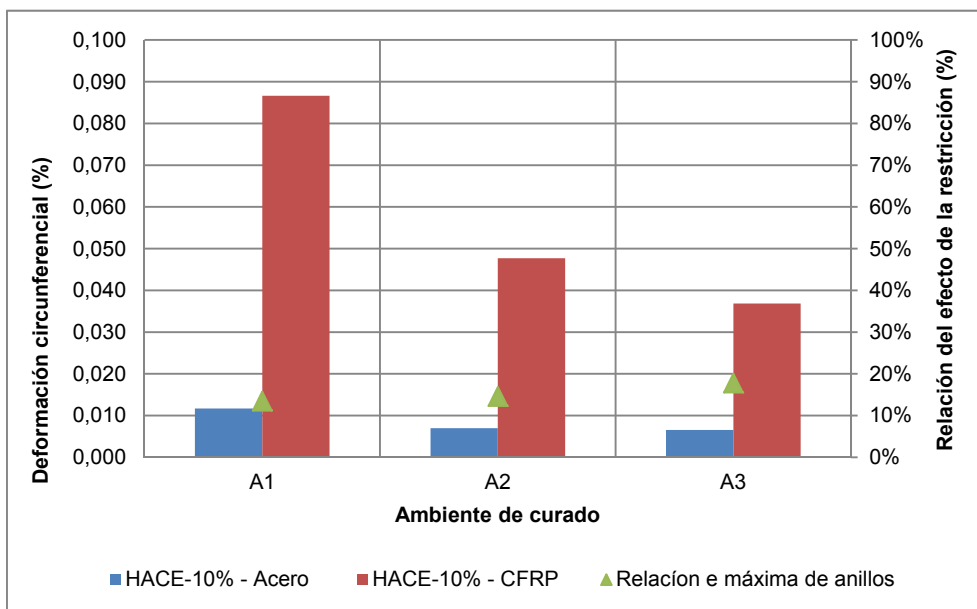


Figura 5.25 Efecto de la restricción en la deformación circunferencial para la dosis del 10% y diferentes ambientes de curado.

Esto demuestra que la magnitud máxima de la expansión está condicionada por la restricción impuesta en el mismo grado, independientemente del ambiente de curado.

- El mecanismo de expansión comienza a actuar una vez fraguado el hormigón durante las etapas iniciales del endurecimiento. Teniendo en cuenta esto, el método de ensayo ASTM C878 establece que la medida de referencia para evaluar el % de expansión en régimen restringido de un hormigón expansivo se tome sobre la *restraining cage* de probetas desmoldadas a las 6 horas desde el vertido del hormigón ya que considera que este tiempo es suficiente para garantizar un fraguado y endurecimiento inicial que permita la manipulación de las probetas sin riesgo a ser dañadas.

Así mismo, este método, permite modificar el tiempo de desmolde en función de ensayos previos que determinen el tiempo de fraguado y correcto endurecimiento del hormigón objeto de estudio con el fin de comenzar con el registro de deformaciones en el momento adecuado para valorar de forma más precisa la expansión total del elemento.

Sin embargo, una alteración o cambio no previsto en las condiciones de curado (temperatura y humedad), composición de partida u otros factores, pueden modificar ese tiempo de fraguado retrasando o acelerando el mismo lo que irremediablemente afectará a la medida y registro de deformaciones posterior.

A fin de evitar la dependencia del tiempo de fraguado y endurecimiento del hormigón y con el objetivo de asegurar el registro de la expansión desde los instantes iniciales que esta se produce, sería más lógico tomar como medida de referencia la longitud inicial de *restraining cage* cuando se dispone en el molde, de esta forma se tendría controlado el rango de deformaciones sin depender del tiempo de fraguado, endurecimiento y desmolde.

- Esta propuesta se fundamenta en los resultados recogidos en los apartados 5.5.1.1 y 5.5.1.2, donde el registro de deformaciones se realiza en continuo mediante bandas extensométricas adheridas a la superficie de los anillos exteriores controlando de esta forma la deformación del anillo desde el vertido del hormigón. Este sistema de medida permite, además, aislar la expansión que tiene lugar en las primeras 24 horas a fin de comparar que porcentaje de la expansión final representa así como verificar el momento en el que comienzan a producirse las primeras expansiones

La Tabla 5.17 recoge el porcentaje de expansión que se pierde al considerar como referencia la medida a las 24 horas y no la medida inicial. El porcentaje de expansiones no registrado es mayor cuanto menor es la dosis de aditivo expansivo y más desfavorable es el ambiente de curado desde el punto de vista de la hidratación del componente expansivo.

Tabla 5.17 Porcentaje de deformación perdido al retrasar el registro de deformaciones 24 horas.

HACE - Anillo	Ambiente		
	A1	A2	A3
HACE-15% - Acero	19,3%	42,0%	95,4%
HACE-15% - CFRP	13,3%	29,0%	53,8%
HACE-10% - Acero	44,9%	68,9%	70,0%
HACE-10% - CFRP	31,2%	56,6%	81,1%

- Comparativamente las Figura 5.26, Figura 5.27, Figura 5.28 y Figura 5.29 ilustran la pérdida de deformación en régimen restringido para los casos considerados cuando existe un retraso en el registro de deformaciones de unas 24 horas.

- Notar que el momento de registro de medida no solo influye en la magnitud máxima sino también en el régimen de expansión considerado, esto último lo ilustra el desarrollo inicial (pendiente de la curva) de la expansión en ambientes A1, A2 y A3 donde si se considera el registro de la expansión desde el inicio las curvas se solapan mientras que si se considera transcurridas 24 horas las pendientes iniciales de las curvas son distintas y se muestran dependientes del ambiente de curado para una misma dosis de aditivo expansivo.

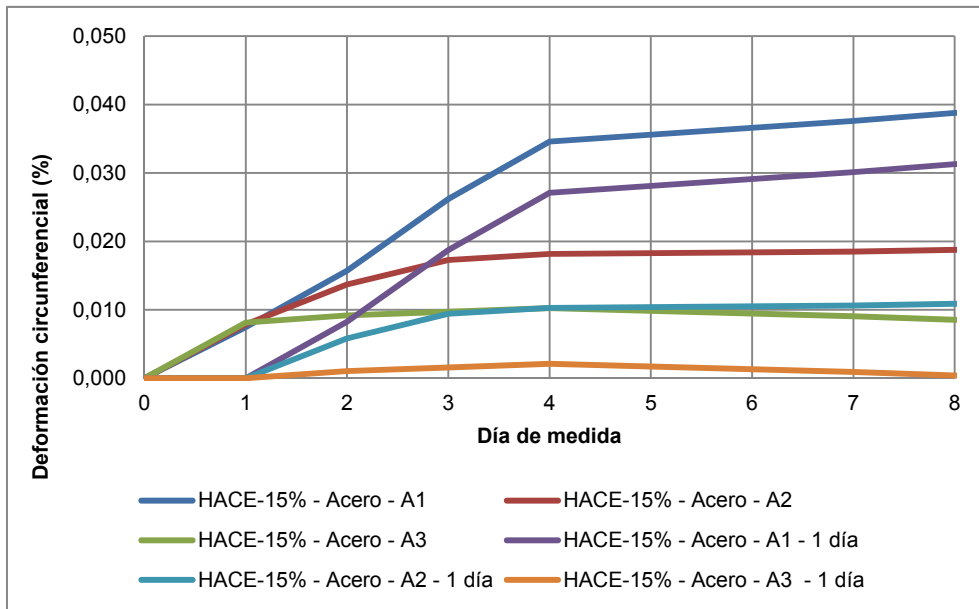


Figura 5.26 HACE-15%-Anillo Acero. Comparativa del régimen de expansión considerando la medida de referencia inicial o transcurridas 24 horas.

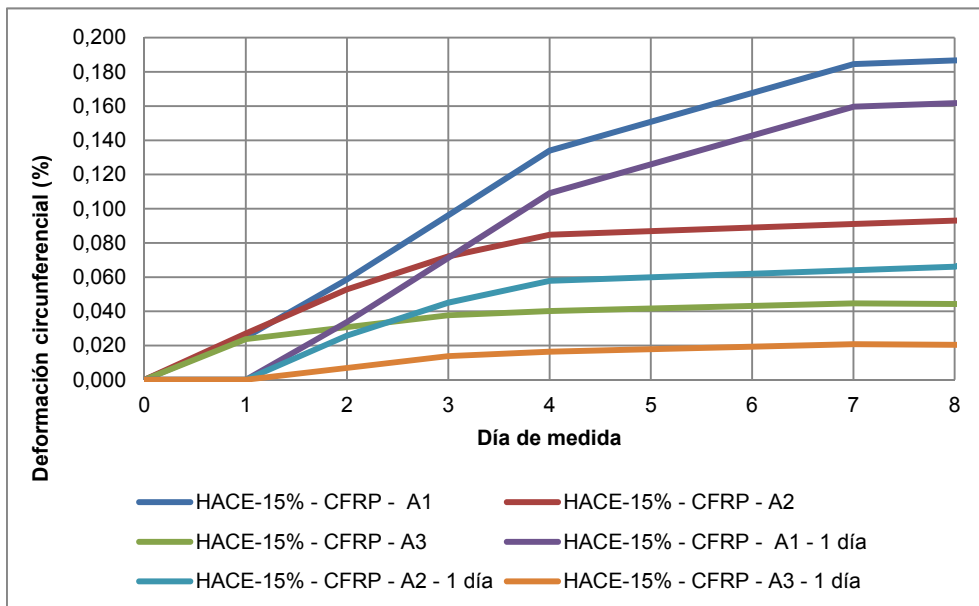


Figura 5.27 HACE-15%-Anillo CFRP. Comparativa del régimen de expansión considerando la medida de referencia inicial o transcurridas 24 horas.

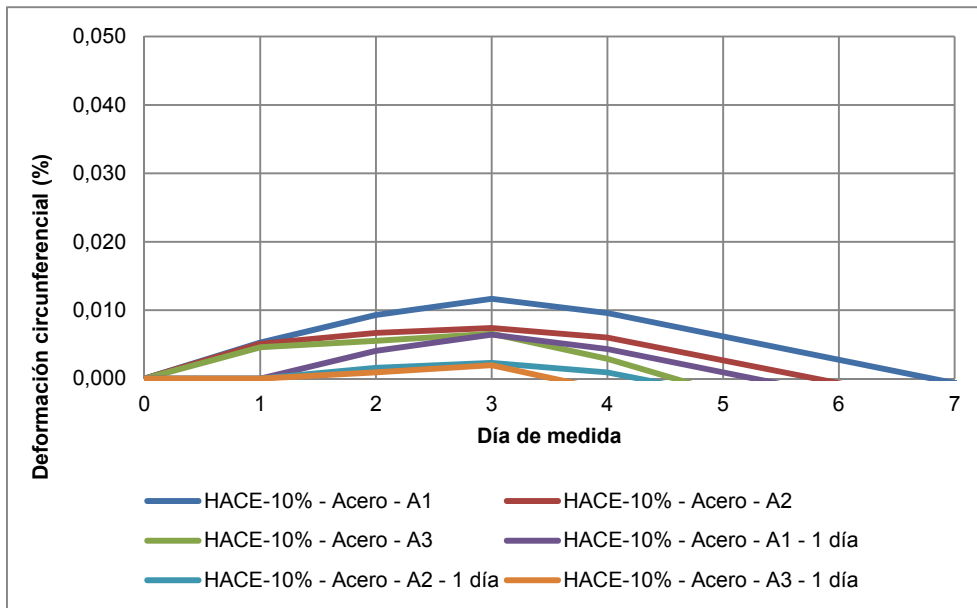


Figura 5.28 HACE-10%-Anillo Acero. Comparativa del régimen de expansión considerando la medida de referencia inicial o transcurridas 24 horas.

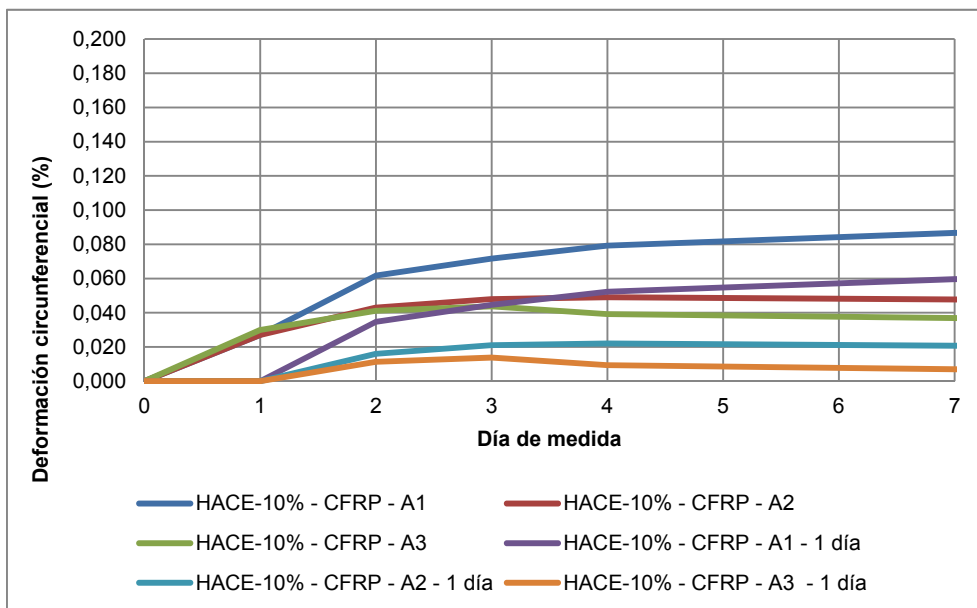


Figura 5.29 HACE-10%-Anillo CFRP. Comparativa del régimen de expansión considerando la medida de referencia inicial o transcurridas 24 horas.

5.5.3.2 Correlación entre expansiones según dispositivo de doble anillo y método ASTM C878

Se comparan los resultados de deformación en régimen restringido obtenidos empleando la dosis del 15% de aditivo expansivo DENKA CSA 20 tanto en prismas de hormigón como en anillos de acero y CFRP sometidos a ambientes de curado similares. Teniendo en cuenta esto se establece que:

- La relación entre la deformación determinada sobre dispositivo de doble anillo con refuerzo de acero y la registrada en probetas prismáticas de acuerdo a la norma ASTM C878 es de carácter marcadamente lineal.
- Al igual que en el caso anterior, la relación existente entre la deformación determinada sobre anillo con refuerzo de CFRP y la registrada en probetas prismáticas de acuerdo a la norma ASTM C878 es de carácter lineal.
- Los grados de correlación son altos (Tabla 5.18) pudiéndose llegar a plantear la aplicación de un esquema de diseño de hormigones expansivos similar al que recoge la guía de uso ACI 223 pero actualizando los ábacos de diseño a las medidas realizadas con el dispositivo de doble anillo propuesto en este trabajo.

Tabla 5.18 grado de correlación lineal y exponencial.

Comparativa	Grado de correlación (R^2)
HACE-15% Viga A1-Acero A1	0,979
HACE-15% Viga A2-Acero A2	0,922
HACE-15% Viga A1-CFRP A1	0,995
HACE-15% Viga A2-CFRP A2	0,993

- Aunque hay diferencia cuantitativa en la comparación con las probetas conservadas de forma diferente (con protección de film o sin ella), el comportamiento cualitativo es similar, lineal con un altísimo grado de correlación.
- Puesto que la medida sobre probeta prismática es simplemente un procedimiento de referencia, que no tiene por qué simular las condiciones exactas en la aplicación, posiblemente es más sencillo mantener el método original, sin tener que realizar operaciones de protección.
- Sin embargo, a la hora de diseñar un hormigón expansivo para una aplicación concreta como es el relleno de la solución de refuerzo propuesta, sí que debería ensayarse en condición de aislado del ambiente externo, ya que ésta es la situación que puede asimilarse a la condición real del hormigón expansivo situado entre la camisa y el pilar.

5.6 Conclusiones capítulo 5

Las conclusiones que se extraen de este capítulo son las que siguen:

- Las dosis empleadas del 10% y 15% de aditivo expansivo DENKA CSA 20 son suficientes para inducir un cierto grado de expansión inicial que venza la restricción impuesta por los encamisados exteriores propuestos de acero o CFRP en cualquiera de los ambientes de curado planteados.
- El porcentaje de aditivo expansivo influye en la magnitud de las expansiones desarrolladas de tal forma que a mayor porcentaje adicionado mayor es la magnitud de la expansión desarrollada.
- El ambiente de curado condiciona el desarrollo y valor máximo de la expansión. Al igual que en el capítulo anterior se comprueba que un ambiente que asegure un aporte externo y continuo de agua favorece el desarrollo de la expansión al facilitar la hidratación del compuesto expansivo durante las primeras edades.
- El curado de probetas de HACE en ambiente A1, donde el aporte de agua es continuo, induce expansiones de mayor magnitud que las desarrolladas en el curado en ambientes A2 y A3. Aun así, se demuestra que el agua de composición del hormigón, siempre que se evite su pérdida (ambiente A2), es suficiente para hidratar el aditivo expansivo y generar deformaciones en sentido positivo que venzan la restricción impuesta inicialmente por los encamisados de acero o CFRP propuestos. Incluso para la dosis del 15%, en las condiciones desfavorables de curado del ambiente A3, se asegura un mínimo desarrollo de la expansión que asegura una puesta en tensión del encamisado inicialmente, evitando posibles pérdidas de contacto entre el hormigón de relleno, el pilar y la camisa de refuerzo.
- El tipo de restricción influye en la magnitud máxima de expansión de tal forma que, cuanto mayor es el grado de restricción menor es la expansión desarrollada. En el caso motivo de estudio la mayor restricción viene impuesta por la camisa de acero, que es el elemento sobre el que, para una misma dosis de aditivo expansivo y respecto al encamisado de CFRP, se registran valores de expansión menores en cada uno de los ambientes de curado. Así mismo, se puede decir que el grado de restricción influye en la velocidad del desarrollo inicial de la expansión. En nuestro caso, la pendiente inicial de las curvas de deformación bajo la condición de restricción de la camisa de CFRP es la misma en los tres casos estudiados, independientemente de la dosis de aditivo expansivo DENKA CSA 20 empleada y de las condiciones de curado impuestas. Sin embargo, en la condición de restricción bajo camisa de acero la pendiente inicial del desarrollo de la expansión se muestra dependiente de la dosis de aditivo adicionada siendo más rápido el desarrollo de la expansión en la dosis del 15% que en la del 10%.
- Adicionalmente, se puede establecer que para una misma dosis de aditivo expansivo el valor máximo alcanzado de la expansión es proporcional al grado de restricción impuesto independientemente del ambiente de curado (Figura 5.24 y Figura 5.25).
- La temperatura durante el curado del hormigón condiciona el régimen de expansión. En esta investigación, pendiente aún de estudios posteriores que lo corroboren o no, el comportamiento observado, se registran para un mismo hormigón y dos condiciones de restricción distintas, se puede ver como el régimen de expansión para temperaturas en

6 DETERMINACIÓN DEL GRADO DE EXPANSIÓN Y CONTRIBUCION MECÁNICA DEL HACE DISEÑADO SOBRE ELEMENTOS TIPO PROBETA Y TIPO PILAR CILÍNDRICO DE HORMIGÓN ARMADO

torno a los 20°C es distinto las registrado para temperaturas de 10°C. En el primer caso el desarrollo de la expansión podríamos decir que es bilineal, con un primer tramo de fuerte pendiente donde se registra la mayor parte de la expansión seguido de otro de pendiente más suave. Sin embargo, en el segundo caso, donde la temperatura de curado se estima en torno a los 10°C, el régimen de expansión observado es más lineal con una pendiente continua y menos pronunciada.

- El garantizar un registro de la expansión desde el instante inicial del vertido del hormigón es fundamental para determinar el correcto desarrollo y valor máximo de la misma, ya que, como pone de manifiesto la comparativa del estudio de expansiones en los instantes iniciales y a 1 día con el dispositivo de doble anillo, un retraso de 24 horas en el registro de deformaciones se traduce en pérdidas del valor de expansión considerado de entre un 13% y un 95%, en función de la dosis empleada y las condiciones de curado impuestas. Relativo a esto último se observa que cuanto menos favorable es la condición ambiental de curado (menor aporte de agua) más determinante es un retraso en el comienzo del registro de las deformaciones. Este hecho se observa para cada dosis y condición de restricción estudiada.
- El dispositivo de doble anillo propuesto en esta investigación no solo se muestra válido para registrar de forma eficaz las deformaciones circunferenciales y simular la configuración de refuerzo basada en el confinamiento mediante encamisados prefabricados exteriores y HACEs de relleno, sino que, dado el alto grado de correlación que presenta respecto del dispositivo de ensayo normativo de *restraining cage* en el registro de expansiones en distintos ambientes de curado se podría plantear como una alternativa de dispositivo de ensayo mejorada (más eficaz), sobremanera en lo que se refiere a los hormigones expansivos con las característica de pretensado químicamente, al permitir el registro de la expansión desde el instante inicial de puesta en obra del hormigón. Este dispositivo de doble anillo posee la ventaja de que evita depender del tiempo de fraguado para desmoldar y determinar el desarrollo completo de la expansión bajo múltiples condiciones de restricción.
- A la vista de los resultados obtenidos, tanto en vigas (Capítulo 4) como en el dispositivo tipo anillo, la dosis del 15% de aditivo expansivo DENKA CSA 20 es la dosis más efectiva para fabricar un hormigón expansivo pretensado químicamente con un régimen de expansiones permanente que garantice la puesta en tensión del encamisado exterior de refuerzo, independientemente de la condición de restricción, acero o carbono, y del ambiente de curado, con o sin aporte de humedad adicional. Por ello, se selecciona esta dosis de aditivo expansivo para fabricar los HACE que se emplearán como relleno en el sistema de refuerzo indirecto por confinamiento de elementos de hormigón tipo probeta o pilar cilíndrico armado mediante camisas prefabricadas de CFRP objeto del capítulo 6.

6 DETERMINACIÓN DEL GRADO DE EXPANSIÓN Y CONTRIBUCION MECÁNICA DEL HACE DISEÑADO SOBRE ELEMENTOS TIPO PROBETA Y TIPO PILAR CILÍNDRICO DE HORMIGÓN ARMADO

6.1 Introducción

El sistema de refuerzo mediante hormigones pretensados químicamente y camisas prefabricadas de CFRP se puede usar para incrementar el grado de confinamiento. Cuando el hormigón expansivo se aplica junto con camisas de CFRP la acción expansiva de este hormigón queda restringida por el encamisado exterior, generando un sistema de tensiones en el que la camisa exterior trabaja a tracción y el pilar objeto de refuerzo queda sometido a esfuerzos a compresión. Es obvio que Este efecto de post tensado incrementaría la acción de refuerzo por encamisados prefabricados exteriores al pasar de un confinamiento pasivo a uno activo.

La técnica de refuerzo propuesta, camisa prefabricada de fibra de carbono y hormigón autocompactante expansivo, se aplicada a pilares de hormigón armado de sección circular de 900 mm de altura y 240 mm de diámetro para comprobar su eficacia y ajustar y validar el modelo propuesto de confinamiento.

6.2 Objetivos

Los objetivos de esta fase se definen a continuación:

- Determinar y caracterizar la expansión que induce el HACE-15% de relleno sobre la camisa prefabricada en sistemas de refuerzo por confinamiento con encamisados exteriores aplicados sobre elementos cilíndricos de hormigón tipo probeta (150 x 300 mm) y tipo pilar armado (240 x 900 mm).
- Identificar factores que puedan afectar al desarrollo de la expansión, cuando la solución de refuerzo propuesta se aplica a elementos de hormigón.
- Evaluar la contribución resistente, desde el punto de vista mecánico, de la solución de refuerzo propuesta basada en el confinamiento indirecto con camisas prefabricadas de CFRP y relleno de HACE frente a elementos sin reforzar o bien con refuerzo por confinamiento directo de CFRP.
- Comparar las deformaciones circunferenciales determinadas en el elemento de doble anillo respecto de las circunferenciales obtenidas en elementos tipo probeta y pilar armado.

La elección de dos tipologías de elementos de ensayo de hormigón sobre los que determinar la expansión y la contribución mecánica del encamisado exterior se fundamenta en que, por un lado, la probeta cilíndrica de hormigón de dimensiones 150 x 300 mm, al ser de uso habitual a escala de laboratorio para la determinación de propiedades mecánicas del hormigón como la resistencia a compresión, permite disponer fácilmente de un elemento de sección circular sobre el que valorar

la contribución del refuerzo y la acción expansiva del HACE de relleno a la escala referida, mientras que, por otro lado, la elección de elementos tipo pilar cilíndrico de hormigón armado de dimensiones 240 x 900 mm busca evaluar la efectividad del sistema de confinamiento propuesto sobre un elemento que simule una situación similar a la configuración real de un pilar armado cilíndrico objeto de refuerzo.

6.3 Materiales y equipos

A continuación se definen los materiales y equipos necesarios para ejecutar esta fase de los trabajos.

6.3.1 Materiales

Los materiales que se utilizan en esta fase son los mismos que los referenciados en el apartado 3.3.1. y 5.3.1.

6.3.2 Equipos de ensayo y medición

Los equipos de ensayo y medición que se utilizan en esta fase son los mismos que los referenciados en el apartado 3.3.2, 5.3.2 y adicionalmente:

6.3.2.1 Transductor de desplazamiento (LVDT)

Los cambios de longitud lineales (en este caso altura) en elementos tipo pilar se registran con transductores de desplazamiento tipo LVDT, Figura 6.1, modelo DG/5 de la empresa Solar Metrology con un recorrido de $\pm 5\text{mm}$ y un error del 0,5%.



Figura 6.1 LVDT.

6.3.2.2 Prensa de 1000 toneladas

El ensayo a compresión en elementos tipo pilar cilíndrico de hormigón armado se lleva a cabo en una prensa hidráulica de cuatro columnas modelo ICON con capacidad para 1000 toneladas con control de carga (Figura 6.2.), mientras que en elementos tipo probeta se realiza una prensa IBERTEST MEH3000 cuyas características se recogen en el Apartado 3.3.2.5 de este documento.



Figura 6.2 Prensa ICON 1000.

6.4 Metodología

El programa experimental que se recoge en este apartado pretende validar los resultados de expansión obtenidos en las fases anteriores y cumplir los objetivos que se recogen en el apartado 6.2 evaluando sobre elementos de hormigón tipo probeta y tipo pilar cilíndrico armado:

- La contribución mecánica del sistema de refuerzo por confinamiento indirecto con camisas prefabricadas de CFRP y relleno de HACE-15%.
- El grado de expansión que se produce en la camisa prefabricada de refuerzo por acción del HACE de relleno.

6.4.1 Determinación del grado de expansión y contribución resistente en elementos cilíndricos de hormigón tipo probeta y tipo pilar armado

Para el desarrollo de esta fase:

6 DETERMINACIÓN DEL GRADO DE EXPANSIÓN Y CONTRIBUCION MECÁNICA DEL HACE DISEÑADO SOBRE ELEMENTOS TIPO PROBETA Y TIPO PILAR CILÍNDRICO DE HORMIGÓN ARMADO

- Se fabrican 14 elementos cilíndricos de hormigón a partir de una misma amasada, concretamente 6 probetas cilíndricas de dimensiones 150 x 300 mm y 8 pilares armados de dimensiones 240 x 900 mm, con una resistencia a compresión estimada en torno a 20 MPa.
- Los elementos tipo pilar se arman longitudinalmente con 8 barras de diámetro 10 mm y transversalmente con cercos de diámetro 6 mm dispuestos cada 200 mm. En los extremos del pilar se disponen dos cercos. La Figura 6.3 recoge el esquema de armado.

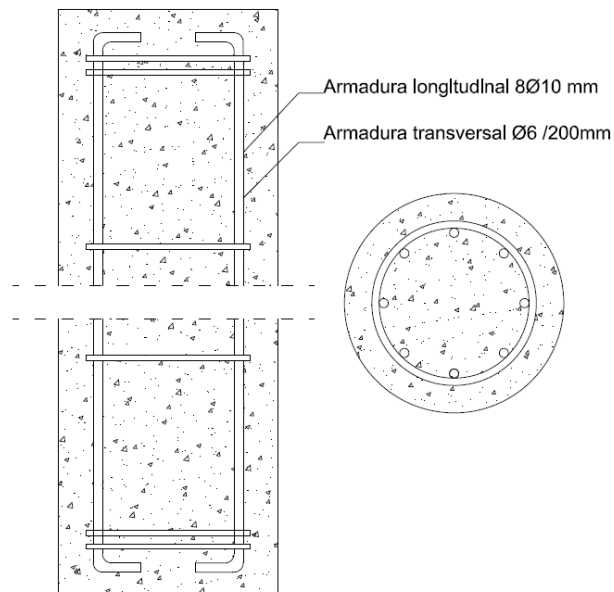


Figura 6.3 Disposición de armadura en pilar.

- Se selecciona, para la fabricación del HACE de relleno, la dosis de aditivo expansivo DENKA CSA 20 en la proporción del 15%, dosis que, según los resultados de los ensayos de laboratorio que se recogen en los apartados 4.5.2 y 5.5.2, no sólo compensa la retracción sino que también genera un grado de expansión permanente a modo de pretensado químico en el hormigón que garantiza la puesta en tensión del encamisado de refuerzo prefabricado desde los instantes iniciales de puesta en obra.
- Se prefabrican encamisados de fibra de carbono CFRP de espesor 1,3 mm y diámetros 320 mm para pilares y 250 mm para probetas empleando como material un sistema epóxico y un tejido de fibra de carbono con las características técnicas que se recogen en el Apartado 5.3.1.1.

En la planificación inicial, se contaba con fabricar encamisados metálicos de acero al igual que se hizo en los estudios llevados a cabo sobre los dispositivos de doble anillo, pero esta posibilidad hubo que desecharla, ya que, en el momento de realización de la investigación, no fue posible encontrar un distribuidor de material que suministrara tubos de acero con los diámetros interiores requeridos (320 mm y 250 mm) para un espesor de camisa de 6 mm (espesor empleado en los encamisados de acero de los dispositivos de doble anillo)

6 DETERMINACIÓN DEL GRADO DE EXPANSIÓN Y CONTRIBUCION MECÁNICA DEL HACE DISEÑADO SOBRE ELEMENTOS TIPO PROBETA Y TIPO PILAR CILÍNDRICO DE HORMIGÓN ARMADO

La determinación del grado de expansión que induce el HACE-15% de relleno sobre la camisa prefabricada de CFRP se realiza sobre 2 elementos tipo probeta cilíndrica de hormigón de dimensiones 150 x 300 mm y sobre 4 elementos tipo pilar cilíndrico de hormigón armado de dimensiones 900 x 240 mm, alrededor de los cuales se dispone una camisa prefabricada de CFRP instrumentada con bandas extensométricas conforme al esquema de la Figura 6.9.

La evaluación de la contribución resistente se realiza sobre 6 elementos tipo probeta cilíndrica de hormigón de dimensiones 150 x 300 mm y 8 elementos tipo pilar cilíndrico de hormigón armado de dimensiones 900 x 240 mm, fabricados conforme a tres configuraciones de refuerzo distintas: sin refuerzo, refuerzo por confinamiento directo y refuerzo por confinamiento indirecto mediante encamisados exteriores prefabricados y HACE de relleno.

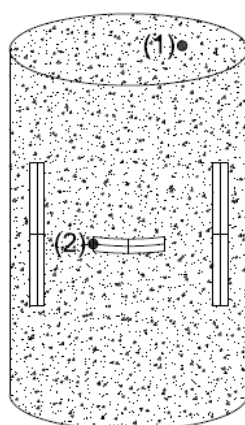
Transcurridos 28 días desde el vertido del hormigón de relleno HACE-15%, los elementos se ensayan bajo carga uniaxial a compresión hasta fallo o rotura. Previo al ensayo, los elementos tipo probeta se refrentan con mortero de azufre y los elementos tipo pilar con escayola, para asegurar en la medida de lo posible el paralelismo entre caras opuestas.

A continuación se detalla la configuración de los elementos motivo de estudio, así como la configuración de refuerzo, instrumentación y forma de ejecución de los mismos:

6.4.1.1 Sin refuerzo

Se elaboran dos probetas y dos pilares cilíndricos de hormigón armado sobre los que no se dispone tipo alguno de refuerzo por encamisado directo o indirecto de CFRP. Esta configuración tiene por objeto determinar la resistencia a compresión de referencia de probetas y pilares cilíndricos de hormigón armado en ausencia de refuerzo.

Cada elemento motivo de ensayo se instrumenta con dos galgas longitudinales y dos transversales tipo PL-60-11 colocadas a 90° en el centro del elemento (Figura 6.4) con el fin de evaluar las deformaciones longitudinales y circunferenciales que tienen lugar en el elemento de hormigón durante el ensayo a compresión.

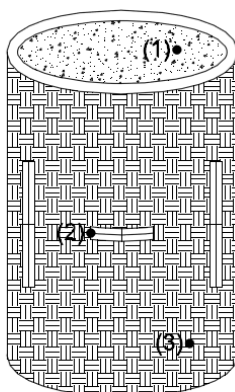


- (1)• Elemento de hormigón objeto de refuerzo
- (2)• Bandas extensométricas

Figura 6.4 Disposición de las galgas en elementos sin reforzar.

6.4.1.2 Refuerzo por confinamiento directo

Se fabrican dos probetas y dos pilares cilíndricos de hormigón armado sobre los que se dispone un refuerzo continuo y directo de CFRP. Los elementos tipo probeta se instrumenta con dos galgas longitudinales y dos transversales tipo BFLA-5-5 colocadas a 180° en el centro del elemento (Figura 6.5). Los elementos tipo pilar se instrumentan con tres LVDT paralelos al eje axial del pilar y dos galgas transversales tipo BFLA-5-5 colocadas a 180° en el centro del elemento. Esta instrumentación tiene el fin de evaluar las deformaciones que se producen durante el ensayo a compresión de los elementos de hormigón confinados directamente con encamisado CFRP.



- (1)• Elemento de hormigón objeto de refuerzo
- (2)• Bandas extensométricas
- (3)• Camisa de refuerzo de CFRP (in situ o prefabricada)

Figura 6.5 Disposición de las galgas en elementos con refuerzo directo de CFRP.

La ejecución del refuerzo se realiza conforme a los siguientes pasos:

- En primer lugar, se corta el tejido de fibra de carbono unidireccional con una longitud igual a la circunferencia de la sección del elemento a reforzar (pilar o probeta), incrementado esta longitud en 200 mm para cumplir de esta forma con las recomendaciones de longitud mínima de solape que refieren las guías de diseño de refuerzo por confinamiento y la hoja técnica del producto.
- Posteriormente, se dispone el tejido de refuerzo sobre una superficie horizontal y se prepara una resina epóxica de impregnación de 2 componentes (endurecedor y resina) conforme a las indicaciones de la hoja técnica del producto. Preparada la resina, se aplica directamente sobre la fibra de carbono y mediante espátula se asegura un reparto homogéneo de la resina y una impregnación completa de la fibra.

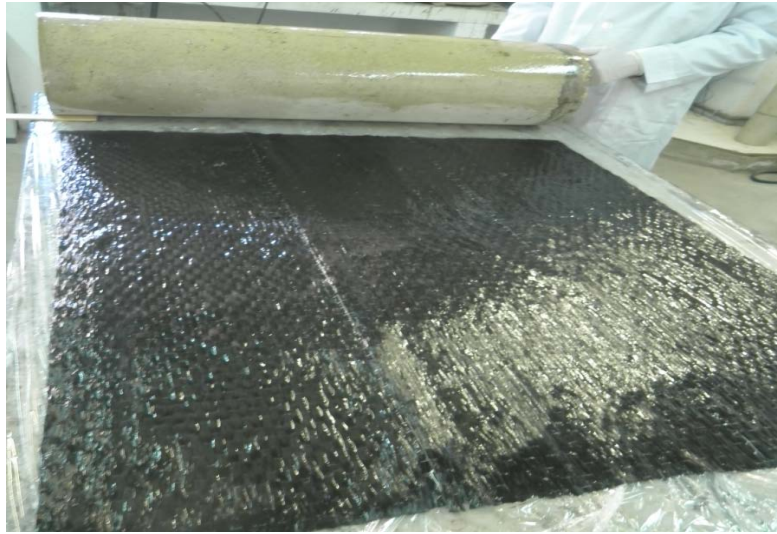


Figura 6.6 Ejecución de refuerzo directo de FRP, paso 1.

- Humedecido el tejido con la resina epóxica, se coloca sobre la fibra de carbono el elemento objeto de refuerzo previamente saneado y se aplica la fibra de carbono en la dirección perpendicular al eje axial del elemento a reforzar.



Figura 6.7 Ejecución de refuerzo directo de FRP, paso 2.

- Por último, se deja curar y endurecer la resina en condiciones ambientales hasta la edad de ensayo, momento en el cual se instrumenta con tres bandas extensométricas longitudinales y tres circunferenciales para determinar el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson en compresión.



Figura 6.8 Ejecución de refuerzo directo de FRP, paso 3.

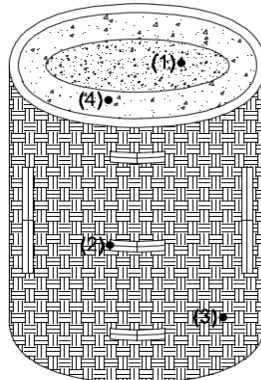
Mencionar que el refuerzo de fibra de carbono no se ejecuta en toda la altura del pilar sino que se deja un espacio libre de 20 mm, bien en cabeza bien en la base, para evitar que la integridad del refuerzo se vea comprometida por esfuerzos a compresión durante el ensayo.

6.4.1.3 Refuerzo por confinamiento indirecto mediante encamisados prefabricados exteriores y HACE de relleno

Se fabrican dos probetas y cuatro pilares cilíndricos de hormigón armado sobre los que se disponen camisas de refuerzo prefabricadas de CFRP. El espacio interior, 40 mm en el caso de pilares y 50 mm en probetas, se rellena con el HACE-15%.

Las camisas prefabricadas que se disponen sobre los elementos tipo probeta se instrumentan con 9 bandas extensométricas tipo BFLA-5-5 colocadas en tres alturas a 120° (Figura 6.9) para el registro de las deformaciones producidas por el HACE de relleno. Complementariamente se disponen tres galgas del mismo tipo con el fin de evaluar las deformaciones que tienen lugar durante el ensayo a compresión de los elementos de hormigón confinados indirectamente con encamisados prefabricados de CFRP.

Los elementos tipo pilar se instrumentan con tres galgas transversales tipo BFLA-5-5 colocadas a 120° en el centro del elemento para evaluar la expansión que induce el HACE de relleno. Adicionalmente a las bandas extensométricas que se colocan para medir la deformación circunferencial, se disponen tres LVDT paralelos al eje axial del pilar fijados sobre el encamisado exterior para evaluar las deformaciones longitudinales que se producen durante el ensayo a compresión de los elementos de hormigón confinados con la solución propuesta de CFRP prefabricado y HACE de relleno.



- (1)• Elemento de hormigón objeto de refuerzo
- (2)• Bandas extensométricas
- (3)• Camisa de refuerzo de CFRP (in situ o prefabricada)
- (4)• MHACE

Figura 6.9 Disposición de las galgas en elemento con refuerzo prefabricado de CFRP y HACE de relleno.

La ejecución del refuerzo se realiza conforme a los pasos siguientes:

- En primer lugar, se define un elemento que sirva como molde para fabricar la camisa de fibra de carbono. En nuestro caso se selecciona como molde un tubo de PVC que se divide en tres secciones para facilitar el posterior desmolde.

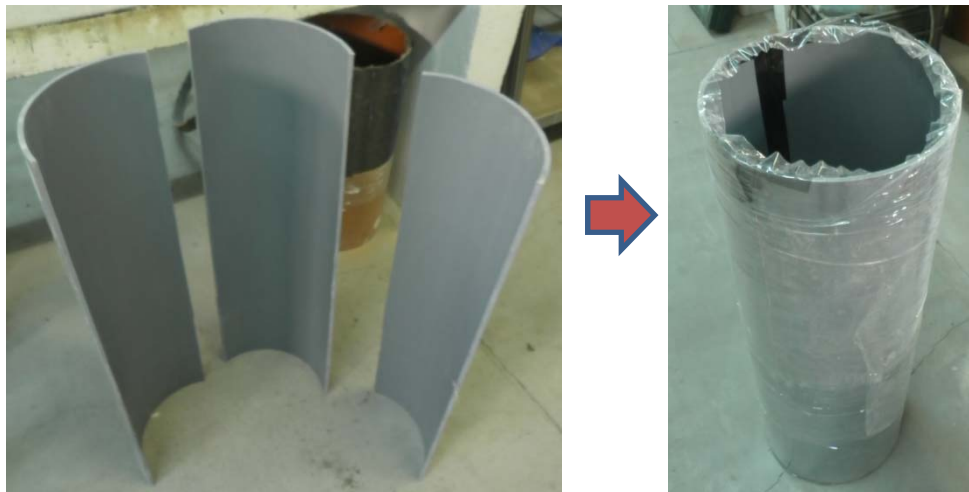


Figura 6.10 Molde utilizado para fabricar las camisas prefabricadas de CFRP.

- A continuación, se corta el tejido de fibra de carbono unidireccional con una longitud igual a la circunferencia de la sección exterior del tubo de PVC, incrementado esta longitud en 200 mm para cumplir de esta forma con las recomendaciones de longitud mínima de solape que refieren las guías de diseño de refuerzo por confinamiento y la hoja técnica del producto.

6 DETERMINACIÓN DEL GRADO DE EXPANSIÓN Y CONTRIBUCION MECÁNICA DEL HACE DISEÑADO SOBRE ELEMENTOS TIPO PROBETA Y TIPO PILAR CILÍNDRICO DE HORMIGÓN ARMADO

- Posteriormente, se dispone el tejido de refuerzo sobre una superficie horizontal y se prepara una resina epóxica de impregnación de 2 componentes (endurecedor y resina) conforme a las indicaciones de la hoja técnica del producto. Preparada la resina, se aplica directamente sobre la fibra de carbono y mediante espátula se asegura un reparto homogéneo de la resina y una impregnación completa de la fibra.



Figura 6.11 Fabricación de encamisados exteriores de CFRP, paso 1.

- Humedecido el tejido con la resina epóxica, se coloca el tubo de PVC sobre la fibra de carbono y se aplica esta en la dirección perpendicular al eje axial del tubo.



Figura 6.12 Fabricación de encamisados exteriores de CFRP, paso 2.

- Previo al hormigonado de relleno, se deja curar y endurecer la resina en condiciones ambientales conformándose así la camisa prefabricada de CFRP. Sobre estos encamisados se disponen circunferencialmente tres bandas extensométricas para determinar el grado de expansión que induce el HACE de relleno sobre la camisa

DISEÑO DE HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES EXPANSIVOS

6 DETERMINACIÓN DEL GRADO DE EXPANSIÓN Y CONTRIBUCION MECÁNICA DEL HACE DISEÑADO SOBRE ELEMENTOS TIPO PROBETA Y TIPO PILAR CILÍNDRICO DE HORMIGÓN ARMADO

prefabricada desde el momento en que se vierte el hormigón hasta el momento en que se ensaya el elemento reforzado a compresión. Así mismo estas galgas sirven para determinar el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson en compresión de la solución de refuerzo por confinamiento con encamisados exteriores de CFRP y relleno de HACE.



Figura 6.13 Fabricación de encamisados exteriores de CFRP. Curado (izquierda) y desmoldado (derecha).

- Finalmente se procede al vertido del HACE de relleno seleccionado, registrando las deformaciones que se producen en la camisa de refuerzo desde el instante inicial de puesta en obra hasta la edad de ensayo a compresión (28 días).



Figura 6.14 Ejecución de refuerzo indirecto por Vertido y llenado del espacio entre camisa CFRP y elemento a reforzar, tipo probeta (izquierda) y tipo pilar armado (derecha).

DISEÑO DE HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES EXPANSIVOS

6 DETERMINACIÓN DEL GRADO DE EXPANSIÓN Y CONTRIBUCION MECÁNICA DEL HACE DISEÑADO SOBRE ELEMENTOS TIPO PROBETA Y TIPO PILAR CILÍNDRICO DE HORMIGÓN ARMADO

En este caso, al igual que en el método de refuerzo anterior, la altura de las camisas prefabricadas se minorará 20 mm respecto a la altura del elemento a reforzar, garantizando de esta forma la integridad de la camisa de refuerzo durante el ensayo a compresión.

Esquemáticamente la Tabla 6.1 y Tabla 6.2 recogen los elementos, dimensiones y configuraciones de refuerzo objeto de ensayo.

Tabla 6.1 Elementos objeto de ensayo tipo probeta.

Elemento de ensayo			
Probeta cilíndrica de hormigón			
Dimensiones (mm)			
300 x 150			
Configuración de refuerzo	Elementos a ensayar	Características refuerzo	Tipo de ensayo
Sin refuerzo (SR)	2 elementos	-	Compresión
Refuerzo por confinamiento directo (CFRP)	2 elementos con refuerzo simple	Espesor de 1 mm de CFRP + 120 mm de solape	Compresión
Encamisado prefabricado + HACE de relleno (CFRPHE)	2 elementos con refuerzo simple CFRP + HACE de relleno	1 mm CFRP + 50 mm de HACE de relleno + 200 mm de solape	Evaluación expansión/Compresión

Tabla 6.2 Elementos objeto de ensayo tipo pilar.

Elemento de ensayo			
Pilar cilíndrico de hormigón armado			
Dimensiones (mm)			
900 x 240			
Configuración de refuerzo	Elementos a ensayar	Características refuerzo	Tipo de ensayo
Sin refuerzo (SR)	2 elementos	-	Compresión
Refuerzo por confinamiento directo (CFRP)	2 elementos (1 con refuerzo simple y 1 con refuerzo doble en cabeza y base)	Espesor de 1 mm de CFRP + 200 mm de solape	Compresión
Encamisado prefabricado + HACE de relleno (CFRPHE)	4 elementos (2 con refuerzo simple y 2 con refuerzo doble en cabeza y base)	1 mm CFRP + 40 mm de HACE de relleno + 250 mm de solape	Evaluación expansión/Compresión

6.4.2 Consideraciones previas al vertido del HACE-15%

El HACE de relleno al estar embebido en el espacio comprendido entre la camisa prefabricada de CFRP y el elemento objeto de refuerzo (probeta o pilar) no va a experimentar un intercambio hídrico con el ambiente razón por la cual las reacciones de hidratación y formación de compuestos expansivos (Etringita) se llevarán a cabo mediante el agua de amasado y composición del propio hormigón.

Estas condiciones de curado son similares a las que se simulan en otros apartados de este documento bajo la denominación de ambiente de curado A2 (ver apartado 5.4, Tabla 5.7).

Dado que los materiales componentes del HACE-15% y la proporción de los mismos se mantiene es de esperar que los resultados de expansión sean similares al caso del anillo relleno con HACE-15% y encamisado exterior de CFRP sometido a ambiente de curado A2. Sin embargo, se ha de tener en cuenta que, a diferencia de los Capítulos 4 y 5 donde la expansión se evalúa empleando materiales estancos y no absorbentes (Restraining Cage y anillos de acero o CFRP), en este caso los elementos a reforzar, al ser de fabricados en hormigón de baja calidad, constituyen una superficie porosa susceptible de absorber parte del agua de amasado y composición del HACE de relleno.

Bajo esta situación se podría reducir el agua disponible para llevar a cabo la hidratación del compuesto expansivo y por tanto afectar al desarrollo del grado de expansión o inducir un desarrollo no uniforme de esta última.

Para evitar, en la medida de lo posible, el problema mencionado se decide, previo al vertido del hormigón de relleno HACE-15%, humedecer las superficies de los elementos objeto de refuerzo mediante inmersión, en el caso de las probetas, y mediante proyección discontinua de agua con manguera en el caso de los pilares. Estas operaciones se llevan a cabo durante la hora previa al vertido del hormigón de relleno (Figura 6.15).



Figura 6.15 Operaciones de humedecido Probetas - Pilares.

Previo al hormigonado y posterior a las labores de humectación de las probetas y pilares, se observa que todas las probetas cilíndricas con inmersión en agua y dos de los pilares regados con manguera presentan, a simple vista, una superficie completamente húmeda. Sin embargo, sobre los dos pilares restantes (PCFRPHE-2 y PCFRPHE-4) se localizan en superficie zonas completamente secas (la Figura 6.15-derecha ilustra la diferencia de humedad superficial mencionada). Aun así, se deciden hormigonar todos los pilares de una vez para ver que posible efecto puede tener la falta de humedad superficial en el desarrollo de expansiones del HACE de relleno.

6.5 Resultados y discusión

6.5.1 Determinación del grado de expansión en elementos cilíndricos de hormigón tipo probeta y tipo pilar armado

A continuación se muestran los resultados de expansión obtenidos sobre los elementos cilíndricos de hormigón tipo probeta y pilar armado.

Tabla 6.3 Expansión circunferencial promedio – Elementos tipo probeta 150 x 300 mm

Referencia	Día	Día	Día	Día	Día	Día	Día	Día	Día	Día
	0	1	2	3	4	7	8	9	14	28
Probeta CFRP + HACE-1	0,000	0,037	0,065	0,085	0,092	0,095	0,095	0,093	0,093	0,091
Probeta CFRP + HACE-2	0,000	0,037	0,063	0,081	0,088	0,093	0,092	0,090	0,092	0,090

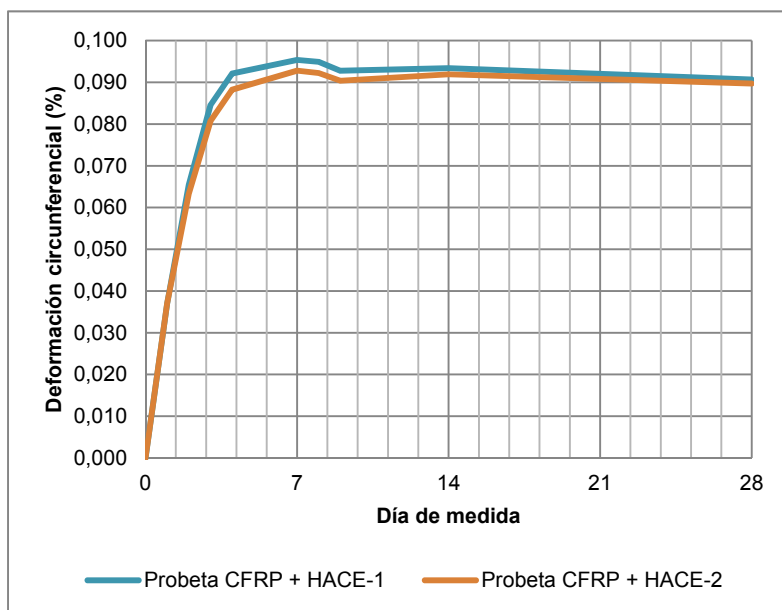
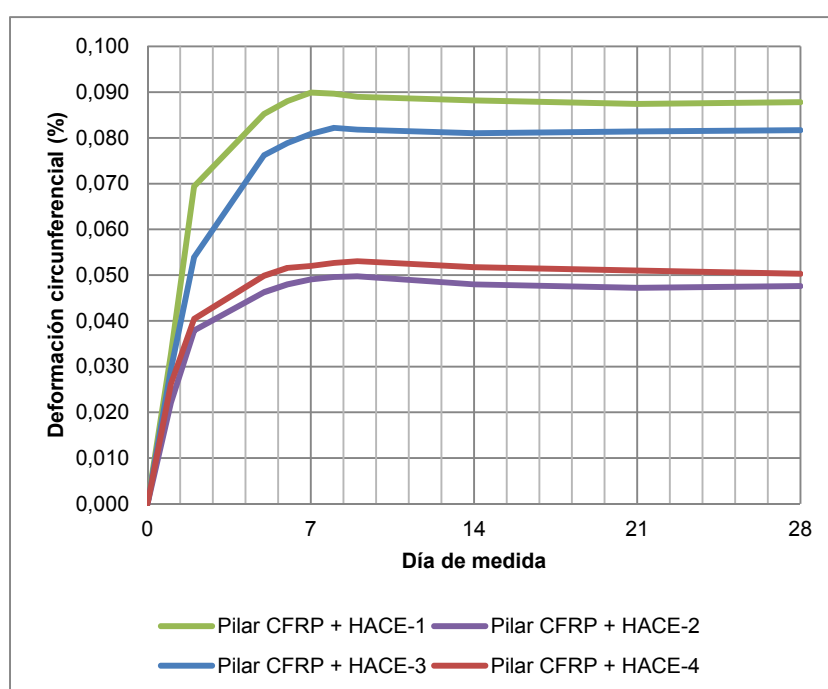


Figura 6.16 Expansión circunferencial promedio – Elementos tipo probeta 150 x 300 cm.

Tabla 6.4 Expansión circunferencial promedio – Elementos tipo pilar 900 x 240 mm.

Condiciones curado	Día	Día	Día	Día	Día	Día	Día	Día	Día	Día	Día
	0	1	2	5	6	7	8	9	14	21	28
Pilar CFRP + HACE-1	0,000	0,033	0,069	0,085	0,088	0,090	0,090	0,089	0,088	0,087	0,088
Pilar CFRP + HACE-2	0,000	0,022	0,038	0,046	0,048	0,049	0,050	0,050	0,048	0,047	0,048
Pilar CFRP + HACE-3	0,000	0,029	0,054	0,076	0,079	0,081	0,082	0,082	0,081	0,081	0,082
Pilar CFRP + HACE-4	0,000	0,026	0,040	0,050	0,052	0,052	0,053	0,053	0,052	0,051	0,050
Pilares 240x900 - Promedio	0,0000	0,0276	0,0504	0,0644	0,0666	0,0680	0,0685	0,0684	0,0672	0,0668	0,0668

**Figura 6.17 Expansión circunferencial promedio – Elementos tipo pilar 900 x 240 mm.**

6.5.2 Determinación de la contribución mecánica en elementos cilíndricos de hormigón tipo probeta y tipo pilar armado

Analizada la expansión en encamisados de fibra de carbono, en este apartado se reflejan los resultados de la contribución mecánica de los dos sistemas de refuerzo propuestos respecto del hormigón de referencia sin reforzar.

Tabla 6.5 Resultados de resistencia a compresión, módulo de elasticidad y deformación determinados sobre probetas de dimensiones 150 x 300 mm con diferentes configuraciones de refuerzo.

Tipología del refuerzo	Sin Refuerzo		Refuerzo CFRP directo		Refuerzo CFRP + HACE-15%	
	SR-1	SR-2	CFRP-1	CFRP-2	CFRPHE-1	CFRPHE-2
Referencia probetas						
Edad de ensayo (días)	28	28	28	28	28	28
Morfología	Cilíndrica	Cilíndrica	Cilíndrica	Cilíndrica	Cilíndrica	Cilíndrica
Dimensiones (mm)	150 x 300	150 x 300	150 x 300	150 x 300	150 x 300	150 x 300
Carga Rotura (kN)						
	430,0	393,5	1163,6	1086,5	1288,8	1079,4
Resistencia (Mpa)						
	24,3	22,3	65,8	61,5	72,9	61,1
Resistencia Promedio (Mpa)						
	23,3		63,7		67,0	
Coefficiente de variación (%)						
	6,3%		4,8%		12,5%	
Recorrido (%)						
	8,9%		6,9%		17,7%	
Incremento de la resistencia a compresión(%)						
	0,0%		173,2%		187,6%	
Módulo de Elasticidad (2-10 MPa) (Gpa)						
	30,6	28,0	33,1	28,9	225,8	211,1
Módulo de Elasticidad promedio (Gpa)						
	29,3		31,0		218,4	
Coefficiente de Poisson (2-10 MPa)						
	0,18	0,19	0,24	0,18	0,44	0,50
Coefficiente de Poisson (2-10 MPa) - promedio						
	0,18		0,21		0,47	
Incremento de la rigidez (%)						
	0,0%		5,8%		646,1%	
Deformación longitudinal (x10-6)						
	-1333,4	-1154,0	-16765,4	-11313,4	-2619,9	-1634,7
Deformación circunferencial (x10-6)						
	387,7	183,0	12238,2	9125,6	6141,9	5294,5

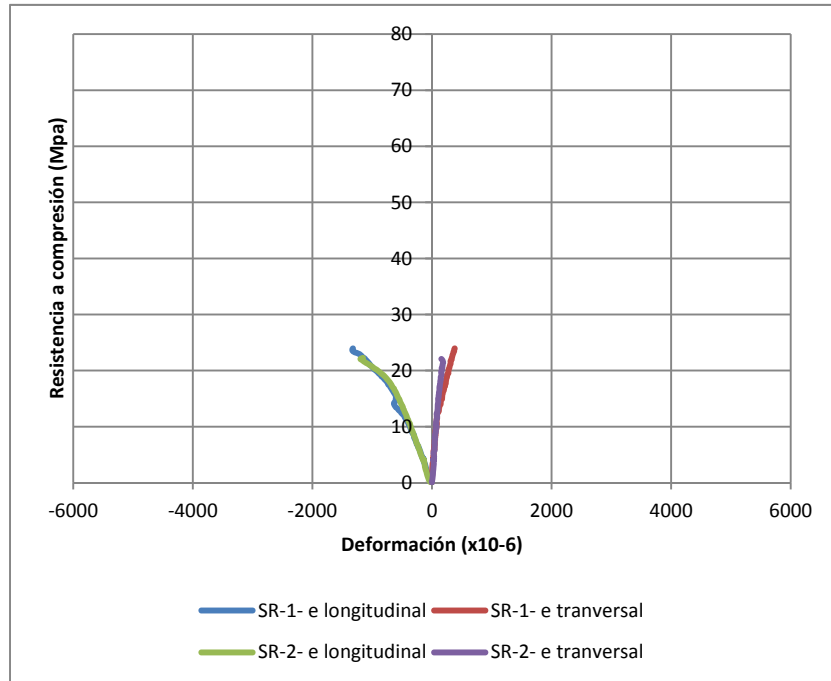


Figura 6.18 Comparativa deformación transversal/longitudinal en probetas sin refuerzo.

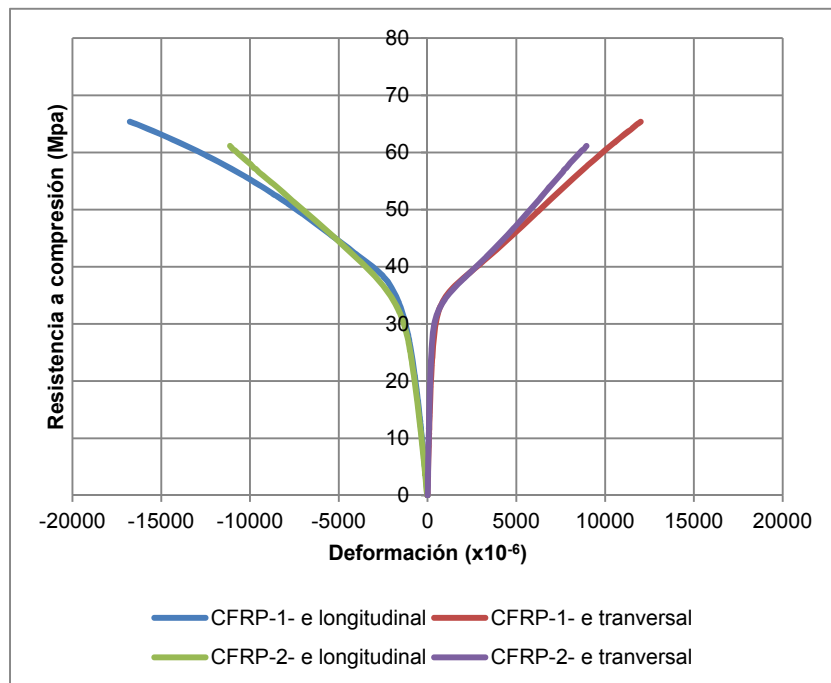


Figura 6.19 Comparativa deformación transversal/longitudinal en probetas con refuerzo directo CFRP.

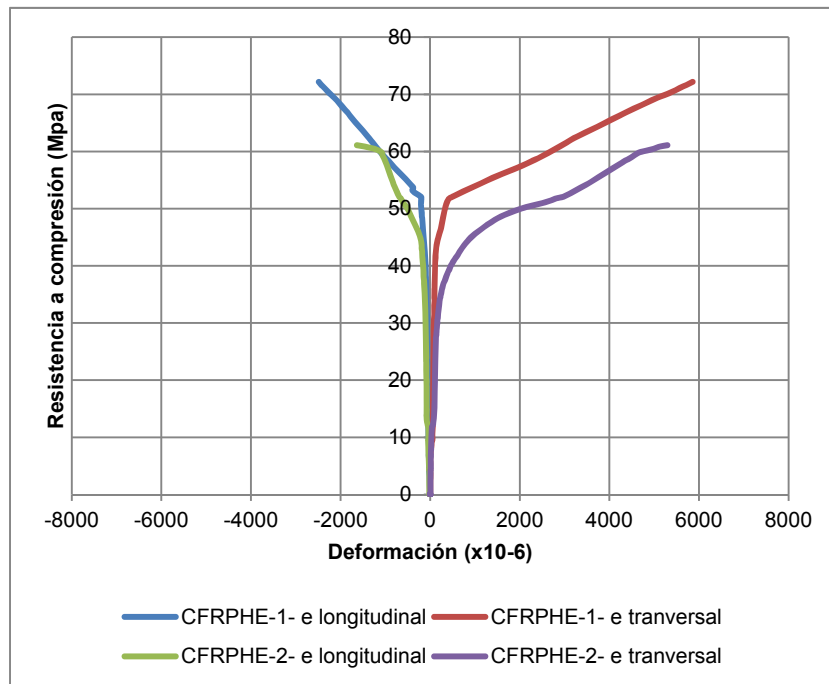


Figura 6.20 Comparativa deformación transversal/longitudinal en probetas con refuerzo CFRP + HACE-15%.

Tabla 6.6 Resultados de resistencia a compresión, módulo de elasticidad y deformación determinados sobre pilares armados de dimensiones 240 x 900 mm con diferentes configuraciones de refuerzo.

Tipología del refuerzo	Sin refuerzo		Refuerzo CFRP directo	Refuerzo CFRP directo (doble Cabeza y Base)	Refuerzo CFRP + MHACE-15%		Refuerzo CFRP (doble Cabeza y Base) + MHACE-15%	
Referencia Probeta	SR-1	SR-2	CFRP-1	CFRP-2	CFRPHE-1	CFRPHE-2	CFRPHE-3	CFRPHE-4
Edad de ensayo (días)	28	28	28	28	28	28	28	28
Morfología	Cilíndrica	Cilíndrica	Cilíndrica	Cilíndrica	Cilíndrica	Cilíndrica	Cilíndrica	Cilíndrica
Dimensiones (mm)	240 x 900	240 x 900	240 x 900	240 x 900	240 x 900	240 x 900	240 x 900	240 x 900
Carga Rotura (kN)	1033,1	1060,8	1672,8	2537,7	2695,8	2841,0	2653,3	2957,2
Resistencia (Mpa)	22,8	23,4	37,0	56,1	59,6	62,8	58,7	65,4
Resistencia Promedio (Mpa)	23,1				61,2		62,0	
Coefficiente de variación (%)	1,9%				3,7%		7,7%	
Recorrido (%)	2,6%				5,2%		10,8%	
Incremento de la resistencia a compresión	0,0%		59,8%	142,4%	164,4%		167,9%	
Módulo de Elasticidad (2-10 MPa) (Gpa)	26,8	28,9	27,4	31,0	57,0	55,9	68,3	60,3
Módulo de Elasticidad promedio (Gpa)	27,8				56,5		64,3	
Coefficiente de Poisson (2-10 MPa)	0,16	0,18	0,25	0,25	0,13	0,12	0,28	0,25
Coefficiente de Poisson (2-10 MPa) - promedio	0,17				0,13		0,27	
Incremento de la rigidez (%)	0,0%		-1,3%	11,5%	103,1%		131,3%	
Incremento de rigidez por doble refuerzo	-			1,13			1,14	
Deformación longitudinal (x10-6)	-1681,9	-1937,2	-5946,7	-9225,5	-2041,3	-2983,0	-2554,0	-4019,9
Deformación circunferencial (x10-6)	446,2	496,7	3265,0	9507,0	1855,0	3186,1	2347,9	3096,2

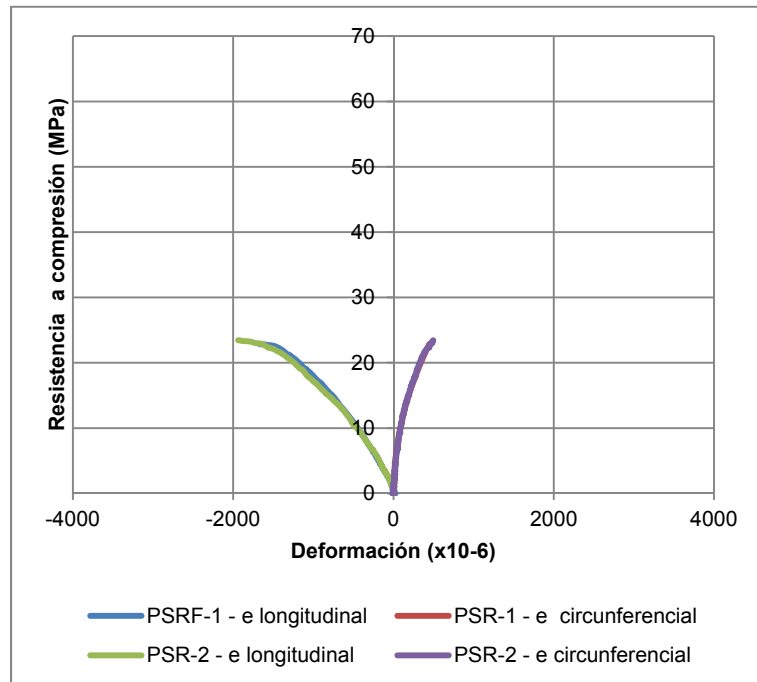


Figura 6.21 Comparativa deformación transversal/longitudinal en pilares sin refuerzo.

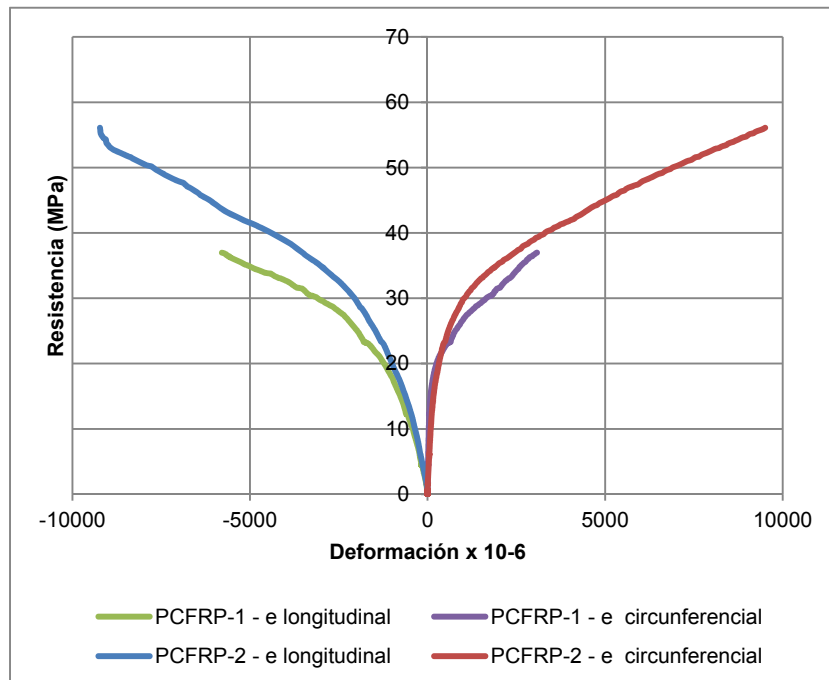


Figura 6.22 Comparativa deformación transversal/longitudinal en pilares con refuerzo directo CFRP
**pilar refuerzo simple vs refuerzo en doble.

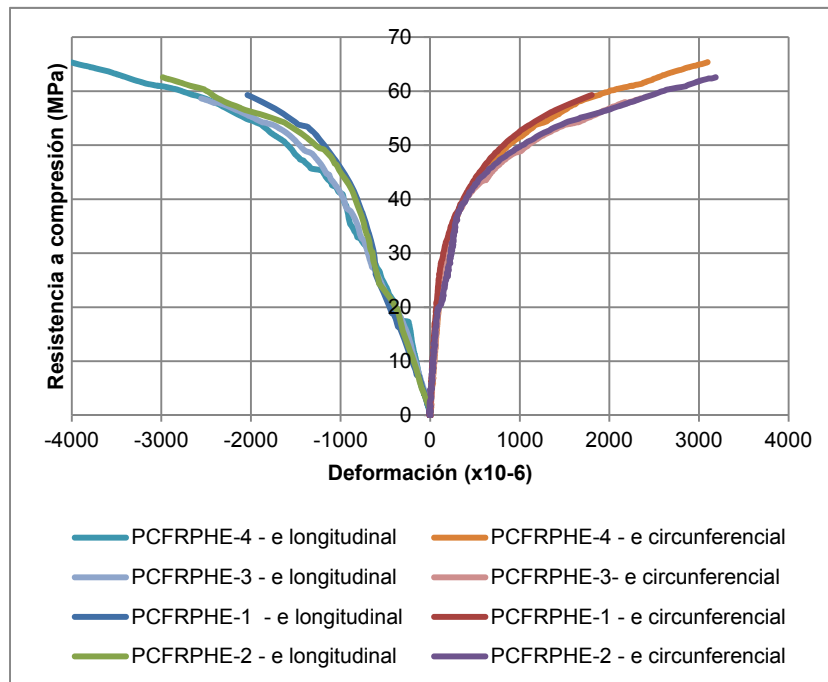


Figura 6.23 Comparativa deformación transversal/longitudinal en pilares con refuerzo CFRP + HACE-15%.

6.5.3 Análisis de resultados

Conforme a los resultados expuestos en los dos apartados anteriores se analizan las curvas de expansión determinadas sobre elementos de hormigón tipo probeta y pilar reforzado. Así mismo se analiza el comportamiento mecánico que confiere el HACE-15% de relleno diseñado y el refuerzo por confinamiento mediante camisas prefabricadas de CFRP comparado con el sistema tradicional de refuerzo por aplicación directa del refuerzo de CFRP denominado Wrapping.

6.5.3.1 Grado de expansión en elementos cilíndricos de hormigón tipo probeta y tipo pilar armado

Los resultados permiten comprobar que:

El régimen de expansión, a nivel cualitativo, que induce el HACE de relleno sobre el encamisado exterior de CFRP es muy similar en todos los elementos estudiados, produciéndose la mayor parte del desarrollo de la expansión durante los 7 primeros días tras la puesta en obra.

En elementos tipo probeta sometidos a una condición de curado similar a la referida en capítulos anteriores como ambiente de curado A2 (temperatura= $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y H.R.= $50 \pm 5\%$), el régimen de expansión que induce el HACE-15% de relleno sobre el encamisado exterior prefabricado de CFRP es practicante idéntico en los dos elementos fabricados, presentando además, un desarrollo de la expansión muy similar al registrado, para igual dosificación de aditivo y ambiente de curado, en el dispositivo de ensayo de doble anillo con CFRP exterior (Figura 6.24).

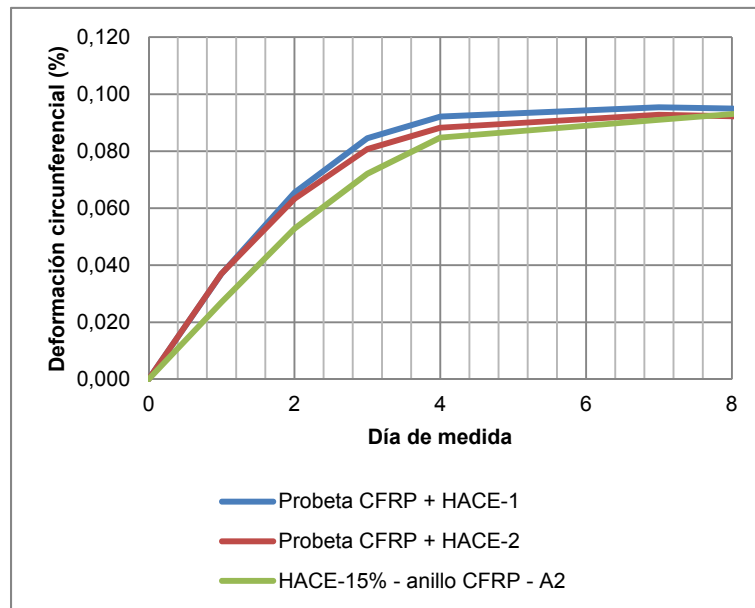


Figura 6.24 Expansión circunferencial - Comparativa régimen de expansión inducido por HACE-15% en encamisado CFRP de probetas y dispositivo de doble anillo.

El grado de expansión representado por el valor máximo de expansión que induce el HACE-15% de relleno en el encamisado de refuerzo de CFRP en los elementos tipo probeta (0,094% de promedio) se corresponde con el determinado sobre el dispositivo de ensayo propuesto de doble anillo (0,093%) curado en condiciones similares (condiciones de laboratorio o de ambiente A2 como se denomina en capítulos anteriores).

En elementos tipo pilar cilíndrico de hormigón, se observa que si bien dos de los pilares, PCFRPHE-1 y PCFRPHE-3, presentan curvas con un régimen de expansión similar al descrito anteriormente y un valor máximo promedio de expansión, 0,086%, muy próximo al determinado sobre elementos tipo probeta y el dispositivo de doble anillo, los otros dos, PCFRPHE-2 y PCFRPHE-4, presentan un valor máximo de expansión promedio de 0,051%, lo que supone una expansión del 59% respecto de la registrada en el primer par de pilares (Figura 6.25).

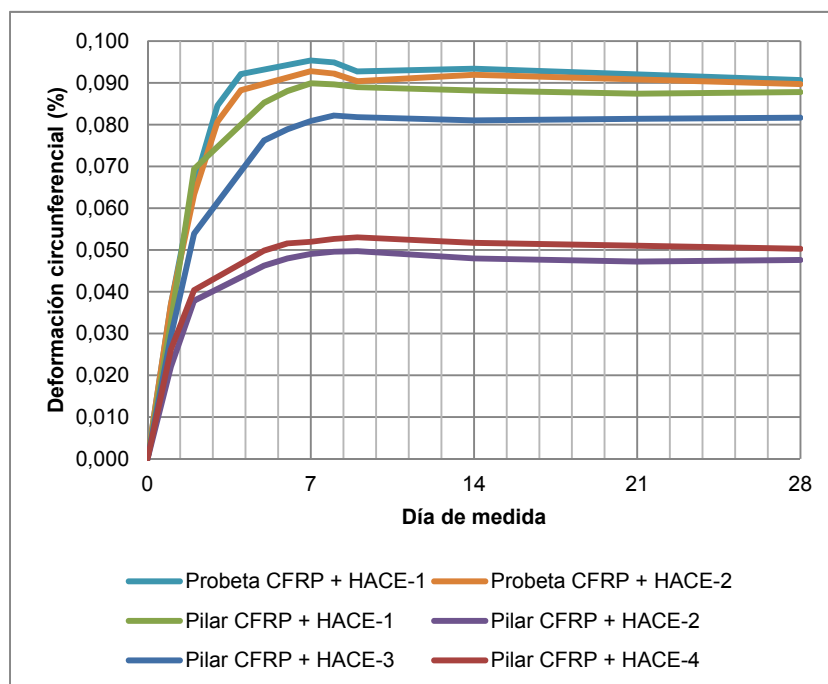


Figura 6.25 Expansión circunferencial - Comparativa valores medios de elementos tipo probeta y pilar.

Dado que, el HACE-15% empleado para rellenar el espacio comprendido entre camisa prefabricada y elemento a reforzar proviene de la misma amasada (igual proporción de componentes) y que las condiciones de curado son idénticas en todos los elementos objeto de estudio, la razón de esta variación del valor máximo de expansión y del desarrollo de la misma debe buscarse en algún factor que haya podido afectar a la hidratación del aditivo expansivo.

Cabe recordar que tras las operaciones de humectación de los elementos a reforzar tipo pilar y previo al hormigonado del hueco entre camisa y pilar se detecta sobre la superficie de los pilares PCFRPHE-2 y PCFRPHE-4 la presencia de zonas secas (Apartado 6.4.2, Figura 6.15).

Dado que la superficie del hormigón es porosa y teniendo en cuenta que los pilares PCFRPHE-2 y PCFRPHE-4 son los que presentan un menor valor de expansión, se podría plantear la posibilidad de que estas zonas superficiales secas pudieran haber contribuido a la pérdida parcial del agua de composición de la masa del HACE de relleno por absorción a través de la superficie del hormigón "seco" constituyente de los pilares objeto de refuerzo.

Esta situación, a igual dosificación de componentes y condiciones de curado, explicaría un menor desarrollo de la expansión ya que, al haber una menor cantidad de agua disponible para llevar a cabo la hidratación del aditivo expansivo DENKA CSA 20 se limitaría la posterior formación del compuesto expansivo Etringita y por tanto el desarrollo de la propia expansión.

Está justificado en este documento, Capítulos 4 y 5, que el agua disponible, tanto de composición como de aporte externo, influye en el desarrollo y valor máximo de expansión. El supuesto de desecación parcial del HACE de relleno por absorción de parte del agua de composición por la

6 DETERMINACIÓN DEL GRADO DE EXPANSIÓN Y CONTRIBUCION MECÁNICA DEL HACE DISEÑADO SOBRE ELEMENTOS TIPO PROBETA Y TIPO PILAR CILÍNDRICO DE HORMIGÓN ARMADO

superficie seca del elemento a reforzar se podría asemejar a la situación simulada en el apartado 5.4.1 donde se compara el desarrollo de la expansión en ambientes A2 y A3 con la diferencia de que mientras en los anillos sometidos a ambiente A3 la desecación de la masa de hormigón se produce por factores externos debido a la evaporación del agua al ambiente, en el caso de los pilares, se produce hacia el interior por absorción de ese agua de composición a través de la superficie seca del hormigón del pilar a reforzar. Comparativamente, en el caso de los anillos donde la masa de hormigón tiene una superficie expuesta mayor la expansión en ambiente A3 (seco) es de un 47 % de la registrada en A2, mientras que en el caso de los pilares es de un 59% respecto a la otra serie de pilares y de un 54% respecto de la probetas reforzadas en las cuales se considera que no ha habido pérdida de agua significativa de ningún tipo.

Aun así la expansión desarrollada de valor promedio 0,051 se considera satisfactoria para los propósitos de este estudio.

6.5.3.2 Contribución mecánica en elementos cilíndricos de hormigón tipo probeta y tipo pilar armado

Comportamiento general

El refuerzo directo o indirecto (solución CFRP más HACE de relleno) aumenta la resistencia a compresión del hormigón de los elementos sin reforzar. El incremento de la capacidad resistente en elementos tipo probeta es muy similar en las dos condiciones de refuerzo impuestas, siendo un incremento de un 173% con el refuerzo directo y de un 187% con el refuerzo indirecto (Figura 6.26). Sin embargo, en elementos tipo pilar, debido probablemente al efecto derivado del pandeo o buckling de la armadura interior, que induce una concentración de tensiones en la cabeza del pilar, las soluciones propuestas de refuerzo sí que registran entre ellas diferencias en lo que respecta al valor de resistencia a compresión alcanzado. Para elementos reforzados con una sola capa de CFRP el refuerzo directo presenta una mejora de resistencia a compresión del 56% mientras que con refuerzo indirecto es de 164%. Sin embargo, en elementos reforzados con doble capa en cabeza y base esta diferencia se reduce registrándose incrementos del valor de resistencia muy similares a los determinadas sobre elementos tipo probeta. De tal forma que con refuerzo directo de doble capa se obtiene una mejora del 142% y con el refuerzo indirecto del 168% (Figura 6.27).

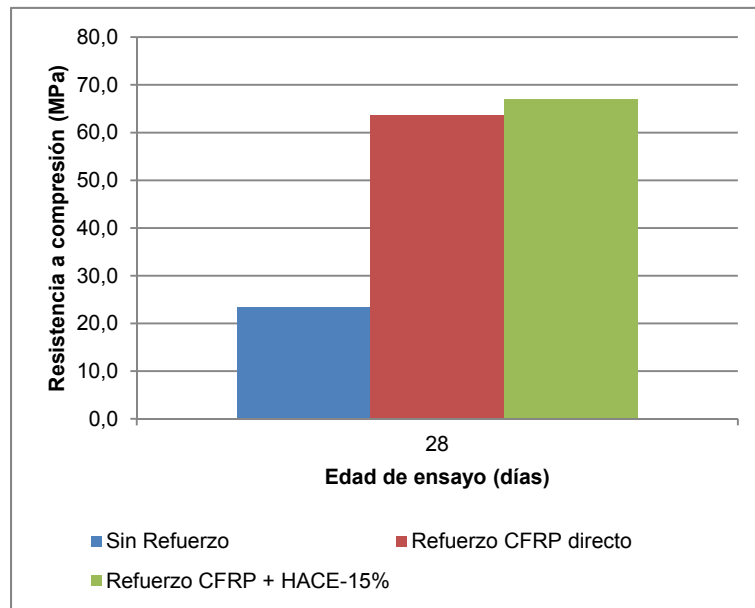


Figura 6.26 Resistencia a compresión en probetas – Comparativa de la contribución resistente de las diferentes tipologías de refuerzo.

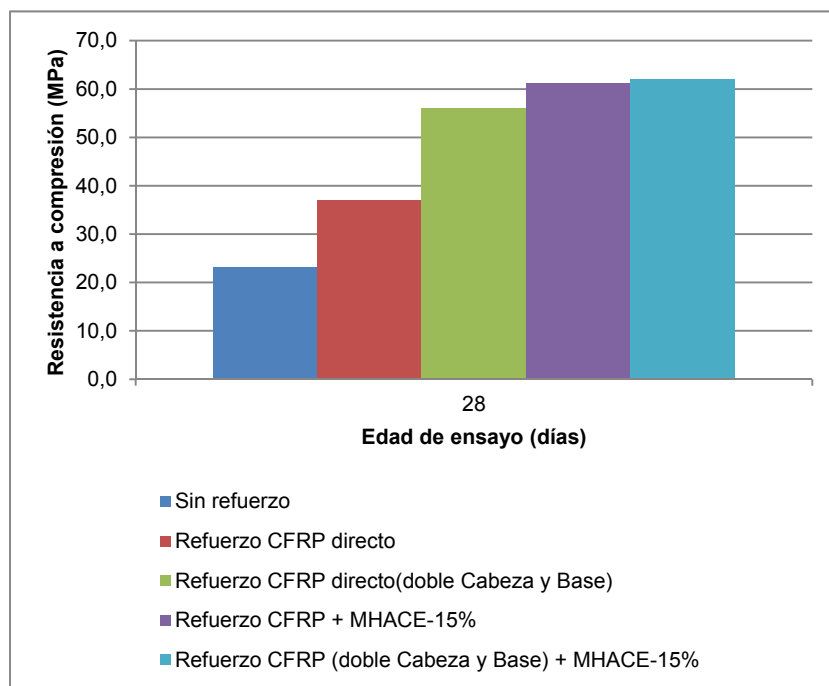


Figura 6.27 Resistencia a compresión en pilares – Comparativa de la contribución resistente de las diferentes tipologías de refuerzo.

A partir de los valores correspondientes a los incrementos de resistencia expuestos se puede deducir que si bien en sistemas de refuerzo directo una capa adicional de refuerzo contribuye a mejorar ostensiblemente el comportamiento resistente del elemento reforzado, en el caso de la solución de refuerzo propuesta de encamisado exterior más HACE de relleno el doble refuerzo no confiere a los elementos reforzados unas capacidades mecánicas adicionales a destacar a las observadas con el refuerzo simple ya que los valores de resistencia son muy similares y prácticamente independientes a las capas dispuestas de refuerzo.

Respecto al valor del módulo de elasticidad estático en compresión determinado en el intervalo 2-10 MPa (rango de tensiones que garantiza un comportamiento elástico del hormigón de partida) de elementos sin refuerzo se tiene que, el incremento de rigidez con refuerzo directo en elementos tipo probeta es de apenas un 5%, mientras que en elementos tipo pilar o no existe o es de un 10%, si se considera el valor de módulo de elementos con refuerzo doble en cabeza y base. Estos porcentajes de variación, no son significativos ni se pueden considerar efecto del confinamiento del refuerzo directo sino que más bien podrían deberse a la desviación normal en la determinación de esta propiedad en los hormigones y no a la acción de refuerzo del CFRP (Figura 6.28 y Figura 6.29).

Sin embargo, al aplicar la solución de refuerzo de encamisados prefabricados y HACE de relleno, se observa, de forma general, un aumento de la rigidez en cualquiera de los elementos a los que se aplica esta solución de refuerzo, aunque cuantitativamente, esta contribución difiere según se trate de elementos tipo probeta o tipo pilar. Respecto del valor registrado en elementos con refuerzo directo de CFRP y sin él, los elementos tipo probeta presentan un valor promedio de módulo de elasticidad estático en compresión de un 646% (Figura 6.28), mientras que los elementos tipo pilar (Figura 6.29) registran un valor promedio de entre 103% y 131% (en elementos doblemente reforzados en corona y base).

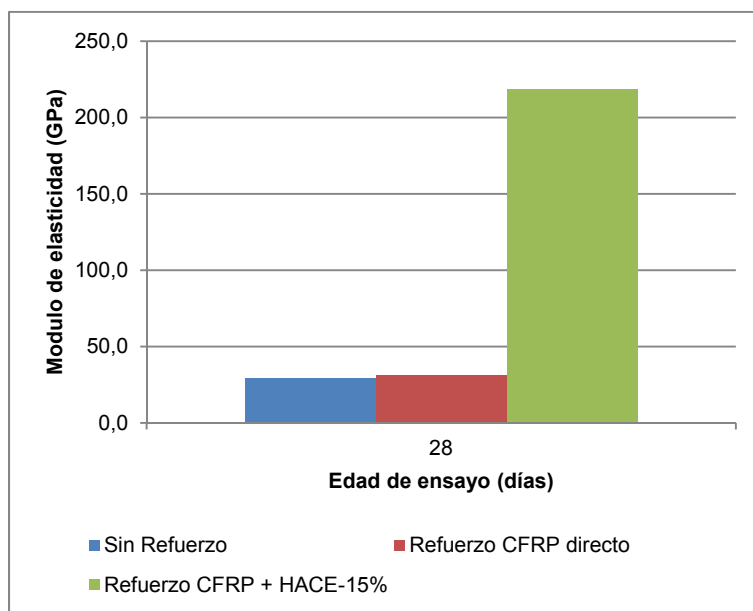


Figura 6.28 Módulo de elasticidad estático en compresión – Comparativa de las diferentes tipologías de refuerzo en elementos tipo probeta.

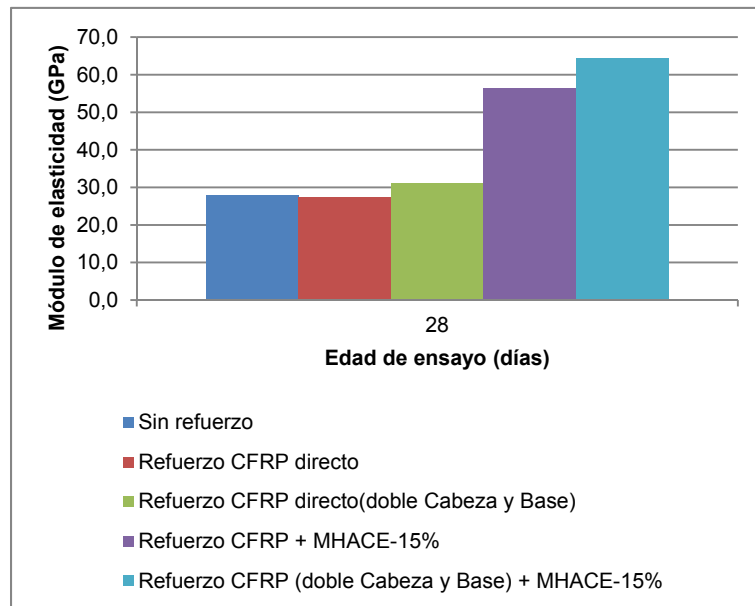


Figura 6.29 Módulo de elasticidad estático en compresión – Comparativa de las diferentes tipologías de refuerzo en elementos tipo pilar.

La diferencia que presenta el sistema de refuerzo de camisa exterior prefabricada más HACE de relleno en la contribución a la rigidez del conjunto, al comparar elementos tipo pilar y probeta, podría deberse a varios factores como son: la menor expansión promedio del HACE de relleno en elementos tipo pilar con lo que la presión de confinamiento inicial sería menor, la relación de aspecto de los elementos objeto de ensayo, las probetas presentan una relación de aspecto de 2 mientras que los pilares esta relación es de 3,8 y por último, la concentración de tensiones en los extremos del elemento tipo pilar debido probablemente al pandeo o "buckling" de la armadura interior de estos. Este último, el pandeo localizado en cabeza, se considera como el principal factor que influye en el menor desarrollo de la contribución del encamisado exterior de CFRP al sistema de refuerzo ya que induce una concentración de tensiones localizada en la cabeza del pilar que minimiza el área efectiva total confinada y disminuye la presión de confinamiento total.

La deformación nominal de rotura de una camisa de CFRP suele situarse entre el 1,0‰ y el 1,5‰. Sin embargo, en nuestro caso, la deformación transversal de rotura que se registra en las camisas de CFRP en los ensayos realizados sobre pilares está entre el 0,2‰ y el 0,3‰. Esta diferencia se debe a que las bandas extensométricas destinadas a medir la deformación circunferencial se sitúan en la zona central del pilar, zona en la que la deformación de la camisa producida por la puesta en carga del pilar no es representativa, ya que, el fallo de rotura se produce en la cabeza del pilar por efecto del pandeo local de la armadura interna, siendo esta la zona donde se registra la mayor deformación de camisa. La Figura 6.36 muestra el fallo referido en cabeza de los pilares motivo de ensayo.

Respuesta tensión-deformación

La acción de confinamiento ejercida por el CFRP como refuerzo directo es de carácter pasivo, ya que el encamisado exterior no comienza a trabajar hasta que se produce un cierto grado de deformación circunferencial debido a la carga axial aplicada.

6 DETERMINACIÓN DEL GRADO DE EXPANSIÓN Y CONTRIBUCION MECÁNICA DEL HACE DISEÑADO SOBRE ELEMENTOS TIPO PROBETA Y TIPO PILAR CILÍNDRICO DE HORMIGÓN ARMADO

La no contribución mecánica inicial del refuerzo de CFRP al aplicarlo directamente sobre el elemento a reforzar se corrobora al estudiar la curva tensión-deformación, de carácter bilineal, de los elementos bajo carga. Esta curva presenta un tramo inicial donde la respuesta es esencialmente lineal gobernada por la rigidez del hormigón sin confinar, lo que indica que la acción de confinamiento aún no se ha producido debido a que las deformaciones laterales en el hormigón son muy pequeñas (Figura 6.30 y Figura 6.31). En este tramo inicial las curvas de elementos sin reforzar y reforzados de forma directa se solapan, lo que indica una rigidez similar (Figura 6.28 y Figura 6.29).

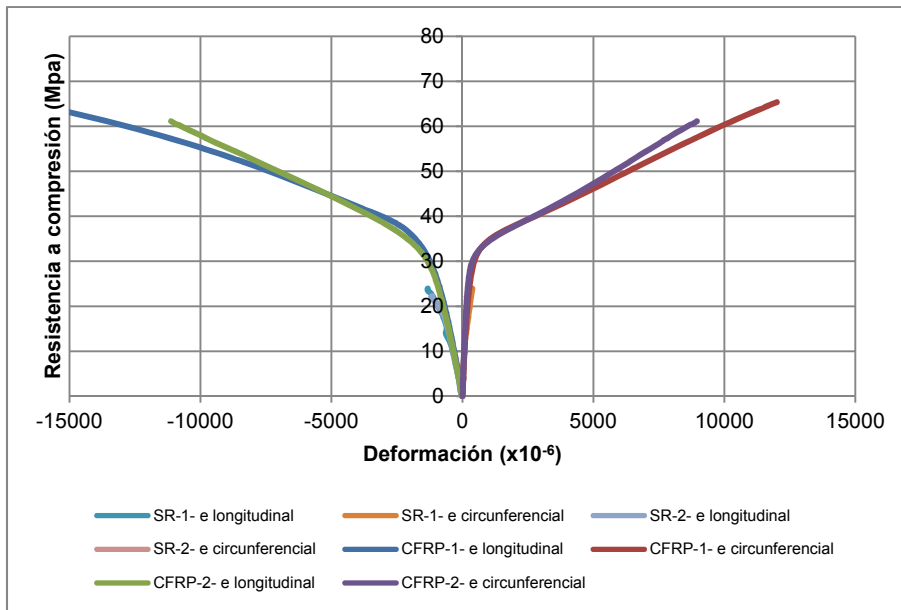


Figura 6.30 Curvas tensión-deformación de elementos tipo probeta (sin refuerzo y refuerzo directo de CFRP).

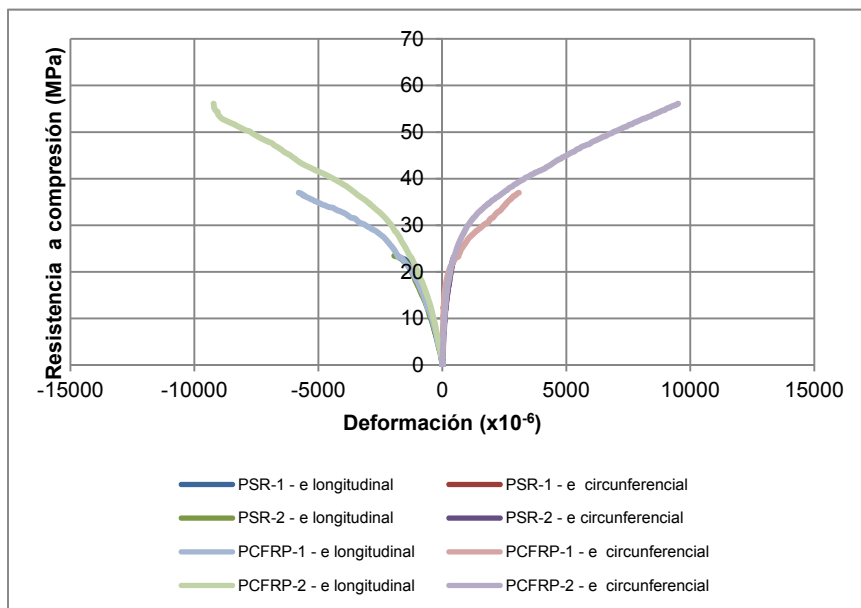


Figura 6.31 Curvas tensión-deformación de elementos tipo pilar (sin refuerzo y refuerzo directo de CFRP).

6 DETERMINACIÓN DEL GRADO DE EXPANSIÓN Y CONTRIBUCION MECÁNICA DEL HACE DISEÑADO SOBRE ELEMENTOS TIPO PROBETA Y TIPO PILAR CILÍNDRICO DE HORMIGÓN ARMADO

Pasado el tramo inicial, el efecto de refuerzo del encamisado CFRP comienza a actuar una vez que el hormigón ha alcanzado la resistencia del hormigón sin confinar o bien cuando las deformaciones transversales en el hormigón son de tal magnitud que activan la acción del encamisado de CFRP. En esta región, pequeños incrementos de carga producen mayores deformaciones laterales y en consecuencia una mayor presión de confinamiento.

La solución de refuerzo propuesta de confinamiento mediante encamisados exteriores prefabricados de CFRP y HACE-15% de relleno transforma un sistema de refuerzo que convencionalmente se considera pasivo en uno activo. Este cambio de tipología de refuerzo se debe a la acción expansiva del HACE de relleno que tracciona la camisa exterior de CFRP desde el instante inicial de puesta en obra (efecto de pretensado) haciendo que el conjunto soporte-encamisado trabaje para las solicitaciones actuantes en el momento de refuerzo. El efecto de pretensado queda patente en las curvas tensión-deformación de la solución de refuerzo propuesta, las cuales presentan una pendiente inicial más pronunciada que las determinadas en elementos no reforzados o con refuerzo directo de CFRP significando esto una mayor capacidad de carga para igual deformación del encamisado exterior (Figura 6.32 y Figura 6.33).

En todos los elementos estudiados la resistencia a compresión y la deformación última se alcanzan en el mismo instante.

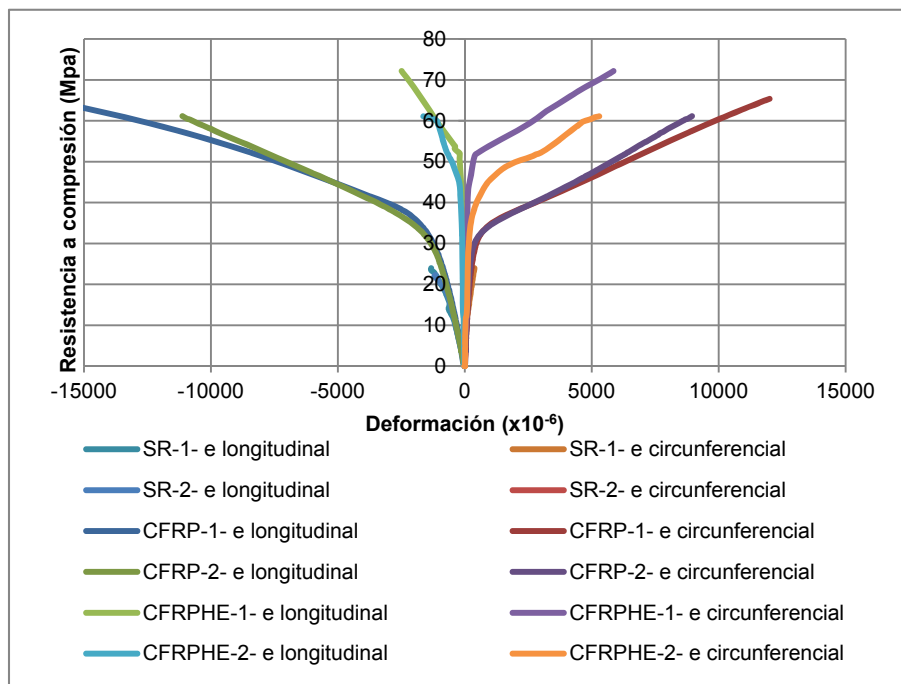


Figura 6.32 Curvas tensión-deformación de elementos tipo probeta. Cambio de pendiente inicial que identifica el incremento de rigidez que aporta la solución de refuerzo de CFRP y HACE de relleno.

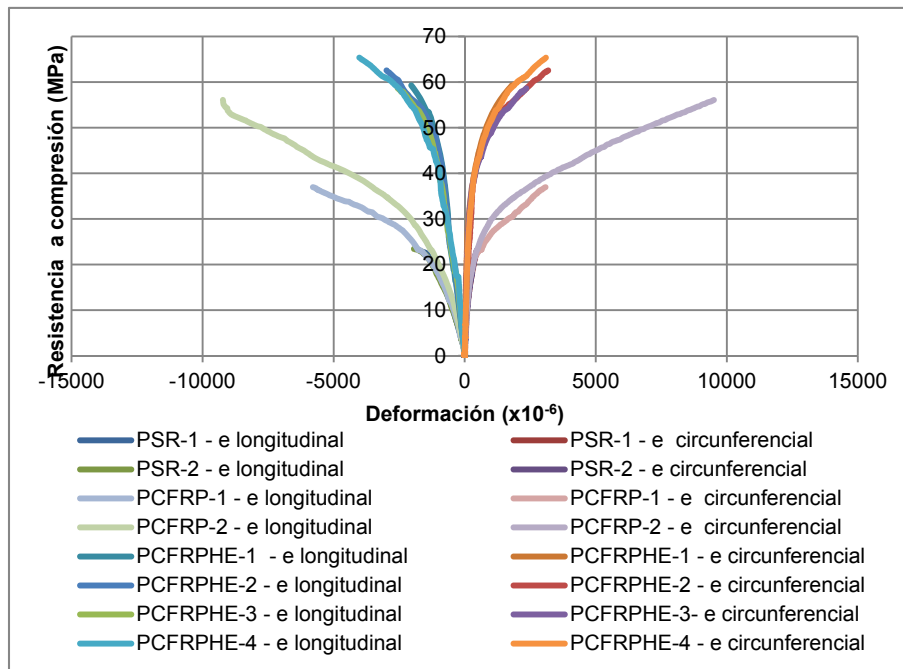


Figura 6.33 Curvas tensión-deformación de elementos tipo pilar. Cambio de pendiente inicial que identifica el incremento de rigidez que aporta la solución de refuerzo de CFRP y HACE de relleno.

Por otro lado, en lo que respecta al efecto de pretensado inducido por la expansión inicial del HACE de relleno se observa que los pilares PCFRPHE-2 y PCFRPHE-4, en los que la deformación inicial del encamisado es menor, registran un valor de resistencia y una deformación de la camisa de CFRP bajo carga superior a aquellos en los que la expansión de la camisa es mayor como es el caso de los pilares PCFRPHE-1 y PCFRPHE-3 (Figura 6.34).

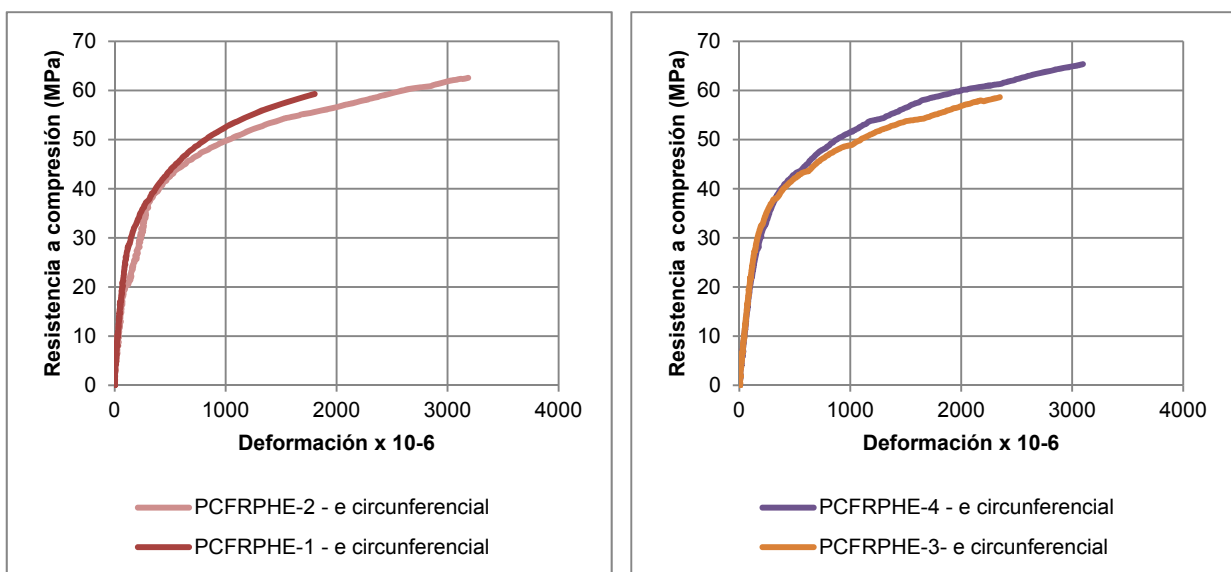


Figura 6.34 Curvas tensión-deformación circunferencial de elementos tipo pilar con refuerzo simple (izquierda) y refuerzo doble en cabeza y base (derecha).

Este comportamiento resistente y en deformación no debe achacarse a un efecto pernicioso derivado de la expansión inicial del HACE de relleno si no que, más bien, se debe a la acción de la presión de confinamiento de partida. Hay que tener en cuenta que una mayor deformación de la camisa de CFRP previa a la puesta en carga del elemento reforzado incrementa la presión de confinamiento y la capacidad de carga de partida, por lo que, ante la misma capacidad tensional y de deformación de la solución de refuerzo propuesta, menor será el rango de deformaciones y resistencias a registrar al ensayar a compresión los elementos con mayor expansión inicial del encamisado de CFRP.

Modos de fallo

La Figura 6.35 y la Figura 6.36 ilustran los modos de fallo de los elementos cilíndricos de hormigón ensayados, tanto sin refuerzo como con las dos alternativas de confinamiento contempladas:

- Refuerzo directo de CFRP.
- Encamisados prefabricados de CFRP y HACE de relleno.

Todos los elementos ensayados con refuerzo de CFRP, directo o indirecto, fallan por la rotura de la camisa de CFRP debido a la tensión circunferencial. El fallo se produce de una forma súbita y explosiva, precedido de una serie de sonidos antes de romperse.

La zona en la que se localiza el fallo varía según se trate de elementos tipo probeta o pilar, en función de la zona de concentración de tensiones y disposición o tipología de refuerzo. En elementos tipo probeta donde el efecto del confinamiento tanto activo como pasivo es más efectivo, según se ha podido corroborar en los dos apartados anteriores, la concentración de tensiones y fallo por rotura se localiza en el tercio central de la altura de la probeta, mientras que en elementos tipo pilar, esta zona de fallo se desplaza hacia el cuarto superior de los pilares debido a que el pandeo local de la armadura interna genera una concentración de tensiones en la cabeza del pilar disminuyendo a priori la efectividad del confinamiento proporcionado por el encamisado simple de CFRP. Al detectarse este problema de concentraciones de tensiones, se dispone, posteriormente al hormigonado y tras analizar las roturas de otros elementos, de un doble refuerzo en cabeza y base para intentar paliar el efecto de pandeo local de la armadura interior.

Este doble refuerzo se muestra efectivo desde el punto de vista del confinamiento en elementos con refuerzo directo de CFRP, como lo demuestra el hecho de que la zona de rotura se desplaza de la cabeza al centro del pilar (Figura 6.36 (3)) produciéndose el fallo en el tercio central, sin embargo, en elementos reforzados con encamisados prefabricados de CFRP y HACE de relleno la acción de una capa adicional de refuerzo en cabeza y base no mejora significativamente la capacidad última del pilar respecto a la determinada sobre la solución inicial, ya que, la zona de localización de tensiones y fallo se sigue ubicando en la cabeza del pilar (Figura 6.36 (4 y 5)).

En todos los elementos ensayados tanto con refuerzo directo como indirecto no se localiza fallo en el solape lo que confirma una adecuada transferencia de tensiones sobre el mismo.

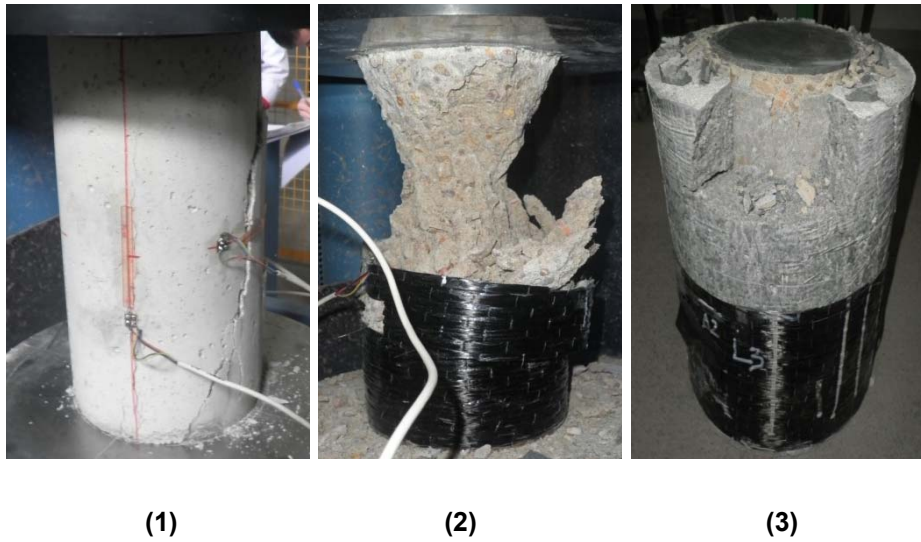


Figura 6.35 Modos de fallo registrados en probetas. Hormigón sin refuerzo (1), con refuerzo simple directo de CFRP (2), con refuerzo simple prefabricado CFRP + HACE-15 (3).

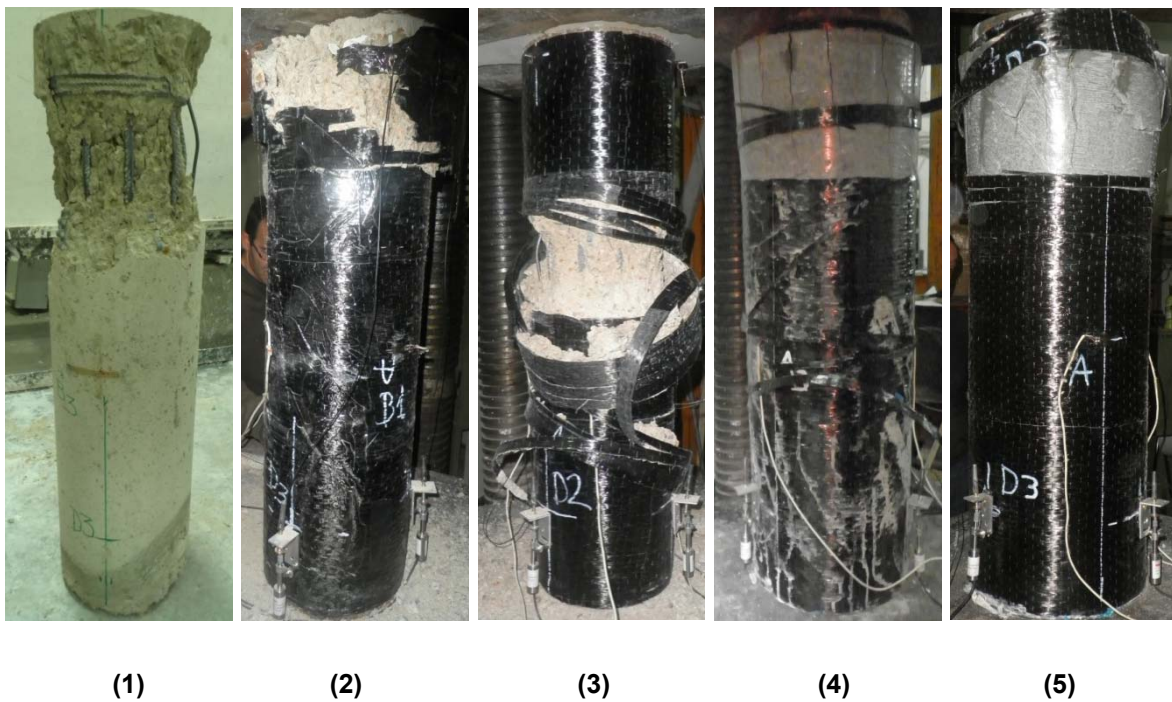


Figura 6.36 Modos de fallo registrados en pilares. Hormigón sin refuerzo (1), con refuerzo simple directo de CFRP (2), con refuerzo directo de CFRP doble en cabeza y base (3), con refuerzo simple prefabricado CFRP + HACE-15 (4) y con refuerzo prefabricado CFRP + HACE-15% + refuerzo doble en cabeza y base del pilar (5).

6.6 Conclusiones capítulo 6

Las conclusiones que se extraen de este capítulo son las que siguen:

- La dosis empleada del 15% de aditivo expansivo DENKA CSA 20 induce un grado de expansión suficiente en el HACE de relleno capaz de vencer la restricción impuesta por el encamisado exterior prefabricado de CFRP de forma permanente en el tiempo en las condiciones de curado de ambiente A2 (donde se evita la pérdida de agua), produciendo esto un efecto de pretensado en la camisa (trabaja a tracción) que confiere una presión de confinamiento inicial (refuerzo activo) sobre el elemento objeto de refuerzo tipo probeta o tipo pilar armado.
- Los valores similares de expansión registrados sobre tres alturas (centro y extremos) del encamisado de refuerzo de CFRP dispuesto sobre elementos tipo probeta demuestran que la condición de autocompactante garantiza el correcto llenado del espacio entre la camisa exterior y elemento reforzado, mientras que la condición de expansivo que le confiere la dosis del 15% asegura una correcta transmisión de tensiones y la adherencia incluso en los extremos de la camisa prefabricada de CFRP.
- El grado de expansión desarrollado en el encamisado exterior de CFRP en elementos tipo probeta y pilar armado para un mismo ambiente de curado no depende del tipo de elemento sino del agua disponible para llevar a cabo la hidratación del compuesto expansivo. La disponibilidad de agua y su influencia en el valor máximo de la expansión alcanzado es una constante que se repite a lo largo de toda la investigación.
- Las operaciones de acondicionamiento del soporte de hormigón a reforzar, previas a la aplicación de la solución de confinamiento propuesta, son fundamentales para evitar cualquier alteración de la mezcla de hormigón vertida como relleno y del comportamiento mecánico y de deformación esperado de la misma. Esta afirmación se fundamenta en lo observado en los elementos tipo pilar, donde el valor de expansión máximo alcanzado en dos de los cuatros pilares se ve limitado debido a un grado de humectación insuficiente de la superficie porosa del hormigón del soporte, lo que condiciona la disponibilidad de agua para llevar a cabo la hidratación del aditivo expansivo y por tanto limita la capacidad de expansión del HACE de relleno por la pérdida por absorción de parte del agua de composición a través de la superficie seca del soporte de hormigón.
- El régimen y valor máximo de expansión del HACE-15% de relleno, registrados sobre los encamisados de CFRP que se colocan en elementos tipo probeta y tipo pilar armado, son muy similares a los medidos en el dispositivo de ensayo de doble anillo referido en el Capítulo 5, salvo en el caso de dos elementos tipo pilar donde, siendo igual el régimen de expansión, el valor máximo de la misma difiere en un 50%. Esta diferencia se achaca a una preparación inadecuada del soporte que produce la alteración de la composición de partida de la mezcla de HACE-15% de relleno al absorber el hormigón del elemento parte del agua de composición de la mezcla de relleno.

6 DETERMINACIÓN DEL GRADO DE EXPANSIÓN Y CONTRIBUCION MECÁNICA DEL HACE DISEÑADO SOBRE ELEMENTOS TIPO PROBETA Y TIPO PILAR CILÍNDRICO DE HORMIGÓN ARMADO

Aun así, conforme a los resultados obtenidos, se puede establecer que el dispositivo de doble anillo propuesto en esta investigación como elemento de ensayo para laboratorio simula fielmente el comportamiento del sistema de refuerzo por confinamiento mediante encamisados exteriores de CFRP y HACE de relleno, permitiendo determinar de forma bastante aproximada el régimen y valor máximo de la expansión real del HACEs vertido en la solución final, siempre y cuando las condiciones de curado sean similares y las operaciones de acondicionamiento del soporte objeto de refuerzo sean las adecuadas.

- La solución de refuerzo propuesta aumenta la resistencia a compresión y rigidez de soporte inicial en todos los casos estudiados, permitiendo la contribución mecánica de la camisa exterior desde los instantes iniciales de puesta en obra.
- El refuerzo por confinamiento, directo o indirecto, de elementos cilíndricos de hormigón incrementa la resistencia a compresión y ductilidad respecto a los mismos elementos de hormigón sin reforzar.
- El pandeo local de la armadura, en elementos tipo pilar armado, reduce la efectividad del refuerzo y la contribución mecánica del encamisado exterior de CFRP en las soluciones de confinamiento estudiadas, ya que, dicho pandeo induce una concentración de tensiones en los extremos del pilar que limita el área efectiva confinada a esta zona y disminuye la presión de confinamiento total ejercida.

En sistemas de confinamiento directo, la ejecución de una capa adicional de CFRP en base y cabeza contribuye a mejorar ostensiblemente el comportamiento resistente del elemento reforzado, ya que este doble refuerzo restringe el pandeo local de la armadura en cabeza trasladando la zona de concentración de tensiones al tercio central del pilar, consiguiendo así un confinamiento más efectivo.

Sin embargo, en la solución de confinamiento indirecto propuesta (encamisado exterior más HACE de relleno) una capa adicional de refuerzo en los extremos del pilar no confiere a los elementos reforzados unas capacidades mecánicas adicionales a destacar a las ya observadas con el refuerzo simple, ya que, los valores de resistencia y rigidez registrados son muy similares y prácticamente independientes a las capas dispuestas de refuerzo. Esto puede deberse a que la capa adicional de refuerzo se aplica sobre el encamisado ya pretensado por efecto de la expansión del HACE de relleno.

- La acción de confinamiento ejercida por el CFRP como refuerzo directo es de carácter pasivo, ya que el encamisado exterior no comienza a trabajar hasta que se produce un cierto grado de deformación circunferencial debido a la carga axial aplicada.
-
-
-
-

- La solución de refuerzo propuesta de confinamiento mediante encamisados exteriores prefabricados de CFRP y HACE-15% de relleno transforma un sistema de refuerzo que convencionalmente se considera pasivo en uno activo. Este cambio de tipología de refuerzo se debe a la acción expansiva del HACE de relleno que tracciona la camisa exterior de CFRP desde el instante inicial de puesta en obra (efecto de pretensado) haciendo que el conjunto soporte-encamisado trabaje para las sollicitaciones actuantes en el momento de refuerzo. El efecto de pretensado queda patente en las curvas tensión-deformación de la solución de refuerzo propuesta, las cuales presentan una pendiente inicial más pronunciada que las determinadas en elementos no reforzados o con refuerzo directo de CFRP significando esto una mayor capacidad de carga para igual deformación del encamisado exterior.
- Una mayor deformación de la camisa de CFRP previa a la puesta en carga del elemento reforzado incrementa la presión de confinamiento y la capacidad de carga de partida, por lo que, ante la misma capacidad tensional y de deformación de la solución de refuerzo propuesta, menor será el rango de deformaciones y resistencias a registrar al ensayar a compresión los elementos con mayor expansión inicial del encamisado de CFRP.

7 CONCLUSIONES

Las conclusiones que se extraen de esta investigación se exponen a continuación. Para facilitar la comprensión de las mismas se relacionan dichas conclusiones con los objetivos planteados al inicio de la investigación.

- En relación al objetivo de identificación del mecanismo o compuesto que induce la expansión mediante técnicas de análisis microestructural se establece que:
 - El mecanismo que se identifica como responsable de la expansión corresponde a un tipo de Etringita amorfa integrada, de forma general, en matrices hidratadas del cemento. Este tipo de Etringita se detecta mediante microscopía electrónica de barrido y microanálisis EDS. La morfología de esta Etringita formada a partir del aditivo expansivo, al ser de carácter eminentemente amorfo, no debe permitir la correcta identificación y semicuantificación mediante la técnica de caracterización de DRX, ya que, esta técnica identifica fases cristalinas o semicristalinas.
 - La proporción de Etringita estimada sobre las mezclas HACE-10% y HACE-15% mediante la técnica de DRX es muy similar. Sin embargo, los resultados de expansión determinados sobre ambas mezclas tanto en régimen libre como en restringido difieren prácticamente en un orden de magnitud. Por ello, parece poco probable que la Etringita convencional de estructura cristalina, y por extensión el contenido estimado de ésta mediante DRX, sea el principal responsable de la expansión ocasionada. Lo que sí parece estar relacionado es el desarrollo de la expansión y el consumo del compuesto anhidro Ye'elemita, ya que, a medida que este anhidro se va agotando, la expansión va aumentando.
- Respecto de la caracterización de las propiedades reológicas y mecánicas básicas de los HACE diseñados empleando métodos de ensayo basados en normativa UNE-EN (europea) y ASTM (americana) y evaluación de la influencia de la adición de aditivo expansivo sobre las propiedades determinadas se concluye que:
 - La adición de aditivo expansivo DENKA CSA 20 en las proporciones del 10% y 15%, no modifica la condición de autocompactable del hormigón de referencia HACE-0%, aunque sí se observa un ligero aumento del escurrimiento, del tiempo de flujo y del contenido de aire, así como una pequeña disminución de la densidad a medida que aumenta la proporción adicionada de aditivo expansivo.
 - La incorporación de una dosis del 50% de aditivo expansivo no es viable, ya que si bien mantiene cierta estabilidad en el estado fresco, aunque con tendencia a la segregación, en el estado endurecido no permite evaluar las propiedades mecánicas básicas, puesto que la expansión que induce en el hormigón en régimen libre es de tal magnitud que produce la fisuración completa de las probetas destinadas a los ensayos de caracterización mecánica y de cambios de longitud.
 - La adición de aditivo expansivo modifica las condiciones mecánicas del hormigón de partida HACE-0%. En la condición de libre, una proporción del 10% de aditivo expansivo DENKA CSA 20 incrementa el valor de resistencia a compresión y flexión. Sin embargo, el aumentar esta dosis hasta el 15% se traduce en una

pérdida de características mecánicas en lo que se refiere a resistencia a compresión, flexión y módulo de elasticidad estático en compresión cuando dichas características se evalúan sobre probetas no sometidas a ninguna condición de restricción, permitiendo así, la expansión libre del hormigón. Esta disminución de propiedades mecánicas puede deberse a dos factores: por un lado, el incremento del porcentaje de aire que induce el aumento de la dosis de aditivo expansivo, como se puede ver en la caracterización del estado fresco de los HACE estudiados, y sobre todo, a la microfisuración generalizada detectada mediante SEM a la edad de 28 días, inducida por la magnitud de la expansión libre que experimentan los HACE a los que se adiciona la dosis del 15% de aditivo expansivo DENKA CSA 20 que impide que dichas fisuras se sellen con nuevos productos de hidratación.

- La dosis de aditivo expansivo influye en la microestructura de muestras que se encuentran en régimen libre, ya que, a mayor proporción adicionada, mayor expansión y, por tanto, mayor fisuración de la matriz cementicia. El grado de fisuración inducido por la expansión libre puede ser de tal magnitud que las microfisuras no lleguen a rellenarse completamente con nuevos productos de hidratación, tal y como ocurre en las muestras de HACE-15%, quedando una microfisuración permanente que condiciona las características mecánicas presentadas por los HACE con la dosis del 15%.

Hay que incidir en que esta fisuración generalizada se relaciona con el hecho de una expansión descontrolada en régimen libre, ya que se prevé que, si las muestras estuvieran en régimen restringido, estas microfisuras acabarían rellenándose con nuevos productos de hidratación al no haber otro lugar en el que desarrollarse, dando lugar a una microestructura más densa y compacta.

- La caracterización mecánica a la edad de 28 días de hormigones expansivos de retracción compensada, conforme a las recomendaciones de las guías de uso tipo ACI 223, se puede llevar a cabo tras curado mediante los métodos convencionales de: sumergido en agua o en atmosfera saturada (humedad relativa $\geq 95\%$), ya que, tras la expansión, el desarrollo de resistencias es similar al de los hormigones fabricados con cemento portland convencional. En esta investigación se corrobora este aspecto, puesto que la microfisuración producida por una expansión inicial moderada, en el caso del HACE-10%, parece corregirse por la formación de nuevos productos de hidratación en estas microfisuras durante el curado en atmosfera saturada, alcanzándose incluso resistencias a compresión y flexión superiores a las del hormigón de referencia.

Sin embargo, en el caso de hormigones expansivos pretensados químicamente esta caracterización mecánica está condicionada por el propio curado con aporte continuo de agua, ya que este aporte contribuye al desarrollo de la expansión, la cual, si no está confinada (caso de probetas cilíndricas de 150 x 300 mm destinadas al ensayo de resistencia a compresión) y expande libremente, induce una microfisuración tal que condiciona las características mecánicas del hormigón estudiado, como se puede ver en el caso del HACE-15%. Teniendo en cuenta que las soluciones constructivas que incorporan hormigones expansivos pretensados químicamente se emplean bajo la condición de restringido se propone analizar las características mecánicas del hormigón bajo la misma condición de servicio para determinar de forma correcta y representativa las propiedades mecánicas de estos hormigones.

-
- La dosis del 10% de DENKA CSA 20 se presenta, en régimen libre, como dosis de aditivo expansivo crítica a partir de la cual se produce una disminución de las características resistentes tanto en probetas prismáticas de dimensiones 40 x 40 x 160 mm como en probetas cilíndricas de 300 x 150 mm independientemente del tipo de curado y de la edad de ensayo.
 - En cuanto a la obtención de una dosis concreta de aditivo expansivo que asegure la característica de pretensado químico del hormigón mediante la determinación, en dos ambientes de curado, de la expansión libre y restringida en la dirección axial de elementos tipo viga (probetas prismáticas) empleando el método ASTM correspondiente, valorando la influencia del porcentaje de aditivo, ambiente restricción u otros factores en el desarrollo de la expansión se determina que:
 - El porcentaje de aditivo expansivo DENKA CSA 20 influye en la magnitud de las expansiones desarrolladas de tal forma que a mayor porcentaje adicionado de aditivo expansivo mayor es la magnitud de la expansión desarrollada. El incremento de expansión al aumentar la dosis de aditivo no es directamente proporcional, quedando para estudios posteriores el establecer la relación existente entre porcentaje adicionado y magnitud de la expansión inducida.
 - Las dosis empleadas en este estudio del 10% y 15% son suficientes inicialmente para vencer los distintos grados de restricción impuestos y desarrollar deformaciones en sentido positivo garantizando la integridad del hormigón. Si bien es cierto lo anterior, la dosis del 15% se muestra como la más efectiva para los objetivos de este estudio, ya que para cualquiera de las condiciones de curado y restricción impuestas desarrolla la mayor magnitud de expansión y garantiza un régimen de deformaciones en positivo una vez se han estabilizado los cambios dimensionales que acontecen en la probeta, mientras que la dosis del 10% de aditivo expansivo DENKA CSA 20, en las condiciones particulares de curado y restricción de este estudio, no es suficiente para impedir la retracción global del elemento en la condición de restringido, ya que, transcurridos un tiempo desde la amasada, las probetas experimentan una pérdida de longitud respecto al tamaño inicial (retracción).
 - El ambiente de curado condiciona el desarrollo y valor máximo de la expansión, evaluado sobre dispositivos tipo prisma o tipo doble anillo, de tal forma que, el curado de probetas de HACE en ambiente con aporte continuo de agua, induce deformaciones en sentido positivo de mayor magnitud que las desarrolladas en el curado en ambiente con cobertura de film que evita la ganancia y pérdida de agua con el medio, tanto en la condición de libre como en la de restringido para cualquiera de las dosis empleadas. La razón de ello se debe a que el aporte suplementario y continuo de agua de una fuente exterior favorece la hidratación del compuesto expansivo, facilitando las reacciones expansivas y la formación de un mayor porcentaje de Etringita (compuesto expansivo).
 - El agua de composición de los HACE propuestos, siempre que se evite su pérdida, es suficiente para hidratar el aditivo expansivo y generar deformaciones en sentido positivo que vengzan la restricción impuesta inicialmente, garantizando bien la compensación de la retracción posterior, caso de la dosis del 10%, o bien, un sistema de deformaciones positivas de carácter permanente, tal y como ocurre para la dosis de aditivo expansivo DENKA CSA 20 del 15%. Esta última dosis asegura además la puesta en tensión inicial del encamisado exterior, evitando posibles
-

-
- pérdidas de contacto entre el hormigón de relleno, el pilar y la camisa de refuerzo, incluso en las condiciones más desfavorables de curado cuando parte del agua de composición del hormigón se pierde por evaporación al estar el hormigón expuesto a un medio externo.
- La disponibilidad de agua y su influencia en el valor máximo de la expansión alcanzado es una constante que se repite a lo largo de toda la investigación.
 - Los principales fenómenos de retracción que acontecen para las condiciones particulares de esta investigación están condicionados por el grado de exposición y facilidad de pérdida del agua de composición del HACE, y son fundamentalmente dos: la retracción por secado y la retracción endógena. La mayor influencia de uno u otro dependerá del ambiente de curado y condiciones de contorno (preparación del soporte), de tal forma que, en elementos o ambientes que favorezcan la pérdida de parte del agua de composición del HACE de relleno por absorción o evaporación, el fenómeno de retracción predominante es el de retracción por secado, mientras que en el caso de elementos en los se evite esta pérdida (encamisados exteriores y buena preparación del soporte), es el de retracción endógena.
 - La cuantía y el tipo de restricción (rigidez) condiciona el desarrollo y magnitud de la expansión independientemente de la dosis adicionada. El efecto de la restricción se hace más evidente cuanto mayor es la expansión libre determinada.
 - La restricción impuesta y tipo de ésta (rigidez) condiciona el desarrollo y magnitud de la expansión alcanzada para una dosis de aditivo expansivo concreta de tal forma que, cuanto mayor es el grado de restricción menor es la expansión desarrollada. En esta investigación se corrobora que la mayor restricción viene impuesta por la camisa de acero, que es el elemento sobre el que, para una misma dosis de aditivo expansivo y respecto al encamisado de CFRP, se registran valores de expansión menores en cada uno de los ambientes de curado. Así mismo, se puede decir que el grado de restricción influye en la velocidad del desarrollo inicial de la expansión. En nuestro caso, la pendiente inicial de las curvas de deformación bajo la condición de restricción de la camisa de CFRP es la misma en los tres casos estudiados, independientemente de la dosis de aditivo expansivo DENKA CSA 20 empleada y de las condiciones de curado impuestas. Sin embargo, en la condición de restricción bajo camisa de acero la pendiente inicial del desarrollo de la expansión se muestra dependiente de la dosis de aditivo adicionada siendo más rápido el desarrollo de la expansión en la dosis del 15% que en la del 10%.
 - Adicionalmente, se puede establecer que, para una misma dosis de aditivo expansivo y ambiente de curado, el valor máximo alcanzado de la expansión es proporcional al grado de restricción impuesto independientemente del ambiente de curado (Figura 5.24 y Figura 5.25).

- En relación al diseño de un dispositivo de ensayo que simule en laboratorio la configuración del sistema de refuerzo por confinamiento indirecto con encamisados prefabricados exteriores que permita evaluar, para los diferentes hormigones y encamisados exteriores a ensayar (Acero y CFRP), el grado de expansión y restricción en la dirección circunferencial desde el instante inicial de puesta en obra, verificando en tal caso la correlación existente con los resultados obtenidos mediante el método normativo ASTM C878 cabe señalar que:
 - El dispositivo de doble anillo propuesto en este estudio no solo se muestra válido para registrar de forma eficaz las deformaciones circunferenciales desde la puesta en obra del hormigón y simular la configuración de refuerzo basada en el confinamiento mediante encamisados prefabricados exteriores y HACEs de relleno, sino que, dado el alto grado de correlación que presenta respecto del dispositivo de ensayo normativo de *restraining cage* ASTM C878 en el registro de expansiones en distintos ambientes de curado se podría plantear como una alternativa de dispositivo de ensayo más eficaz, especialmente en lo que se refiere a los hormigones expansivos con las característica de pretensado químicamente, al permitir el registro de la expansión desde el instante inicial de puesta en obra del hormigón.

Este dispositivo de doble anillo posee la ventaja de que evita depender del tiempo de fraguado para desmoldar y determinar el desarrollo completo de la expansión bajo múltiples condiciones de restricción.
 - El garantizar un registro de la expansión desde el instante inicial del vertido del hormigón es fundamental para determinar el correcto desarrollo y valor máximo de la misma, ya que, como pone de manifiesto la comparativa del estudio de expansiones en los instantes iniciales y a 1 día con el dispositivo de doble anillo, un retraso de 24 horas en el registro de deformaciones se traduce en pérdidas del valor de expansión considerado de entre un 13% y un 95%, en función de la dosis empleada y las condiciones de curado impuestas. Relativo a esto último se observa que cuanto menos favorable es la condición ambiental de curado (menor aporte de agua) más determinante es un retraso en el comienzo del registro de las deformaciones. Este hecho se observa para cada dosis y condición de restricción estudiada.
- Respecto a la selección, conforme a los resultados obtenidos, de una dosificación efectiva de HACE que venza la restricción y genere un régimen de expansiones permanente en el tiempo se dispone que:
 - A la vista de los resultados obtenidos a escala de laboratorio, tanto en vigas (Capítulo 4) como en el dispositivo de doble anillo (Capítulo 5), la dosis del 15% de aditivo expansivo DENKA CSA 20 es la dosis más efectiva para fabricar un hormigón expansivo pretensado químicamente con un régimen de expansiones permanente que garantice la puesta en tensión del encamisado exterior de refuerzo, independientemente de la condición de restricción, acero o CFRP, y del ambiente de curado, con o sin aporte de humedad adicional. Por ello, se selecciona esta dosis de aditivo expansivo para fabricar los HACEs que se emplean como relleno en el sistema de refuerzo indirecto por confinamiento de elementos de hormigón tipo probeta o pilar cilíndrico armado mediante camisas prefabricadas de CFRP (Capítulo 6).

- En lo que se refiere a la validación experimental, en elementos tipo probeta y pilar cilíndrico de hormigón armado, de los resultados de expansión obtenidos sobre probetas prismáticas y el dispositivo de ensayo propuesto, identificando aquellos factores que puedan influir en el desarrollo de la expansión se establece que:
 - El empleo como relleno, en el sistema de refuerzo por confinamiento indirecto propuesto mediante encamisados prefabricados exteriores de CFRP, del HACE diseñado con aditivo expansivo DENKA CSA 20 en la proporción del 15% genera un grado de expansión capaz de vencer la restricción impuesta por la camisa prefabricada de CFRP de forma permanente en el tiempo, induciendo una tensión circunferencial que proporciona un efecto de pretensado sobre dicho encamisado y confina el núcleo de hormigón generando una presión de confinamiento desde los instantes iniciales de puesta en obra. De esta forma se pasa de un sistema de refuerzo pasivo, como es el confinamiento directo por encamisados de FRP, a un sistema de confinamiento activo.
 - Los valores similares de expansión registrados sobre tres alturas (centro y extremos) del encamisado de refuerzo de CFRP dispuesto sobre elementos tipo probeta demuestran que la condición de autocompactante garantiza el correcto llenado del espacio entre la camisa exterior y elemento reforzado, mientras que la condición de expansivo que le confiere la dosis del 15% asegura una correcta transmisión de tensiones y la adherencia incluso en los extremos de la camisa prefabricada de CFRP logrando así un confinamiento efectivo de toda la longitud un confinamiento efectivo de toda la longitud del pilar.
 - Las operaciones de acondicionamiento del soporte de hormigón a reforzar, previas a la aplicación de la solución de confinamiento propuesta, son fundamentales para evitar cualquier alteración de la mezcla de hormigón vertida como relleno y del comportamiento mecánico y de deformación esperado de la misma.

Esta afirmación se fundamenta en lo observado en los elementos tipo pilar, donde el valor de expansión máximo alcanzado en dos de los cuatros pilares se ve limitado debido a un grado de humectación insuficiente de la superficie porosa del hormigón del soporte, lo que condiciona la disponibilidad de agua para llevar a cabo la hidratación del aditivo expansivo y por tanto limita la capacidad de expansión del HACE de relleno por la pérdida por absorción de parte del agua de composición a través de la superficie seca del soporte de hormigón.

- El régimen y valor máximo de expansión del HACE-15% de relleno, registrados sobre los encamisados de CFRP que se colocan en elementos tipo probeta y tipo pilar armado, son muy similares a los medidos en el dispositivo de ensayo de doble anillo referido en el Capítulo 5, salvo en el caso de dos elementos tipo pilar por preparación inadecuada del soporte. Aun así, conforme a los resultados obtenidos, se puede establecer que el dispositivo de doble anillo propuesto en esta investigación como elemento de ensayo para laboratorio simula fielmente el comportamiento del sistema de refuerzo por confinamiento mediante encamisados exteriores de CFRP y HACE de relleno, permitiendo determinar de forma bastante aproximada el régimen y valor máximo de la expansión real del HACEs vertido en la solución final, siempre y cuando las condiciones de curado sean similares y las operaciones de acondicionamiento del soporte objeto de refuerzo sean las adecuadas.

- Finalmente, en relación al objetivo de evaluación de la efectividad mecánica de la solución de refuerzo propuesta basada en el confinamiento activo de pilares cilíndricos de hormigón mediante encamisados exteriores prefabricados y HACE de relleno frente a la técnica de refuerzo por confinamiento pasivo empleada habitualmente se concluye que:
 - La solución de refuerzo propuesta de encamisados exteriores prefabricados de CFRP y HACE-15% de relleno aumenta la capacidad de resistencia a compresión y rigidez del soporte inicial proporcionando un efecto de confinamiento uniforme en toda la longitud del pilar que beneficia la prevención del pandeo local prematuro de la armadura interna del elemento reforzado potenciando la acción compuesta e integridad estructural del sistema híbrido de refuerzo por encamisados exteriores de CFRP rellenos con HACE.
 - El refuerzo por confinamiento, directo o indirecto, de elementos cilíndricos de hormigón incrementa, de forma general, la resistencia a compresión y ductilidad respecto al mismo elemento de hormigón sin reforzar. Sin embargo, el pandeo local de la armadura, en elementos tipo pilar armado, reduce la efectividad del refuerzo y la contribución mecánica del encamisado exterior de CFRP en las soluciones de confinamiento estudiadas, ya que, dicho pandeo induce una concentración de tensiones en los extremos del pilar, concretamente en la cabeza, que limita el área efectiva confinada a esta zona y disminuye la presión de confinamiento total ejercida.

En sistemas de confinamiento directo, la ejecución de una capa adicional de CFRP en base y cabeza contribuye a mejorar ostensiblemente el comportamiento resistente del elemento reforzado, ya que este doble refuerzo restringe el pandeo local de la armadura en cabeza trasladando la zona de concentración de tensiones al tercio central del pilar, consiguiendo así un confinamiento más efectivo.

Sin embargo, en la solución de confinamiento indirecto propuesta (encamisado exterior más HACE de relleno) una capa adicional de refuerzo en los extremos del pilar no confiere a los elementos reforzados unas capacidades mecánicas adicionales a destacar a las ya observadas con el refuerzo simple, ya que, los valores de resistencia y rigidez registrados son muy similares y prácticamente independientes a las capas dispuestas de refuerzo. Esto puede deberse a que la capa adicional de refuerzo se aplica sobre el encamisado ya pretensado por efecto de la expansión del HACE de relleno.

8 LINEAS FUTURAS DE TRABAJO

A partir del trabajo de investigación realizado y los resultados obtenidos se pueden plantear varias líneas futuras de investigación consistentes en:

- Caracterizar y evaluar hormigones pretensados químicamente curados bajo la condición de restringido con el fin de identificar qué diferencias existen a nivel de microestructura, propiedades mecánicas y de durabilidad respecto de los hormigones curados en régimen libre.
- Comprobar, sobre elementos fabricados con hormigones expansivos base sulfoaluminato de calcio, la estabilidad del compuesto Etringita en el rango de temperaturas comprendidas entre 80 °C y 100 °C, temperaturas éstas a las que se produce la descomposición del hidrato, para determinar la incidencia que pudiera tener sobre la integridad propia del elemento y sobre las propiedades mecánicas y de expansión del hormigón.
- Investigar y caracterizar las propiedades reológicas, en estado fresco, y mecánicas, durables y de expansión, en estado endurecido, de hormigones expansivos fabricados a partir de aditivos base oxido de calcio sometidos a distintos ambientes de curado, identificando, a través de técnicas de caracterización microestructural, el mecanismo y morfología del hidrato responsable de la expansión.
- Desarrollar, optimizar e implementar el dispositivo de ensayo de doble anillo que se propone en esta investigación como método alternativo de ensayo al método actual ASTM C878 para la caracterización de la expansión de hormigones expansivos sometidos a diferentes condiciones de curado y restricción.

9 BIBLIOGRAFIA

- ¹ The international federation for structural concrete (CEB-FIB), technical report bulletin 14. *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*, julio 2011, 138 p. ISBN 2-88394-054-1.
- ² Khair Al-Deen Isam Bsisu, "Retrofitting of Square Reinforced Concrete Columns Subjected to Concentric Axial Loading with Steel Jackets" C.E.O. Al-Eman Housing Company.
- ³ Priestley M.J.N., F. Seible., and G.M. Calvi, *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, , New York, John Wiley & Sons, abril 1996., 704p., ISBN: 978-0-471-57998-4.
- ⁴ Yogesh Chhabra, *Bridge Rehabilitation Techniques*, general manager, the DSbrown company, 57 pioneer road, Singapore 628508, web www.dsbrown.com, 2004.
- ⁵ The international federation for structural concrete (CEB-FIB), technical report bulletin 39, *Seismic bridge design and retrofit – structural solutions, state of art report*, may 2007, 300 p. ISBN 978-2-88394-079-6.
- ⁶ G.L. Rai, "Different Strengthening Techniques for RC Columns", R&M International.
- ⁷ Hamidreza Nasersaeed, "Evaluation of Behavior and Retrofitting RC Structures with Concretes Jacktes", *Asian Journal of Applied Sciences* Malaysia 2011, 4(3): 211-228 pp.
- ⁸ A. Meda, G.A. Plizzari, Z. Rinaldi, G. Martinola, 2009, "Strengthening of R/C existing columns with high performance fiber reinforced concrete jacket", *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II – Alexander et al (eds) 2009 Taylor & Francis Group, London* pp 1263-1268.
- ⁹ Konstantinos G. Vandoros, Stephanos E. Dritsos, 2006, "Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns", *Construction and Building Materials*, 2008, V. 22 (2008) 264–276.
- ¹⁰ Júlio, E. S., Branco, F., and Silva, V. D., "Structural rehabilitation of columns with reinforced concrete jacketing", *Prog. Struct. Engng Mater.* february 2003; 5:29–37.
- ¹¹ Júlio, E. S.; Branco, F.; and Silva, V. D., "RC Jacketing—Interface Influence on Monotonic Loading Response," *ACI Structural Journal*, Mar.-Apr. 2005, V. 102, No. 2, , pp. 252-257.
- ¹² Eduardo N. B. S. Júlio and Fernando A. B. Branco, 2008, "Reinforced Concrete Jacketing—Interface Influence on Cyclic Loading Response", *ACI Structural Journal*, July-August 2008, V. 105, No. 4, , pp: 7.
- ¹³ Hilmi Coskun, "Construction Of SIMCON Retrofitted Reinforced Concrete Columns", A Dissertation Submitted To The Graduate Faculty Of North Carolina State University, 2002, 280p.
- ¹⁴ Rodriguez M & Park R., "Seismic Load Tests On Reinforced Concrete Columns Strengthened By Jacketing", *ACI Structural Journal*, March–April 1994: 91(2): 150–159.
- ¹⁵ Bett BJ, Klingner RE & Jirsa JO., "Lateral Load Response Of Strengthened And Repaired Reinforced Concrete Columns", *ACI Structural Journal* 1988: 85(5): 499–508.
- ¹⁶ Sun, Z., F. Seible., And M.J.N. Priestly, "Flexural Retrofit Of Rectangular Reinforced Concrete Bridge Column By Steel Jacketing", Structural System Research Project, Report SSRP-93/07, University Of California, Sandiego, February 1993, 215 P.
- ¹⁷ Kawashima, K., H. Ichimasuand H. Ohuchi, "Retrofitting", *Proceedings International Workshop On Seismic Design And Retrofitting Of Reinforced Concrete Bridges*, Bornio, Italy, 1991, pp. 471-501.
- ¹⁸ Eunsoo Choi, Young-Soo Chung, Joonam Park, and Baik-Soon Cho , "Behavior of Reinforced Concrete Columns Confined by New Steel-Jacketing Method", *ACI Structural Journal*, 2010, 107-s64, pp. 655-662.

- ¹⁹ Eunsoo Choi, Man-Cheol Kim, 2008, "A New Steel Jacketing Method for Concrete Cylinders and Comparison of the Results with a Constitutive Model", *IJR International Journal of Railway*, June 2008, Vol. 1, No. 2, pp. 72-81.
- ²⁰ J H Wang, K Kikuchi, M Kuroki, "Seismic Retrofit of Existing R/C Rectangular Columns with Circular Steel Jackets", 30th Conference on Our World In Concrete & Structures: 23 – 24 August 2005, Singapore.
- ²¹ Xiao, Y. and Wu, H. (2003). "Retrofit of Reinforced Concrete Columns Using Partially Stiffened Steel Jackets." *J. Struct. Eng.*, 2003, 129(6), 725–732.
- ²² Khair Al-Deen Isam Bsisu, "Retrofitting of Square Reinforced Concrete Columns Subjected to Concentric Axial Loading with Steel Jackets", Engineering association Jerusalem Center 2002, pp. 8.
- ²³ Aboutaha, R.S., Engelhardt, M.D., Jirsa, J.O., & Kreger, M.E. (1999). Rehabilitation of shear critical concrete columns by use of rectangular steel jackets. *ACI Structural Journal*, 1999, 96(1), 68-78.
- ²⁴ Priestley, M.J.N., Seible, F., Xiao, Y., & Verma, R. "Steel jacket retrofitting of reinforced concrete bridge columns for enhanced shear strength-Part 1: Theoretical considerations and test design.", *ACI Structural Journal*, 1994, 91(4), pp. 394- 405.
- ²⁵ Chai, Y H, Priestley, Mjn Seible, F, "Seismic Retrofit Of Circular Bridge Columns For Enhanced Flexural Performance", *ACI Structural Journal*, Septiembre-Octubre 1991, Vol.88, N°5, pp.572-584.
- ²⁶ ACI Committee 440, ACI 440R-07, Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, American Concrete Institute, 2007, 100 p.
- ²⁷ Harmon, T. K.; Slattery, K.; and Ramakrishnan, S., "The Effect of Confinement Stiffness on Confined Concrete," Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, St. Louis: L. Taerwe ed., 1995, pp. 584-592.
- ²⁸ Mukherjee, A.; Boothby, T. E.; Bakis, C. E.; Joshi, M. V.; and Maitra, S. R., "Mechanical Behavior of Fiber- Reinforced Polymer-Wrapped Concrete Columns-Complicating Effects," *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 2004, V. 8, No. 2, pp. 97-103.
- ²⁹ Prota, A.; Manfredi, G.; and Cosenza, E., "Ultimate Behavior of Axially Loaded RC Wall-Like Columns Confined with GFRP," *Composites Part B: Engineering*, 2006, V. 37, pp. 670-678.
- ³⁰ Demers, M., and Neale, K. W., "Strengthening of Concrete Columns with Unidirectional Composite Sheets," Fourth International Conference on Short and Medium Span Bridges, 1994, Halifax, NS, Canada, pp. 895-905.
- ³¹ ACI Committee 440, ACI 440.2R-08, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures", 2008, 80 pp.
- ³² Demers, M., and Neale, K., "Confinement of Reinforced Concrete Columns with Fibre Reinforced Composites Sheets—An Experimental Study," *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1999, V. 26, pp. 226-241.
- ³³ Pessiki, S.; Harries, K. A.; Kestner, J.; Sause, R.; and Ricles, J. M., "The Axial Behavior of Concrete Confined with Fiber Reinforced Composite Jackets," *Journal of Composites in Construction*, ASCE, 2001, V. 5, No. 4, pp. 237-245.
- ³⁴ Harries, K. A., and Carey, S. A., "Shape and 'Gap' Effects on the Behavior of Variably Confined Concrete," *Cement and Concrete Research*, 2003, V. 33, No. 6, pp. 881-890.

- ³⁵ Youssef, M. N., "Stress Strain Model for Concrete Confined by FRP Composites," PhD dissertation, University of California-Irvine, 2003, Irvine, CA, 310 pp.
- ³⁶ Matthys, S.; Toutanji, H.; Audenaert, K.; and Taerwe, L., , "Axial Load Behavior of Large-Scale Columns Confined with Fiber-Reinforced Polymer Composites," *ACI Structural Journal*, 2005, V. 102, No. 2, Mar.-Apr., pp. 258-267.
- ³⁷ Rocca, S.; Galati, N.; and Nanni, A., , "Experimental Evaluation of FRP Strengthening of Large-Size Reinforced Concrete Columns," *Report No. UTC-142*, University of Missouri-Rolla, MO, 2006.
- ³⁸ Wang, Y. C., and Restrepo, J. I., "Investigation of Concentrically Loaded Reinforced Concrete Columns Confined with Glass Fiber-Reinforced Polymer Jackets," *ACI Structural Journal*, 2001, V. 98, No. 3, May-June, pp. 377-385.
- ³⁹ Rocca, S.; Galati, N.; and Nanni, A., "Review of Design Guidelines for FRP Confinement of Reinforced Concrete Columns of Noncircular Cross Sections," *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 2008, V. 12, No. 1, Jan.-Feb., pp. 80-92.
- ⁴⁰ M. N. S. Hadi, "External Reinforcement Of Concrete Columns", 11th Underground Coal Operators' Conference, University Of Wollongong & The Australasian Institute Of Mining And Metallurgy, 2011, pp.121-128.
- ⁴¹ C. Aire, R. Gettu, J. R. Casas, S. Marques, D. Marques, "Estudio Experimental Y Modelo Teórico Del Hormigón Confinado Lateralmente Con Polímeros Reforzados Con Fibras (FRP)", *Materiales De Construcción*, 2010, Vol. 60, 297, Enero-Marzo, pp. 19-31.
- ⁴² F. Colomb, H. Tobbi, E. Ferrier B, P. Hamelin, "Seismic Retrofit Of Reinforced Concrete Short Columns By CFRP Materials", *Composite Structures* 82, 2008, pp. 475–487.
- ⁴³ Jason Maximino, "Retrofitting Rc Circular Columns Using CFRP Sheets As Confinement", Symposium On Infrastructure Development And The Environment, Seameo-Innotech, University Of The Philippines, Diliman, Quezon City, Philippines, December 2006, 10 p.
- ⁴⁴ G. M. Kotsovos, C. Zeris And M. N. Pavlovic, "A New Methodology For Repairing And Strengthening RC Members In Seismic Regions", *Magazine Of Concrete Research*, 2006, 58, No. 2, March, pp. 63–77.
- ⁴⁵ R. Modarelli, F. Micelli, And O. Manni, "FRP-Confinement Of Hollow Concrete Cylinders And Prisms", *ACI Special Publication*, 2005, Vol. 230-58, October, pp.1029-1046.
- ⁴⁶ Y. Xiao And H. Wu, "Compressive Behavior Of Concrete Confined By Various Types Of FRP Composite Jackets", *Journal Of Reinforced Plastics And Composites*, 2003, Vol 22, September, pp. 1187-1201.
- ⁴⁷ Hamid Saadatmanesh, Mohammad R. Ehsani, And Limin Jin, "Repair Of Earthquake-Damaged RC Columns With FRP Wraps", *ACI Structural Journal*, 1997, V. 94, No. 2, March-April, pp.206-214.
- ⁴⁸ Xiao, And Ma, "Seismic Retrofit Of RC Circular Columns Using Prefabricated Composite Jacketing." *Journal Structural. Engineering*, 1997, V. 123 (10), October, pp. 1357-1364.
- ⁴⁹ Bode, H., "Columns of Steel Tubular Sections Filled with Concrete Design and Application," *acier_stahl_steel*, V. 11-12, 1976, pp. 388-393
- ⁵⁰ "Composite Steel Concrete Constructions: Report of the Subcommittee on the State of Art Survey of the Task Committee on Composite Construction of the Committee on Metals of the Structural Division," *Journal of Structural Division*, ASCE, V. 100, No. ST5, May 1974, pp. 1085-1115.

- ⁵¹ Chang Xu , Huang Chengkui, Jiang Decheng, Song Yuancheng, "Push-out test of pre-stressing concrete filled circular steel tube columns by means of expansive cement" *Construction and Building Materials* Volume 23, Issue 1, January 2009, Pages 491–497.
- ⁵² Mohammad Moravvej, Mohammad Aghahassani, Mamdouh Elbadry, "The Effects Of Expansive Cement On The Strength Of Concrete-Filled Fiber Reinforced Polymer Tubes" 1st International Conference on Civil Engineering Infrastructure Based on Polymer Composites, CECOM 2012, At Krakow, Poland.
- ⁵³ Mohammad Shams and M. Ala Saadeghvaziri , "State of the Art of Concrete-Filled Steel Tubular Columns ", *ACI Structural Journal*, V. 94, No. 5, September-October 1997, pp. 58-571.
- ⁵⁴ Neogi P. K.; and San H. K., "Concrete Filled Tubular Steel Columns Under eccentric Loading," *Journal of Structural Engineering*, V. 47, No. 5, May 1969.
- ⁵⁵ C.P. Pantelides, Z. Yan, and L. D. Reaveley, "FRP-Jacketed And Shape Modified Columns Using Chemical Posttensioning" Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering April 18-22, 2006, San Francisco, California, USA.
- ⁵⁶ Xu Kai-Cheng, Chen Meng-Cheng, and Yuan Fang, "Confined Expansion and Bond Property of Micro-Expansive Concrete-Filled Steel Tube Columns", *The Open Civil Engineering Journal*, 2011, 5, 173-178.
- ⁵⁷ Giovanni Muciaccia, Francesca Giussani, Gianpaolo Rosati, Franco Mola, "Response Of Self-Compacting Concrete Filled Tubes Under Eccentric Compression" *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 67, Issue 5, May 2011, Pages 904–916.
- ⁵⁸ V.S. Ramachandran, J.J. Beaudoin, *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology: Principles, Techniques and Applications*, 1ed, William Andrew , 2000, 1003 p., ISBN: 978-0-8155-1437-4.
- ⁵⁹ ACI committee 223, ACI 223-70, "Expansive Cement Concretes-Present State of Knowledge", *ACI Journal*, 1970.
- ⁶⁰ Grupo de trabajo 2/3. Aditivos químicos para Hormigón Estructural, *Monografía 16. Manual de Tecnología de Aditivos para Hormigón*, ACHE (Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural), 2010, ISBN: 978-84-89670-70-9.
- ⁶¹ ACI committee 223, ACI 223R-10, "Guide for the use of shrinkage Compensating Concrete", American Concrete Institute, 2010, 16p.
- ⁶² P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*, 3rd ed., McGraw-Hill Companies, Inc. New York, 2006, 659 p., ISBN: 0071462899.
- ⁶³ Candlot, C., *Bulletin*, Societe d'Encouragement pour L'Industrie Nationale, V. 5, 1890, 682p.
- ⁶⁴ Michaelis, W., *Tonindustrie-Zeitung* (Goslar), V. 16, 1892, 105 p.
- ⁶⁵ Lossier, H., and Caguot, A., "Expanding Cements and Their Application- Self-Stressed Concrete," *Le Genie Civil* , Paris, V. 121, No. 8, Apr. 15, 1944, pp. 61-65, and No. 9, May 1, 1944, pp. 69-71 (in French).
- ⁶⁶ Lafuma, H., "Expansive Cements" *Proceedings, Third International Symposium on the Chemistry of Cement*, London, 1952, Cement and Concrete Association, London, 1954, pp. 581-597.
- ⁶⁷ Mikhailov, V. V., "Stressing Cement and the Mechanism of Self-Stressing Concrete Regulation", *Proceedings, Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement*, Washington D. C., 1960, V2, , pp. 927-955. (National Bureau of Standards, *Monograph* 43, 1962).

- ⁶⁸ Klein, A., and Troxell, G. E., "Studies of Calcium Sulfoaluminate Admixtures for Expansive Cements," *Proceedings, ASTM*, V. 58, 1958, pp. 986-1008.
- ⁶⁹ Klein, A.; Karby, T.; and Polivka, M., "Properties of an Expansive Cement for Chemical Prestressing," *ACI JouRNAL, Proceedings* V. 58, No. 1, July 1961, pp. 59-82.
- ⁷⁰ Polivka, M., and Klein, A., "Bond Strength Characteristics of Grouts Containing an Expansive Component," *RILEM Bulletin (Paris)*, New Series No. 13, Dec. 1961, pp. 24-28.
- ⁷¹ Klein, A., and Bertero, V. V., "Effects of Curing Temperature and Creep Characteristics of Expansive Concretes," *Proceedings, ASTM*, V. 63, 1963, pp. 1008- 1025.
- ⁷² Gruner, P. W., and Plain, G. A., "Type K Shrinkage- Compensating Cement in Bridge Deck Concrete," *Concrete International*, 1993, V. 15, No. 10, Oct., pp. 44-47.
- ⁷³ Ramey, G. E.; Pittman, D. W.; and Webster, G. K., "Shrinkage Compensating Concrete for Bridge Decks," *Concrete International*, 1999, V. 21, No. 4, Apr., pp. 29-34.
- ⁷⁴ Valentine, L. J., "Environmental Containment Structures," *Concrete International*, 1994, V. 16, No. 7, July, pp. 34-37.
- ⁷⁵ Hoffman, M. W., "Portland Cement Versus Expansive Cement in Post-Tensioned Concrete Structures," *Cedric Wilson Symposium on Expansive Cement*, SP-64, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1980,, pp. 205-237.
- ⁷⁶ Eskildsen, S.; Jones, M.; and Richardson, J., "No More Pour Strips," *Concrete International*, 2009, V. 31, No. 10, Oct., pp. 42-47.
- ⁷⁷ Keith, F. R.; Bentley, C. L.; Walker, W. W.; and Holland, J. A., 2006, "Shrinkage-Compensating Concrete Pavements Perform Well," *Concrete International*, V. 28, No. 1, Jan., pp. 47-51.
- ⁷⁸ Bailey, D. A.; Barbour, E. J.; Cupp, S. W.; Holland, J. A.; and Knight, D. W., 2001, "Gatorade Floor: Quenching Thirst, Joints, Cracks, and Curl," *Concrete International*, V. 23, No. 1, Jan., pp. 23-29.
- ⁷⁹ H.F.W. Taylor, "Cement chemistry", Academic press ltd., London, 1990.
- ⁸⁰ ASTM C845 / C845M-12, Standard Specification for Expansive Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org.
- ⁸¹ AENOR, "Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes", UNE-EN 197-1, Madrid: AENOR, 2011.
- ⁸² JIS A 6202, "Expansive Additive for Concrete", Standard Specifications for Concrete Structures, Japan Society of Civil Engineers, 2002.
- ⁸³ S. Nagataki, H. Gomi, "Expansive Admixtures (mainly ettringite)", *Cement and Concrete Composites*, 1998, vol. 20, pp 163-170.
- ⁸⁴ T. García Madrid, P. Horstmann Largacha, "Hormigones y Morteros sin Retracción", *Revista de Obras Públicas*, 1985, pp. 973-996.
- ⁸⁵ M.D. Cohen, "Theories Of Expansion In Sulfoaluminate – Type Expansive Cements: Schools Of Thought" *Cement And Concrete Research*, 1983, Vol. 13, pp. 809-818.
- ⁸⁶ Mehta, P. K., "Mechanism of expansion associated with ettringite formation", *Cement and Concrete Research*, 1973, vol. 3 (I), I-6.
- ⁸⁷ Eura, S., Yamazaki, Y. and Monji, T., "Influence of initial drying on the change of length of mortar with expansive admixture", *CAJ Review of the 29th General Meeting*, 1975, No. 29, pp. 428-431.

- ⁸⁸ Minoru Morioka, Etsuo Sakai and Masaki Daimon, "Expansion Mechanism of Expansive Additive Focusing on Microstructure of Hardened Cement Paste and Physical Parameters Influencing Expansion Behavior".
- ⁸⁹ Chatterji, S. & Jeffery, J. W., "A new hypothesis of sulphate expansion". *Concrete Research*, 1963, IS(44), pp. 83-86.
- ⁹⁰ Okushima, M., Kondo, R., Muguruma, H. & Ono, Y., Supplementary Paper 4-86. "Development of expansive cement with calcium sulphoaluminous cement Clinker". *Proceedings Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement*, Tokyo, 1968, 4, pp. 419-430.
- ⁹¹ Chatterji, S. & Jeffery, J. W., "The volume expansion of hardened cement paste due to the presence of 'dead-burnt' Cao", *Concrete Research*, 1966, 18(55), pp. 65-68.
- ⁹² Isogai, J., "Long term properties of hardened concrete of (3CaO+3Al₂O₃+CaSO₄-CaO) series expansive cement". *Cement Technical Annual Report*, 1975, 29, pp.126-130.
- ⁹³ Ramachandran, V. S., Sereda, P. J. & Feldman, R. K., "Mechanism of hydration of calcium oxide", *Nature*, 1964, 201(4916), pp. 288-289.
- ⁹⁴ Aroni, S., "Influence of Aggregate Types on Expanding Concrete Properties", MS Thesis, University of California, Berkeley, 1965.
- ⁹⁵ Hansen, W. C., "Solid-Liquid Reactions in Portland Cement Pastes", *Materials Research and Standards*, 1962, V.2, No. 6, June, pp. 490-493.
- ⁹⁶ Schwiete, H. E.; Ludwig, U.; and Jager, P., "Investigations in the System 3CaO·Al₂O₃-CaSO₄-Ca(OH)₂" *Symposium on Structure of Portland Cement Paste and Concrete*, Special Report 90, Highway Research Board, 1966, pp. 353-367.
- ⁹⁷ Mehta, P. K., and Klein, A., "Formation of Ettringite by Hydration of a System Containing an Anhydrous Calcium Sulfoaluminate," *Journal of the American Ceramic Society*, 1965, V. 48, No. 8, August, pp. 435-436.
- ⁹⁸ Mehta, P. K., and Klein, A., "Investigation on the Hydration Products in the System 4CaO·3Al₂O₃·SO₃·CaSO₄- CaO-H₂O," *Symposium on Structure of Portland Cement Paste and Concrete*, Special Report 90, Highway Research Board, 1966, pp. 328-352.
- ⁹⁹ Mehta, P. K., "Expansion Characteristics of Calcium Sulfoaluminate Hydrates," *Journal of the American Ceramic Society*, 1967, V. 50, No. 4, April, pp. 204- 208.
- ¹⁰⁰ Chatterji, S., and Jeffery, J. W., "A New Hypothesis on Sulfate Expansion," *Magazine of Concrete Research*, London, 1963, V. 15, No. 44, July, pp. 83-86.
- ¹⁰¹ Mikhailov, V. V., "Self-Stressed Reinforced Concrete", III Self-Stressed Concrete, Central Scientific Research Institute of the Building Industry (TSNIPS), Moscow, 1955, pp. 20-33. (Translated from Russian as Foreign Literature Study No. 130, Portland Cement Association).
- ¹⁰² Lafuma, H., "Expansive Cements," *Proceedings Third International Symposium on the Chemistry of Cement* (London, 1952), London: Cement and Concrete Association, 1954, pp. 581-597.
- ¹⁰³ Klein, A., and Troxell, G. E., "Studies of Calcium Sulfoaluminate Admixtures for Expansive Cements", *Proceedings*, ASTM, 1958, V. 58, pp. 986-1008.
- ¹⁰⁴ Monfore, G. E., "Properties of Expansive Cement Made with Portland Cement, Gypsum, and Calcium Aluminate Cement", *Journal PCA Research and Development Laboratories*, 1964, V. 6, No. 2, May, pp. 2-9.

- ¹⁰⁵ Lerch, W., "The Influence of Gypsum on the Hydration and Properties of Portland Cement Pastes", *Proceedings*, ASTM, 1946, V. 46, pp. 1251-1292.
- ¹⁰⁶ Polivka, M., and Bertero, V. V., "Factors Affecting the Properties of Expanding Concrete", *Proceedings International Conference on the Structure of Concrete* (London, 1965), London: Cement and Concrete Association, 1968, pp. 479-492.
- ¹⁰⁷ Bertero, V. V., "Curing Effects on Expansion and Mechanical Behavior of Expansive Cement Concrete", *ACI Journal Proceedings*, 1967, V. 64, No. 2, February, pp. 84-96.
- ¹⁰⁸ Slate, F. O., and Matheus, R. E., "Volume Changes on Setting and Curing of Cement Paste and Concrete from Zero to Seven Days", *ACI Journal Proceedings*, 1967, V. 64, No. 1, January, pp. 34-39.
- ¹⁰⁹ Gustafarro, A. H.; Greening, N.; and Klieger, P., "Expansive Concrete-Laboratory Tests of Freeze-Thaw and Surface Scaling Resistance", *Journal*, PCA Research and Development Laboratories, 1966, V. 8, No. 1, January, pp. 10-36.
- ¹¹⁰ Aroni, S., and Polivka, M., "Effect of Expanded Shale Aggregate on Properties of Expansive-Cement Concrete", *Proceedings*, RILEM Symposium on Lightweight Aggregate Concretes, Budapest, Mar. 1967, pp. 475-502.
- ¹¹¹ Monfore, G. E., "Properties of Expansive Cement Made with Portland Cement, Gypsum, and Calcium Aluminate Cement," *Journal*, PCA Research and Development Laboratories, 1964, V. 6, No. 2, May, pp. 2-9.
- ¹¹² G. C. Hoff, "Expansive Cements And Their Uses" US Army Engineers Waterways Experiment Station, Concrete Laboratory, Vicksburg, Mississippi, October 1972.
- ¹¹³ Gustafarro, A. H.; Greening, N.; and Klieger, P., "Expansive Concrete-Laboratory Tests of Freeze-Thaw and Surface Scaling Resistance," *Journal*, PCA Research and Development Laboratories, V. 8, No. 1, Jan. 1966, pp. 10-36.
- ¹¹⁴ Monfore, G. E., "Properties of Expansive Cement Made with Portland Cement, Gypsum, and Calcium Aluminate Cement," *Journal*, PCA Research and Development Laboratories, V. 6, No. 2, May 1964, pp. 2-9.
- ¹¹⁵ Bertero; V. V., "Effects of Size of Cross Section Upon the Expansion History and Mechanical Behavior of Expanding Concrete," Department of Civil Engineering, University of California, 1966, *Report* No. 66-25, December, 29 pp.
- ¹¹⁶ Aroni, S.; Polivka, M.; and Bresler, B., "Expansive Cements and Expanding Concrete," Department of Civil Engineering, University of California, 1966, Report No. 66-7, July, 74 pp.
- ¹¹⁷ Russell, H. G., "Design of Shrinkage-Compensating Concrete Slabs" *Klein Symposium on Expansive Cement Concretes*, SP-38, Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 1973, pp. 193-226.
- ¹¹⁸ Klieger, P., and Greening, N. R., "Utility of Expansive Cement," *Proceedings*, Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement (Tokyo, 1968), Paper IV-132, Cement Association of Japan, Tokyo, 1969.
- ¹¹⁹ Yan Fu, Ping Gu, Ping Xie, J.J. Beaudoin, "Effect Of Chemical Admixtures On The Expansion Of Shrinkage Compensating Cement Containing A Pre-Hydrated High Alumina Cement — Based Expansive Additive", *Cement And Concrete Research*, 1995, Vol. 25. No. 1, pp. 29-38.
- ¹²⁰ ASTM C150 / C150M-12, *Standard Specification for Portland Cement*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org.

- ¹²¹ Japan Society of Civil Engineers, *Recommended Practice For Expensive Concrete*, Concrete Library, Concrete Library Of JSCE No. 23, June 1994.
- ¹²² ASTM C878 / C878M-09, *Standard Test Method for Restrained Expansion of Shrinkage-Compensating Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009, www.astm.org.
- ¹²³ ASTM C157 / C157M-08, *Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008, www.astm.org.
- ¹²⁴ ASTM C490 / C490M-11e1, *Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, www.astm.org.
- ¹²⁵ ACI committee 237, ACI 237R-07, "Self-Consolidating Concrete", American Concrete Institute, 30 pp, 2007.
- ¹²⁶ Grupo de trabajo 2/2. Comisión 2 "Materiales" de ACHE, *Monografía M-13 Hormigón Autocompactante: Diseño y Aplicación*, ACHE (Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural), 2008, ISBN: 978-84-89670-61-7.
- ¹²⁷ AENOR, *Ensayos de hormigón fresco. Parte 8: Hormigón autocompactante. Ensayo del escurrimiento*. UNE-EN 12350-8, Madrid: AENOR, 2011.
- ¹²⁸ Joseph F. Lamond, J. H. Pielert, "Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-making Materials", ASTM International, 2006, Número 169, Parte 4, 664 p.
- ¹²⁹ AENOR, *Ensayos de hormigón fresco. Parte 9: Hormigón autocompactante. Ensayo del embudo en V*, UNE-EN 12350-9, Madrid: AENOR, 2011.
- ¹³⁰ AENOR, *Ensayos de hormigón fresco. Parte 10: Hormigón autocompactante. Método de la caja en L*, UNE-EN 12350-10, Madrid: AENOR, 2011.
- ¹³¹ AENOR, *Ensayos de hormigón fresco - Parte 12: Hormigón autocompactante. Ensayo con el anillo japonés*, UNE-EN 12350-12, Madrid: AENOR, 2011.
- ¹³² AENOR, *Ensayos de hormigón fresco. Parte 11: Hormigón autocompactante. Ensayo de segregación por tamiz*, UNE-EN 12350-12, Madrid: AENOR, 2010.
- ¹³³ Koehler, Fowler, Foley, Rogers, Watanachet, Jae Jung, "Self-Consolidating Concrete for Precast Structural Applications" *CTR Technical Report*, Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration, August 2007.
- ¹³⁴ John Newman, B S Choo, *Advanced Concrete Technology 3: Processes*, Butterworth-Heinemann; 1 edition 704 pp, December 18, 2003.
- ¹³⁵ Instrucción de Hormigón Estructural, EHE 08, Real Decreto 1247/2008 del 18 de Julio, BOE número 203, agosto de 2008.
- ¹³⁶ AENOR, *Hormigón. Parte 9: Requisitos adicionales para el hormigón autocompactante*, UNE-EN 206-9, Madrid: AENOR, 2013.
- ¹³⁷ AENOR, *Ensayos de hormigón fresco. Parte 6: Determinación de la densidad*, UNE-EN 12350-6, Madrid: AENOR, 2009.
- ¹³⁸ AENOR, *Ensayos de hormigón fresco. Parte 7: Determinación del contenido de aire. Métodos de presión*, UNE-EN 12350-7, Madrid: AENOR, 2010.
- ¹³⁹ AENOR, *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia.*, UNE-EN 12390-2, Madrid: AENOR, 2009.

- ¹⁴⁰ AENOR, *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas*, UNE-EN 12390-3, Madrid: AENOR, 2009.
- ¹⁴¹ AENOR, *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido*, UNE-EN 1015-11, Madrid: AENOR, 2000.
- ¹⁴² AENOR, *Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión.*, UNE 83316, Madrid: AENOR, 1996.
- ¹⁴³ ASTM C469 / C469M-14, *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org.
- ¹⁴⁴ ASTM C1581 / C1581M-09a, *Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009, www.astm.org
- ¹⁴⁵ Technical Report No. 55 - TR55, "Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials", 3rd edition, UK: Concrete Society, 2012, 187p.
- ¹⁴⁶ ACI Committe 440, ACI 440.2R-08, "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures". American Concrete Institute, 2008, 76p.