



Universidad de la República
Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo
Maestría en Construcción de Obras de Arquitectura

TESIS DE MAESTRÍA

Retracción autógena en microhormigones de alto desempeño

Claudia Chocca

**Montevideo, Uruguay
Diciembre, 2016**



Retracción autógena en microhormigones de alto desempeño

Autor: Claudia Chocca

Tesis de Maestría presentada al Programa de Posgrado
Maestría en Construcción de Obras de Arquitectura,
Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la
Universidad de la República, como parte de los requisitos
necesarios para la obtención del título de Magíster.

Tutor: Dr. Gemma Rodríguez de Sensale

**Montevideo, Uruguay
Diciembre, 2016**

Chocca, Claudia

Retracción autógena en microhormigones de alto desempeño /
Claudia Chocca. Montevideo, Universidad de la República, Facultad
de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, 2016.

111p.; 29,7 cm.

Tutor:

Dr. Gemma Rodríguez de Sensale

Tesis de Maestría – Universidad de la República, Maestría en
Construcción de Obras de Arquitectura, 2016.

Referencias bibliográficas p. 108 –111.

1. microhormigón, 2. retracción, 3. deformación autógena, 4.
durabilidad, 5. desempeño, 6. fisuración. I. Rodríguez de Sensale,
Gemma. II. Universidad de la República, Programa de Posgrado
Maestría en Construcción de Obras de Arquitectura. II. Retracción
autógena en microhormigones de alto desempeño.

INTEGRANTES DEL TRIBUNAL DE DEFENSA DE TESIS

Dr. Luis Segura, por UPC-España,
Prof. Adjunto, FING - UdelaR

Dra. María Esther Fernández, por UPV-España,
Prof. Agregado, FADU - UdelaR

Mag. Fernando Tomeo, por UFRGS-Brasil,
Prof. Titular, FADU - UdelaR

Montevideo, Uruguay
Diciembre, 2016

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a la Dr. Arq. Gemma Rodríguez de Sensale por su dedicación y apoyo en la realización de este trabajo de investigación.

Asimismo, corresponde agradecer a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) por el financiamiento otorgado al proyecto PR_FMV_2009_1_Nº2717 del Programa Fondo María Viñas. En el marco de ese proyecto fue posible la realización de parte del presente trabajo y en particular, la adquisición del equipamiento para la medición de la retracción autógena de acuerdo a la Norma ASTM C 1698.

También agradezco al Laboratorio del Instituto de la Construcción (LabIC) de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de la República (UdelaR) por permitir el uso de sus instalaciones y equipos para el desarrollo de la etapa experimental. En particular, destaco la disposición y colaboración de Alejandro Rodríguez quien fue de gran ayuda en la realización de los ensayos.

Por brindarme su experiencia y guiarme en la descripción, análisis e interpretación de los resultados obtenidos le agradezco al Lic. Eduardo Cuitiño.

Por el tiempo que he dedicado a los estudios de posgrado, agradezco a mi esposo y a nuestras hijas que son el motivo para la búsqueda y consecución de nuevos logros cada día.

RESUMEN

Parte de este trabajo de investigación se realizó en el marco del Proyecto de Investigación y Desarrollo PR_FMV_2009_1_Nº2717 del Programa Fondo María Viñas de la ANII. El Proyecto abordó la investigación, desarrollo y aplicación de microhormigones de alto desempeño (MHAD) con materiales y técnicas locales.

En la presente tesis de Maestría se propone determinar los valores de retracción autógena en MHAD fabricados con materiales locales, diferentes entre sí en cuanto a relación agua/cemento y cantidad de cada uno de sus componentes. En otros países se han realizado diversos estudios para el análisis de la retracción autógena pero no hay experiencias al respecto en matrices cementíceas de MHAD.

La retracción, en general, se define como la reducción de volumen que sufren determinados materiales, entre ellos el hormigón, como consecuencia de su proceso físico-químico, de su fraguado, endurecimiento o desecación. En el caso de los hormigones y morteros, su estudio interesa debido a que puede conducir a la fisuración y por lo tanto incidir en la expectativa de vida del material. En particular, la retracción autógena es el cambio de volumen que ocurre cuando no se produce transferencia de humedad al ambiente.

Además de realizarse ensayos para la determinación de la retracción autógena, se determinó retracción por secado en los mismos MHAD, y también resistencia a flexión y compresión a los 28 días de edad. Asimismo se analizó la incidencia de la incorporación de ceniza de cáscara de arroz (CCA) como sustitución del 5% del cemento en un MHAD considerado como referencia. Se estudiaron tres tipos de CCA: dos residuales con estructura cristalina y otra amorfa.

Los resultados obtenidos muestran claramente que el método utilizado para la determinación del tiempo final de fraguado incide en los valores de deformación autógena. A medida que disminuye la proporción árido/cemento y la relación agua/cemento se obtienen MHAD con mayor resistencia a compresión y a flexión pero también con valores mayores de deformación autógena. La incorporación de CCA colabora en la disminución de la deformación autógena de los MHAD y no afecta de manera significativa las resistencias mecánicas y la deformación por secado, pero sí la autocompactabilidad de la mezcla.

Palabras-clave:

microhormigón, retracción, deformación autógena, durabilidad, desempeño, fisuración.

ABSTRACT

Part of this research was conducted under the Research and Development Project PR_FMV_2009_1_N°2717 of the María Viñas Fund Programme from the National Agency of Investigation and Innovation (ANII). The project addressed the research, development and application of high-performance micro-concrete (HPMC) made with local materials and techniques.

In this study it is proposed to determine the values of autogenous shrinkage in HPMC made with local materials, different from each other in the water/cement ratio and quantity of each of its components. In other countries there have been several studies for the analysis of autogenous shrinkage but there are no experiments in this regard to HPMC samples.

Shrinkage is generally defined as the volume reduction that certain materials suffer, including concrete, because of its physico-chemical process, its setting, hardening or dessication. The study of concrete and mortar is of interest because shrinkage can lead to material cracking and thus affect its life expectancy. In particular, autogenous shrinkage is the volume change that occurs when transfer of moisture to the environment does not occur.

In addition to performing tests for the determination of autogenous shrinkage, drying shrinkage was determined on the same samples, as well as flexural strength and compression at 28 days of age. The incidence of the incorporation of rice-husk ash (RHA) was also analyzed as a substitution of 5% of the cement portland in a HPMC considered as reference. Three RHAs were tested: two residual RHAs with a crystalline structure and another amorphous one.

The results clearly show that the method used for the determination of final setting time affects the autogenous deformation values. Furthermore, as the aggregate/cement ratio and the water/cement ratio are reduced, the HPMCs obtained reach higher compressive and flexural strength, but also with higher values of autogenous deformation. The incorporation of RHA used in an appropriate way, reduces autogenous shrinkage of the HPMCs and does not significantly affect the mechanical resistance and the deformation by drying, but it affects the autocompactability of the mixture.

Keywords:

micro-concrete, shrinkage, autogenous deformation, durability, performance, cracking.

Índice

Lista de figuras	vi
Lista de tablas	xi
Lista de símbolos	xiii
Lista de abreviaturas.....	xiv
Capítulo 1 Introducción.....	1
Capítulo 2 Estado del arte.....	4
2.1 ETAPAS DE RETRACCIÓN	5
2.1.1 Retracción a edad temprana.....	6
2.1.2 Retracción a largo plazo	10
2.1.3 Correlación entre retracción a edad temprana y a largo plazo.....	11
2.2 TIPOS DE RETRACCIÓN	12
2.2.1 Retracción térmica.....	12
2.2.2 Retracción por carbonatación.....	13
2.2.3 Retracción por secado	13
2.2.4 Retracción Química	18
2.2.5 Retracción Autógena.....	22
2.2.6 Retracción Total.....	28
2.3 TERMINOLOGÍA	29
2.4 TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE RETRACCIÓN AUTÓGENA	300
2.5 PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL DESARROLLO DE LA RETRACCIÓN AUTÓGENA	39
2.5.1 Relación agua/cemento	39
2.5.2 Tipo de cemento	41
2.5.3 Empleo de adiciones	43
2.5.4 Esqueleto granular	48
2.5.5 Aditivos.....	48
2.5.6 Temperatura	49
2.6 DESEMPEÑO, DURABILIDAD Y SOSTENIBILIDAD.....	51
2.7 APLICACIONES.....	53

2.7.1 Prefabricación.....	53
2.7.2 Pavimentos.....	54
2.7.3 Hormigones de alto desempeño (HAD).....	54
2.7.4 Hormigones de ultra alto desempeño (HUAD)	57
2.7.5 Microhormigones de alto desempeño (MHAD)	57
Capítulo 3 Investigación experimental	59
3.1 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	60
3.2 SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.....	66
3.2.1 Cemento portland.....	66
3.2.2 Áridos	66
3.2.3 Agua.....	63
3.2.4 Aditivos.....	63
3.2.5 Adiciones.....	64
3.3 DOSIFICACIÓN DE LOS MHAD Y LAS PASTAS.....	615
3.4 PROCEDIMIENTOS.....	66
3.4.1 Metodologías de ensayo.....	616
3.4.2 Preparación de las muestras de ensayo y llenado de los moldes.....	637
3.4.3 Determinación de la consistencia	70
3.4.4 Determinación del tiempo final de fraguado	70
3.4.5 Determinación de la deformación autógena	72
3.4.6 Determinación de las resistencias mecánicas	76
3.2.7 Determinación de la deformación por secado.....	78
3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	79
Capítulo 4 Resultados y Discusión	80
4.1 DEFORMACIÓN AUTÓGENA.....	80
4.1.1 Deformación autógena de los MHAD con tiempo final de fraguado según método de referencia (Norma ISO 9597).....	80
4.1.2 Deformación autógena de los MHAD con tiempo final de fraguado según método alternativo (Anexo A de la Norma ISO 9597).....	84
4.1.3 Comparación de la deformación autógena de los MHAD con tiempo final de fraguado según método de referencia (Norma ISO 9597) y método alternativo (Anexo A de la Norma ISO 9597)	87

4.1.4 Deformación autógena de las pastas de los MHAD con tiempo final de fraguado según método alternativo (Anexo A de la Norma ISO 9597)	89
4.1.5 Deformación autógena de los MHAD con CCA con tiempo final de fraguado según método de referencia (Norma ISO 9597)	92
4.2 DEFORMACIÓN POR SECADO	94
4.2.1 Deformación por secado de los MHAD	94
4.2.2 Deformación por secado de las pastas de los MHAD	95
4.2.3 Comparación de la deformación por secado de los MHAD y las pastas correspondientes	96
4.2.4 Deformación por secado de los MHAD con CCA	97
4.3 FLEXIÓN Y COMPRESIÓN	98
4.3.1 Flexión y compresión de los MHAD	98
4.3.2 Flexión y compresión de las pastas de los MHAD	100
4.3.3 Flexión y compresión de los MHAD con CCA	101
Capítulo 5 Conclusiones y sugerencias	103
5.1 CONCLUSIONES	103
5.2 SUGERENCIAS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES	1066
Referencias Bibliográficas	108

Lista de figuras

Figura 2.1 – Diagrama de etapas y tipos de retracción (Holt, 2001).....	5
Figura 2.2 – Progreso del fraguado y endurecimiento en el hormigón (Mehta y Monteiro (1993) <i>apud</i> Holt (2001); Mindess y Young <i>apud</i> Mehta y Monteiro, 2006).	6
Figura 2.3 - Finalización de la retracción por secado en la edad temprana, después del tiempo inicial de fraguado, debido al endurecimiento del hormigón (Holt, 2001).....	7
Figura 2.4 – Avance típico de la hidratación de la pasta de cemento en función del tiempo (de izquierda a derecha), resultando en una porosidad decreciente (Kronlöff, 1999 <i>apud</i> Holt, 2001).	8
Figura 2.5 – Curvas de porosimetría por intrusión de mercurio en pastas de cemento portland, en función del diámetro y volumen de los poros durante la hidratación (Young, 1974, <i>apud</i> Holt, 2001).....	8
Figura 2.6 – Gráfico de pérdida de la humedad superficial en distintas condiciones climáticas (Calavera, 2005)	9
Figura 2.7 – Estimación del nivel de riesgo de fisuración en función de la evaporación.....	10
Figura 2.8 – Efecto de la relación volumen/superficie en la retracción por secado del hormigón (Mindess y Young, 1981 <i>apud</i> Holt, 2001)	10
Figura 2.9 - Acumulación de retracción a edad temprana y a largo plazo, en diferentes ambientes de curado durante el primer día (Holt, 2001)	11
Figura 2.10 - Dimensiones de sólidos y poros en la pasta de cemento hidratada acumulación de retracción a edad temprana y a largo plazo, en diferentes ambientes de curado durante el primer día. (Mehta y Monteiro, 2006)	114
Figura 2.11 – Esfuerzos entre dos partículas de cemento que empujan los meniscos de agua hacia abajo, debido a la transferencia de humedad y al desarrollo de presión capilar (Radocea, 1992 <i>apud</i> Holt, 2001)	15
Figura 2.12 – Relación de la humedad relativa en función del radio del poro vacío basada en la ecuación de Kelvin a $T=20^{\circ}\text{C}$ (Holt, 2001)	17
Figura 2.13 – Relación de la humedad relativa y la presión (succión) (Holt, 2001)	17
Figura 2.14 – Reversibilidad de la retracción por secado (Mindess y Young, 1981 <i>apud</i> Mehta y Monteiro, 2006)	18
Figura 2.15 – Modelo de la influencia de la composición del cemento en la retracción química (Paulini, 1996 <i>apud</i> Holt, 2001)	20
Figura 2.16 – Cinética de hidratación típica de los minerales puros del cemento en función de la hidratación de la pasta a temperatura ambiente. (Lea, 1998 <i>apud</i> Holt, 2001)	21

Figura 2.17 – Cinética de hidratación de cemento portland común, (hidratación de la pasta a temperatura ambiente) (Lea, 1998 <i>apud</i> Holt, 2001)	21
Figura 2.18 – Cambios de volumen causados por retracción química y retracción autógena en hormigón fresco (D'Ambrosia, 2015)	23
Figura 2.19 – Esquema de los cambios de volumen que tiene lugar en una pasta de cemento sellada (Jensen y Hansen, 2001a)	25
Figura 2.20 – Evolución de la retracción autógena en función del grado de hidratación (Acker, 1988, <i>apud</i> Holt, 2001)	26
Figura 2.21 – Retracción química por el método de la botella y retracción autógena volumétrica por el método de membrana fina de goma. (Hammer, 1999 <i>apud</i> Holt, 2001)	27
Figura 2.22 – Representación esquemática de una sección transversal de pasta de cemento hidratada (Jensen y Hansen, 2001a)	27
Figura 2.23 – Relación entre retracción autógena y retracción por secado en materiales con baja relación agua/cemento (Tazawa y Miyazawa, 1995 <i>apud</i> Holt, 2001)	29
Figura 2.24 – Equipo para mediciones volumétricas de deformación autógena de pasta de cemento (Setter y Roy, 1978 <i>apud</i> Lura, 2003)	31
Figura 2.25 – Equipo para mediciones lineales de deformación autógena de pasta de cemento (Buil, 1979 <i>apud</i> Lura, 2003)	31
Figura 2.26 – Pasta cementícea colocada en membrana de poliuretano con reserva (izquierda) y en membrana de látex sin reserva (derecha) para mediciones volumétricas (Lura y Jensen, 2005)	32
Figura 2.27 – Dispositivo para ensayo volumétrico de esfuerzo autógeno de pasta cementícea (Lura y Jensen, 2005)	34
Figura 2.28 – Sistema de medición con inserciones (Bjontegaard, 1999 <i>apud</i> Lura, 2003)	34
Figura 2.29 – Sistema de medición con extremos removibles en prismas de (40x40x160) mm (Morioka et al., 1999 <i>apud</i> Lura, 2003)	35
Figura 2.30 – Sistema de medición con barras horizontales en vigas de (150x150x1000) mm (Lokhorst, 1998 <i>apud</i> Lura, 2003)	35
Figura 2.31 – Sistema de medición con barras verticales en losas de (270x270x100) mm (Holt y Leivo, 1999 <i>apud</i> Lura, 2003)	35
Figura 2.32 – Sistema de medición con extensómetros (Nawa y Horita, 2004 <i>apud</i> Giani, Navarrete y Bustos, 2008)	36
Figura 2.33 – Sistema de medición con tubos flexibles (de diámetro igual a 100 mm y longitud igual a 375 mm) y mediciones verticales de longitud (Hansen y Jensen, 1997 <i>apud</i> Lura, 2003)	36

Figura 2.34 – Retracción autógena del mortero tipo I (Alrifai, Aggoun y Cabrillac, 2009)	41
Figura 2.35 – Retracción autógena del mortero tipo II (Alrifai, Aggoun y Cabrillac, 2009)	41
Figura 2.36 – Deformación autógena a partir del fraguado de cinco pastas de cemento, determinada a una temperatura de 30°C (Jensen, 2000)	43
Figura 2.37 – Deformación autógena de pastas de cemento portland y ceniza de cáscara de arroz en función del tiempo (Rodríguez de Sensale, Ribeiro y Gonçalves, 2008)	46
Figura 2.38 – Retracción autógena del CEM-I (Alrifai et al., 2009)	47
Figura 2.39 – Retracción autógena de la pasta-I (Alrifai et al., 2009)	47
Figura 2.40 – Desarrollo de retracción (Maia et al., 2009)	48
Figura 2.41 – Deformación autógena de pasta de cemento portland blanco con $a/c=0,30$ y 20% de adición de humo de sílice. Las temperaturas de exposición se indican en las curvas (Jensen, 1999)	49
Figura 2.42 – Deformación autógena y tasa de deformación de pasta de cemento portland blanco con $a/c=0,30$ y 20% de adición de humo de sílice durante el aumento escalonado de temperatura (Soliman y Nehdi, 2009)	50
Figura 2.43 – Esfuerzos autógenos para mezcla control ($a/c=0,25$) a 10, 20 y 40°C (Soliman y Nehdi, 2009)	50
Figura 2.44 – Influencia de condiciones de curado en la ocurrencia de la retracción autógena (Aitcin, 2003)	52
Figura 3.1 – Equipos para la preparación de las muestras de ensayo	68
Figura 3.2 – Moldes de acero para probetas de (40x40x160) mm: a) para ensayos de resistencias mecánicas, b) para ensayos de deformación por secado	68
Figura 3.3 – Preparación de las probetas de (40 x 40 x 160) mm: a) determinación de la masa, b) amasado, c) lubricación del molde, d) compactación de la mezcla y e) enrasado de las probetas	69
Figura 3.4 – Armario de curado	69
Figura 3.5 – Determinación de la consistencia con la mesa de sacudidas: a) equipo de ensayo y b) medición del escurrimiento	70
Figura 3.6 – Aparato de Vicat automático: a) método de referencia b) método alternativo	71
Figura 3.7 – Principales componentes del dilatómetro según la Norma ASTM C 1698	73
Figura 3.8 – Llenado de los moldes de las probetas para medición de deformación autógena	74
Figura 3.9 – Medición de deformación autógena durante las primeras 48 h	74
Figura 3.10 – Colocación de la probeta en el dilatómetro para realizar la medición	75

Figura 3.11 – a) Máquina de ensayo con dispositivos para: b) flexión y c) compresión de probetas de (40x40x160) mm	76
Figura 3.12 – a) Probeta de (40x40x160) mm ensayada a flexión, b) Semiprisma del ensayo a flexión, luego ensayado a compresión	77
Figura 3.13 – Medición de longitud de una probeta: a) ajuste con barra de calibración y b) medición de una probeta	79
Figura 4.1 – Deformación autógena de los MHAD en función del tiempo considerando tiempo final de fraguado según método de referencia (Norma ISO 9597)	81
Figura 4.2 – Tiempo final de fraguado de los MHAD según método de referencia (Norma ISO 9597)	81
Figura 4.3 – Tiempo final de fraguado de los MHAD según método alternativo (Anexo A de la Norma ISO 9597)	85
Figura 4.4 – Deformación autógena de los MHAD en función del tiempo considerando tiempo final de fraguado según método alternativo (Anexo A de la Norma ISO 9597)	85
Figura 4.5 – Deformación autógena de los MHAD en función del tiempo considerando tiempo final de fraguado según método de referencia (Norma ISO 9597) y método alternativo (Anexo A de la Norma ISO 9597)	88
Figura 4.6 – a) Molde para la determinación de tiempo de fraguado de la pasta media pobre (MP) y b) probeta de deformación autógena de la pasta de MHAD media (M)	89
Figura 4.7 – Deformación autógena de las pastas de los MHAD estudiados en función del tiempo considerando tiempo final de fraguado según método alternativo	90
Figura 4.8 – Tiempo final de fraguado de las pastas en comparación con los MHAD correspondientes, determinados según método alternativo (Anexo A de la Norma ISO 9597)	91
Figura 4.9 – Deformación autógena de los MHAD con CCA y del MHAD de referencia en función del tiempo considerando tiempo final de fraguado según método de referencia	93
Figura 4.10 – Tiempo final de fraguado de los MHAD con CCA y MHAD rica (R) de referencia según método de referencia (Norma ISO 9597)	93
Figura 4.11 – Deformación por secado de los MHAD en función del tiempo	95
Figura 4.12 – Deformación por secado de las pastas de los MHAD en función del tiempo	96
Figura 4.13 – Deformación por secado de los MHAD y de las pastas de los MHAD en función del tiempo	97
Figura 4.14 – Deformación por secado de los MHAD con CCA y de MHAD de referencia en función del tiempo	98

Figura 4.15 – Resistencia a flexión y a compresión de los MHAD a 28 días	99
Figura 4.16 – Resistencia a flexión y a compresión de las pastas de los MHAD a 28 días	100
Figura 4.17 – Resistencia a flexión y a compresión de los MHAD con CCA a 28 días y del MHAD RICA (R) de referencia	102

Lista de tablas

Tabla 2.1 – Composición de cementos (Jensen, 2000)	42
Tabla 2.2 – Dosificación del mortero cementíceo con sílice reforzado con fibras en porcentaje en peso del cemento (Hansen y Jensen, 1989)	44
Tabla 2.3 – Composición química en % por peso y superficie específica, S (determinada por BET) del humo de sílice (Hansen y Jensen, 1989).....	44
Tabla 2.4 – Composición química de los tipos de humo de sílice en % por peso y las superficies específicas, S (determinadas por BET) (Jensen y Hansen, 1995a)	45
Tabla 2.5 – Composición química del humo de sílice en % por peso (Jensen y Hansen, 1996)	45
Tabla 3.1 – Diseño experimental	60
Tabla 3.2 – Cantidad de probetas ensayadas por propiedad analizada	61
Tabla 3.3 – Valores característicos del análisis químico del cemento portland normal utilizado	62
Tabla 3.4 – Valores de resistencia a compresión del cemento portland normal utilizado	62
Tabla 3.5 – Propiedades físicas del cemento portland normal utilizado	62
Tabla 3.6 – Características principales del árido utilizado	63
Tabla 3.7 – Granulometría del árido fino utilizado determinada según Norma UNIT-NM 248	63
Tabla 3.8 – Características de las cenizas de cáscara de arroz utilizadas	64
Tabla 3.9 – Dosificación de las muestras estudiadas	65
Tabla 3.10 – Metodologías de ensayo	66
Tabla 4.1 – Deformación autógena de los MHAD a diferentes edades, considerando tiempo final de fraguado determinado según método de referencia (Norma ISO 9597)	81
Tabla 4.2 – Comparación de los valores de deformación autógena de los MHAD respecto a los del MHAD pobre (P), a las edades de 2, 28 y 181 días	82
Tabla 4.3 – Comparación de los valores de deformación autógena de los MHAD a los 28 y 181 días respecto a los de los 2 días	83
Tabla 4.4 – Deformación autógena de los MHAD a diferentes edades, considerando tiempo final de fraguado según método alternativo (Anexo A de la Norma ISO 9597)	85
Tabla 4.5 – Comparación de los valores de deformación autógena de los MHAD respecto a los del MHAD pobre (P), a las edades de 2, 28 y 181 días	86
Tabla 4.6 – Comparación de los valores de deformación autógena de los MHAD a los 28 y 181 días respecto a los de los 2 días	86

Tabla 4.7 – Deformación autógena de las pastas de los MHAD estudiados, calculada según tiempo final de fraguado determinado por método alternativo, a diferentes edades	90
Tabla 4.8 – Comparación de los valores de deformación autógena de las pastas de los MHAD rica (R) y media rica (MR), respecto a los de los MHAD rica (R) y media rica (MR) a los 2, 28 y 181 días	91
Tabla 4.9 – Deformación autógena de los MHAD con CCA, calculada según método de referencia, a diferentes edades	92
Tabla 4.10 – Comparación de los valores de deformación autógena de los MHAD con CCA, respecto a los del MHAD rica (R) a los 2, 28 y 181 días	94
Tabla 4.11 – Deformación por secado de los MHAD a diferentes edades	95
Tabla 4.12 – Deformación por secado de las pastas de los MHAD a diferentes edades	96
Tabla 4.13 – Deformación por secado de los MHAD con CCA a diferentes edades	98
Tabla 4.14 – Resultados de resistencia a flexión y a compresión de los MHAD a 28 días	99
Tabla 4.15 – Resistencia a flexión y a compresión de las pastas de los MHAD a 28 días	100
Tabla 4.16 – Resultados de Resistencia a flexión y a compresión de los MHAD con CCA a 28 días y del MHAD rica (R) de referencia	101

Lista de símbolos

Al_2O_3	óxido de aluminio
C	óxido de calcio (en notación abreviada de química del cemento)
CH	hidróxido de calcio o portlandita (en notación abreviada de química del cemento)
CO_2	dióxido de carbono
C_2A	aluminato bicálcico (en notación abreviada de química del cemento)
C_2S	silicato bicálcico o belita (en notación abreviada de química del cemento)
C_3A	aluminato tricálcico (en notación abreviada de química del cemento)
C_3S	silicato tricálcico o alita (en notación abreviada de química del cemento)
C_4AF	ferroaluminato tetracálcico (en notación abreviada de química del cemento)
CSH	silicato cálcico hidratado (en notación abreviada de química del cemento)
$Ca(OH)_2$	hidróxido de calcio
$CaCO_3$	carbonato de calcio
Fe_2O_3	óxido de hierro
H	agua (en notación abreviada de química del cemento)
H_2O	agua
K_2O	óxido de potasio
$NaCl$	cloruro de sodio
Na_2O	óxido de sodio
Na_2O_{eq}	óxido de sodio equivalente
MgO	óxido de magnesio
SO_3	trióxido de azufre
SiO_2	óxido de silicio, sílice

Lista de abreviaturas

ANII	Agencia Nacional de Investigación e Innovación
ASTM	Organización de normalización americana de métodos de ensayo y materiales, del inglés American Society for Testing and Materials
CCA	Ceniza de cáscara de arroz
EN	Norma europea
FADU	Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo
FMV	Fondo María Viñas
FSE	Fondo Sectorial de Energía
HAD	Hormigón de alto desempeño
HUAD	Hormigón de ultra alto desempeño
ISO	Organización Internacional de Normalización
LabIC	Laboratorio del Instituto de la Construcción
LVDT	Transformador diferencial de variación lineal, del inglés linear variable differential transformer
MHAD	Microhormigón de alto desempeño
NM	Norma Mercosur
PCA	Asociación de Cemento Portland, del inglés Portland Cement Association
PR	proyecto
UdelaR	Universidad de la República
UNIT	Instituto Uruguayo de Normas Técnicas
UNE	Norma española

Introducción

Parte de este trabajo de investigación se realizó en el marco del Proyecto de Investigación y Desarrollo PR_FMV_2009_1_Nº2717 del Programa Fondo María Viñas de la ANII, que abordó la investigación, desarrollo y aplicación de microhormigones de alto desempeño (MHAD) con materiales y técnicas locales.

Específicamente, la presente tesis de maestría propone determinar la retracción autógena en MHAD fabricados con materiales locales, diferentes entre sí en cuanto a relación agua/cemento y cantidad de cada uno de sus componentes. En otros países se han realizado diversos estudios para el análisis de la retracción autógena pero no hay experiencias al respecto en matrices cementíceas de MHAD.

La retracción es la reducción de volumen que sufren determinados materiales, entre ellos el hormigón, como consecuencia de su proceso físico-químico, de su fraguado, endurecimiento o desecación. En el caso de los hormigones y morteros, su estudio interesa debido a que puede conducir a la fisuración y por lo tanto incidir en la expectativa de vida del material. (Fontana et al., 2007; Lura, Jensen y Breugel, 2003; Jensen y Hansen, 2001)

Existen diferentes tipos de retracción. En algunos casos, por ser de poca entidad se desprecian. En otros casos, si se toman las medidas adecuadas para prevenir su desarrollo no implican un riesgo importante. (Holt, 2001; Calavera, 2005)

En particular, la retracción autógena no puede ser prevenida por medio de métodos adecuados de colocación o curado y es un factor que puede derivar en la fisuración. Se define como la deformación que ocurre en una matriz cementícea, no sujeta a fuerzas exteriores y bajo temperatura constante, que es sellada, de tal modo que no se produce transferencia de humedad al ambiente. Ocurre especialmente en hormigones de alto desempeño (HAD) con relaciones agua/cemento bajas (aproximadas a 0,42 o menores), cementos especiales, aditivos reductores de agua u adiciones que reducen el volumen de cemento. (Jensen y Hansen, 2001a; Aitcin et al., 2008)

Los HAD son usualmente más durables, ya que son menos porosos y con capilares y redes de poros no conectados entre sí. Debido a ello, la penetración de agentes agresivos es difícil y solamente superficial. Pero a medida que el tiempo transcurre, no hay suficiente agua para la hidratación del cemento y se produce autodesecación con una consecuente reducción del volumen del material. (Aitcin, 2003) Entonces, se produce retracción autógena, cuyo estudio interesa debido a que puede favorecer la aparición de fisuras si su desarrollo es considerable.

Los MHAD, como señala su denominación, son hormigones que no contienen en su composición agregado grueso y exceden en sus prestaciones a los microhormigones convencionales. Sus ventajas radican, entre otras, en que alcanzan resistencias a compresión superiores a las habituales, presentan una mayor durabilidad relacionada con una menor permeabilidad, permiten una mayor libertad de forma de las piezas construidas, posibilitan la elaboración de piezas de espesores reducidos, ofrecen una gran facilidad de colocación, reducen el peso de las estructuras, los tiempos de construcción y los costos directos e indirectos de obra. (Rodríguez de Sensale et al., 2012).

Estas ventajas se logran, si se minimizan, como se mencionaba antes, los efectos adversos que puede provocar la retracción autógena. Al incidir en la fisuración del MHAD puede afectar su desempeño desde lo estructural hasta lo puramente estético.

A los efectos de completar el análisis, se realizaron ensayos, en los mismos MHAD, tanto de retracción por secado, para poder estudiar la relación entre los dos distintos tipos de retracción, como de determinación de resistencias mecánicas dado que las propiedades asociadas a la durabilidad tienen una buena correlación con la resistencia a compresión.

Asimismo, de los MHAD se eligió una dosificación que se tomó como de referencia y se sustituyó parte del aglomerante por ceniza de cáscara de arroz (CCA) con el propósito de evaluar el efecto de esta adición en su desempeño. Esto es relevante desde el punto de vista de la sostenibilidad, ya que se reduce el volumen de cemento por unidad de volumen de la mezcla, y por consiguiente se reduce el costo del material.

Este trabajo de investigación, como objetivo general, se propone estudiar la retracción autógena en diferentes MHAD.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Evaluar la retracción autógena en diferentes MHAD elaborados a partir de materiales nacionales definidos en el PR_FMV_2009_1_Nº2717.
- Evaluar la retracción autógena de las pastas cementíceas correspondientes a los MHAD antes estudiados.
- Evaluar la incidencia de la incorporación de ceniza de cáscara de arroz como sustitución de parte del cemento en los MHAD estudiados.
- Evaluar la retracción por secado y las resistencias mecánicas a 28 días para caracterizar los MHAD estudiados.

El presente trabajo pretende contribuir al desarrollo de matrices cementíceas fabricadas con materiales nacionales, diseñadas con criterios de sostenibilidad, capaces de satisfacer los requisitos de desempeño que aseguren una durabilidad adecuada al propósito.

La tesis consta de 5 capítulos.

El capítulo 1 es esta breve introducción que presenta tanto el marco en el que fue realizada esta tesis de maestría como su objeto de estudio: la retracción autógena. Asimismo, se incluye los objetivos planteados, algunos comentarios respecto al diseño experimental y una reseña sobre el contenido de cada capítulo.

El capítulo 2 refiere al estado del arte sobre el estudio de la retracción autógena. Se describen las fases y los tipos de la retracción en general, y en particular, las técnicas de medición de la retracción autógena. También se hace referencia a la terminología específica de esta temática.

El capítulo 3 presenta la investigación experimental, abarcando aspectos tales como el diseño, los procedimientos, la selección y caracterización de los materiales, su dosificación y los equipos de ensayo según las metodologías utilizadas.

En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos de retracción autógena, retracción por secado y resistencia a compresión de los MHAD estudiados; comprende además su análisis y discusión.

El capítulo 5 contiene las conclusiones finales y las sugerencias para otras investigaciones.

Finalmente se presentan las referencias bibliográficas utilizadas.

Capítulo 2

Estado del arte

Este capítulo contiene siete apartados que abordan el estado del arte sobre retracción y hormigón en general, y sobre retracción autógena y microhormigón de alto desempeño en particular.

El primer apartado refiere a una clasificación de las etapas en las que se produce retracción en función del tiempo indicando cuáles son los diferentes tipos de retracción que ocurren en cada una de ellas.

El segundo apartado describe los diferentes tipos de retracción haciendo énfasis en la retracción autógena, objeto de estudio de esta tesis de maestría, y en la retracción por secado, por ser en la mayoría de los casos de magnitud considerable si no se tienen en cuenta los medios para prevenirla.

En el tercer apartado se exponen algunas consideraciones respecto a la terminología empleada.

El cuarto apartado reseña las diferentes técnicas desarrolladas a lo largo del tiempo para la medición de deformación autógena.

En el quinto apartado se recopila la información acerca de los parámetros que influyen en el desarrollo de deformación autógena, a saber, relación agua/cemento, tipo de cemento, empleo de adiciones, características del esqueleto granular, aditivos y temperatura.

El sexto apartado vincula el objeto de este trabajo de investigación con conceptos generales tales como desempeño, durabilidad y sostenibilidad.

Por último, el séptimo apartado contiene una reseña de aplicaciones de hormigones en los que se puede desarrollar retracción autógena.

2.1 ETAPAS DE RETRACCIÓN

A continuación se señalan los diferentes tipos de retracción que puede producirse en el hormigón con el transcurso del tiempo. Para ello, se presenta la clasificación de etapas planteada por Holt (2001).

Así pues, la retracción se puede estudiar en dos etapas: a edades tempranas y a largo plazo. La edad temprana abarca el primer día (primeras 24 h), es el periodo que va desde la colocación del material cementíceo en el molde hasta que comienza a endurecer. La etapa a largo plazo, refiere al material cementíceo cuya edad es mayor de 24 horas.

Como se puede ver en el esquema de la Figura 2.1, en cada etapa ocurren diferentes tipos de retracción. Sin embargo, en las dos etapas se destacan, por el valor que pueden llegar a alcanzar, la retracción por secado y la retracción autógena. Los otros tipos de retracción debidos a cambios térmicos y reacciones de carbonatación usualmente se desprecian por no ser de magnitud relevante.

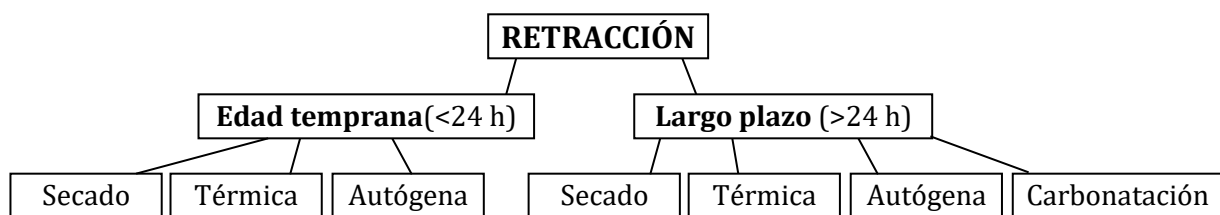


Figura 2.1 – Diagrama de etapas y tipos de retracción (Holt, 2001)

En general, la retracción del hormigón se debe al desplazamiento del agua o a la pérdida de la misma. Se generan esfuerzos de tracción debido a que el agua se pierde tanto por evaporación, para el caso de retracción por secado, como por reacciones químicas internas debidas a la hidratación de las partículas, para el caso de retracción autógena.

Entonces, si bien cada uno de los tipos de retracción se explica en el apartado 2.2 con mayor profundidad, vamos a decir que la retracción por secado se produce cuando el material cementíceo pierde agua cediéndola al ambiente, provocando en consecuencia un cambio volumétrico. A edades tempranas, la capacidad de tensión del material cementíceo es baja, lo cual genera un riesgo mayor de falla del material. Dicho de otro modo, se generan esfuerzos que podrían acelerar el deterioro, por ejemplo a través de la fisuración.

No obstante la retracción por secado a edad temprana es importante, puede ser eliminada por técnicas de colocación o curado que sirven para prevenir la pérdida de humedad y proporcionar el tiempo necesario para que el material adquiriera resistencia. (Holt, 2001; Holt, 2005)

A largo plazo, la ocurrencia de cambios de volumen ha sido usualmente atribuida al secado del hormigón. En ese sentido, las mediciones de retracción se realizaban una vez que el material

cementíceo podía ser desencofrado ya que obtenía determinada resistencia. En general, la mayoría de las características de los materiales asociadas a durabilidad se han estudiado a partir del comportamiento a largo plazo.

Sin embargo, desde finales de la década de los 80 se detecta que problemas en la fisuración de elementos prefabricados de hormigón de alto desempeño pueden ser explicados solamente por la ocurrencia de retracción autógena. Consecuentemente aparece el interés en la construcción de equipos y en el desarrollo de técnicas apropiadas para la medición de este fenómeno asociado a problemas a edad temprana. Desde entonces, Jensen realizó estudios teóricos y experimentales dedicados a la descripción e investigación de la retracción autógena. (Jensen y Hansen, 2002; Jensen, 2005)

2.1.1 Retracción a edad temprana

La retracción plástica refiere a los cambios de volumen que ocurren en las primeras horas debido a las reacciones que se producen cuando el hormigón está aún fresco. (RILEM 84, 1981; Mehta y Monteiro, 2006) Esto incluye, como se muestra en la Figura 2.2, el periodo de tiempo en el que el material está líquido o fluido, el periodo de transición en el que el material comienza a endurecer y a formarse su esqueleto rígido y, finalmente, el periodo de endurecimiento inicial en el que logra suficiente rigidez como para permitir el desencofrado de la pieza.

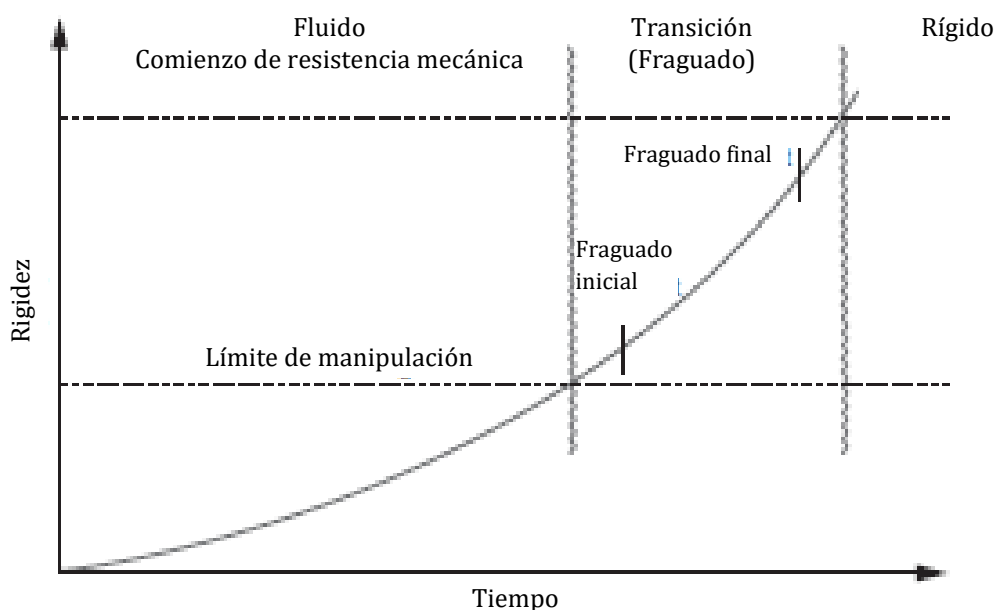


Figura 2.2 – Progreso del fraguado y endurecimiento en el hormigón (Mehta y Monteiro (1993) *apud* Holt (2001); Mindess y Young *apud* Mehta y Monteiro, 2006)

Según Mehta y Monteiro (2006), los tiempos inicial y final de fraguado determinados por métodos de resistencia a la penetración, no indican un cambio en las características físico-químicas de la matriz cementícea. El primero define el límite de manipulación y representa aproximadamente el tiempo límite para realizar el mezclado, la colocación y la compactación del hormigón. El segundo representa aproximadamente el tiempo a partir del cual el hormigón comienza a desarrollar una resistencia mecánica en una proporción significativa.

Holt (2001) afirma que para hormigón de alta resistencia, el periodo de rigidez o de endurecimiento usualmente empieza a las 12 horas después del mezclado y la retracción a edad temprana es mínima al comienzo de esta fase. Sin embargo, esa retracción a edad temprana es crítica debido a que ocurre cuando el hormigón aún no ha ganado suficiente resistencia. Además puede incidir en el desarrollo de retracción en la etapa a largo plazo y aumentar en consecuencia la retracción total.

En la fase líquida del hormigón, debido a que no hay una estructura para mantener firmemente la ubicación de los cuerpos, cualquier movimiento provocado por las tensiones generadas provoca un cambio en su posición como respuesta. Por ejemplo, en la etapa en que el hormigón es fluido las partículas de agregado grueso decantan y el agua de exudación asciende hacia la superficie de la pieza. Luego de la fase líquida, a partir de las reacciones de hidratación del cemento, se forma el esqueleto y se produce el fraguado a medida que la mezcla va aumentando su rigidez.

Según Holt (2001), el tiempo de fraguado puede ser retrasado tanto por las condiciones ambientales como por la utilización de adiciones o aditivos que afectan las reacciones químicas. Según Justnes et al. (2000) *apud* Holt (2001), el aumento de la relación agua/cemento produce un aumento del tiempo de fraguado. La utilización de aditivos superplastificantes también, como efecto secundario, retarda el fraguado. (Holt y Leivo, 1996 *apud* Holt, 2001; Holt y Leivo, 2004). En el mismo sentido, Brooks et al. (2000) *apud* Holt (2001) afirman que la incorporación de adiciones minerales, tales como humo de sílice, ceniza volante, escoria granulada molida de alto horno y metacaolín pueden afectar el tiempo de fraguado.

Como se mencionaba anteriormente, el hormigón a edad temprana es capaz de resistir esfuerzos una vez que el esqueleto se ha formado. Holt (2001) plantea, de acuerdo a lo que muestra la Figura 2.3, que aproximadamente 2 horas después del fraguado inicial el hormigón es capaz de resistir esfuerzos provocados por la retracción por secado. En aquellos casos en los que no se ha desarrollado suficiente resistencia para oponerse a estos esfuerzos puede ocurrir fisuración.

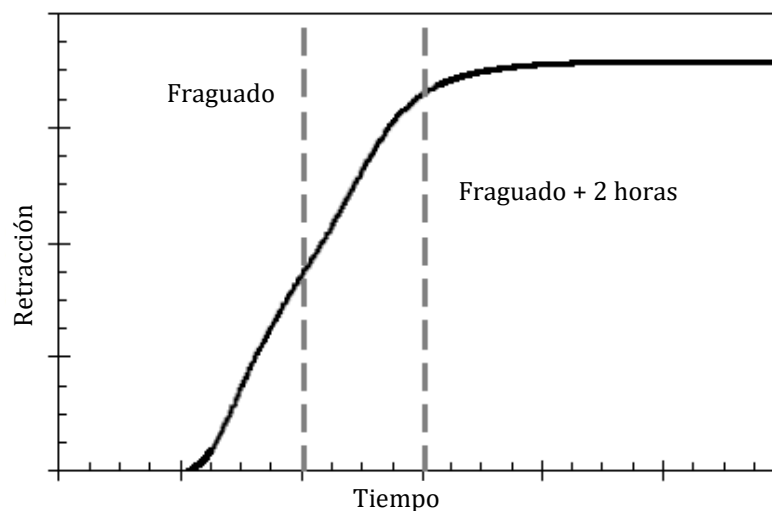


Figura 2.3 - Finalización de la retracción por secado en la edad temprana, después del tiempo inicial de fraguado, debido al endurecimiento del hormigón. (Holt, 2001)

A medida que el hormigón endurece, continúa teniendo cambios de volumen por un largo periodo de tiempo debido a que el cemento reacciona lentamente. El progreso de la reacción del cemento hasta que alcanza su máximo potencial se denomina grado de hidratación α . Esto se esquematiza para pasta de cemento en la Figura 2.4, donde las partículas de cemento están continuamente reaccionando.

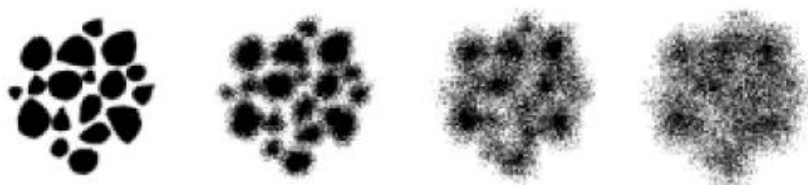


Figura 2.4 – Avance típico de la hidratación de la pasta de cemento en función del tiempo (de izquierda a derecha), resultando en una porosidad decreciente (Kronlöf, 1999 *apud* Holt, 2001)

Con el paso del tiempo, la hidratación avanza mientras que la porosidad o los espacios vacíos de la pasta se reducen. Los poros disminuyen su diámetro y por lo tanto, el volumen total de poros también disminuye, como se muestra en la Figura 2.5. Esto usualmente, conduce a la disminución de la permeabilidad y al incremento de la resistencia y durabilidad de la pasta de cemento. (Holt, 2001)

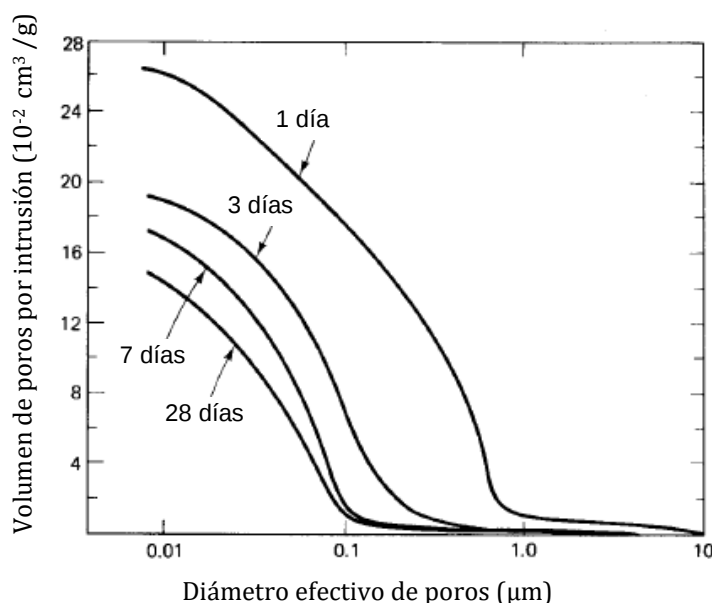


Figura 2.5 – Curvas de porosimetría por intrusión de mercurio en pastas de cemento portland, en función del diámetro y volumen de los poros durante la hidratación (Young, 1974, *apud* Holt, 2001)

Para hormigones de resistencia normal, del orden de los 35 MPa, la hidratación final de α aproximada a 1 (o 100%) se alcanza después de varios años. En hormigones de alta resistencia la hidratación puede verse interrumpida debido a la falta de agua, necesaria para la hidratación completa de cemento. En tal caso, el grado de hidratación puede solamente alcanzar un valor α mucho menor de 1 (por ej. $\alpha_{\text{máx}}=0,5$ para relaciones agua/cemento de 0,21). (Powers, 1968 *apud* Holt, 2001)

Además como las condiciones ambientales pueden influir en los esfuerzos que inducen a que se produzca retracción a edad temprana, es conveniente realizar un monitoreo con el fin de detectar variaciones causadas por cambios de temperatura, velocidad de viento o humedad relativa.

Calavera (2005) muestra el ábaco de la PCA (Portland Cement Association) de la Figura 2.6 que permite obtener la velocidad de evaporación asociada a la pérdida de humedad superficial en distintas condiciones climáticas. Como resulta obvio, la velocidad de evaporación superficial aumenta a medida que la temperatura ambiente y la del hormigón, y la velocidad del viento son mayores, y la humedad relativa disminuye. Es por ello, que es necesario proteger al hormigón recién colocado.

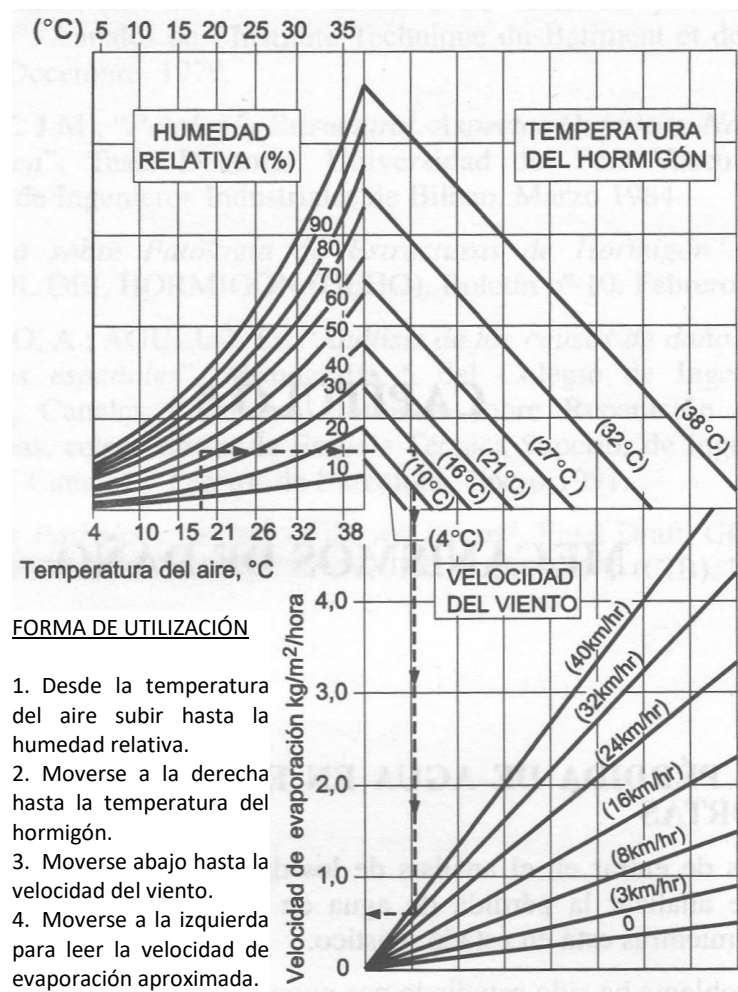


Figura 2.6 – Gráfico de pérdida de la humedad superficial en distintas condiciones climáticas (Calavera, 2005)

En el mismo sentido, el gráfico de la Figura 2.7 presenta una estimación de la relación entre la evaporación y la aparición de fisuras en la superficie del hormigón fundamentalmente debidas al asiento plástico en combinación con la retracción plástica.

En relación al secado, los factores antes mencionados alteran severamente la cantidad de agua evaporada de la superficie del hormigón y por lo tanto influyen en la cantidad de retracción total.

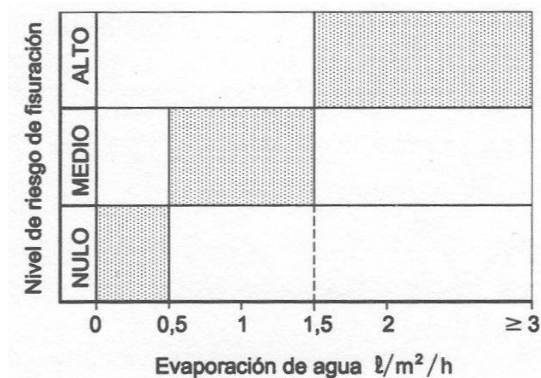


Figura 2.7 – Estimación del nivel de riesgo de fisuración en función de la evaporación (Calavera, 2005)

2.1.2 Retracción a largo plazo

La retracción a largo plazo se mide como el cambio en la longitud en función del tiempo de probetas prismáticas de acuerdo a metodologías establecidas en normas técnicas reconocidas. Estos procedimientos establecen la realización de mediciones a partir de las 24 horas contadas desde el momento en que el hormigón ha sido colocado en el molde, ocasión en que se puede proceder a desmoldar la probeta.

La retracción por secado dura varios años y depende del tamaño y la forma de la pieza de hormigón, factores que se relacionan a la pérdida de humedad. La incidencia de estos factores se considera a través de la relación volumen/superficie. Una alta relación volumen/superficie puede resultar en cantidades bajas de retracción, como se indica en la Figura 2.8. Las probetas más grandes retraen por períodos más largos, pero alcanzan una cantidad final de retracción menor.

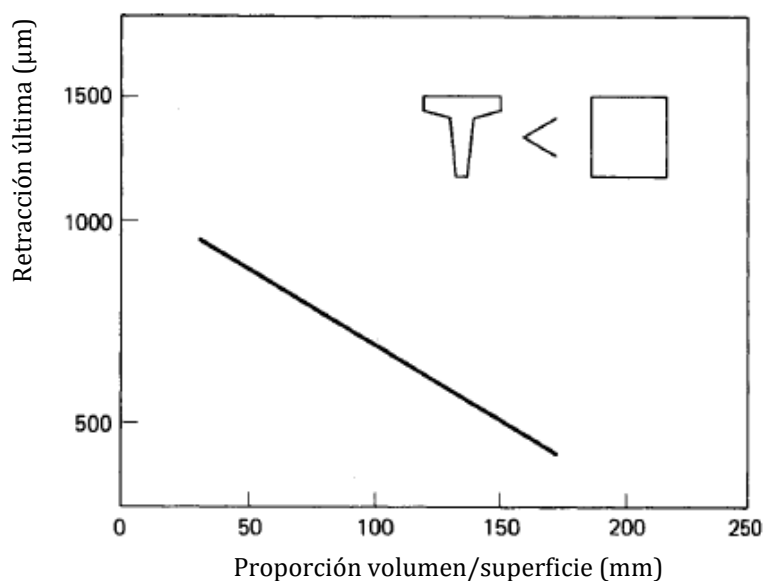


Figura 2.8 – Efecto de la relación volumen/superficie en la retracción por secado del hormigón (Mindess y Young, 1981 *apud* Holt, 2001)

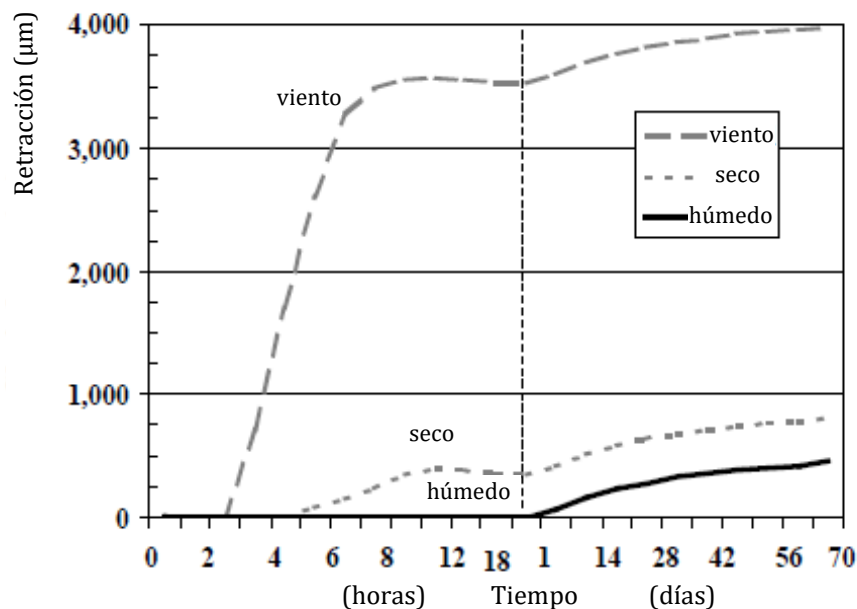
Asimismo, cuando el hormigón se restringe por la existencia de una capa subrasante u otros elementos estructurales, la retracción del hormigón no puede desarrollarse libremente. Esta “retracción restringida” a largo plazo será menor que la “retracción libre” de una pieza sin restricción.

2.1.3 Correlación entre retracción a edad temprana y a largo plazo

Según Holt (2001), no hay correlación entre las magnitudes de retracción a edad temprana y a largo plazo. En algunos casos, si las condiciones de curado son pobres, con un rápido secado, la retracción del primer día puede fácilmente exceder las mediciones a largo plazo como se muestra en la Figura 2.9 para mediciones realizadas durante el primer día en probetas sometidas a diferentes condiciones ambientales.

La retracción a largo plazo debida al secado es equivalente en todos los casos. Sin embargo la retracción correspondiente al primer día tiene diferencias significativas en cuanto al valor que alcanza la retracción total (la correspondiente a las dos etapas) y por lo tanto puede incidir en la fisuración.

En resumen, la retracción es evaluada usualmente a largo plazo, pero en algunas condiciones ésta es insignificante respecto a los cambios de volumen que se dan durante el estado plástico a edad temprana.



Referencias

viento = 2 m/s,
seco = 40% de humedad relativa,
húmedo = 100% de humedad relativa

Figura 2.9 - Acumulación de retracción a edad temprana y a largo plazo, en diferentes ambientes de curado durante el primer día (Holt, 2001)

2.2 TIPOS DE RETRACCIÓN

Como se mencionaba en el apartado anterior, los materiales cementíceos sufren cambios de volumen (retracción y expansión) que resultan fundamentalmente de las propias reacciones internas y del secado del material expuesto a determinadas condiciones ambientales.

A continuación, se describen los principales tipos de retracción, a saber: retracción térmica, por carbonatación, por secado, autógena y química.

2.2.1 Retracción térmica

La retracción térmica refiere al cambio de volumen que ocurre cuando el hormigón se somete a variaciones de temperatura. De acuerdo al diagrama de la Figura 2.1 aparece tanto a edad temprana como a largo plazo. Cuando la temperatura aumenta, el hormigón se expande, y este fenómeno es seguido de contracción por enfriamiento. La expansión térmica causa problemas cuando es alta la tasa de variación de temperatura y cuando existen gradientes de temperatura en la sección transversal del hormigón.

A edad temprana, especialmente en las primeras 12 horas, se puede producir retracción térmica por el calor de hidratación derivado de la hidratación del cemento. En condiciones normales, la pieza no disipa calor a suficiente velocidad y alcanza temperaturas más altas que el ambiente. La retracción térmica, si es coartada, encierra un riesgo potencial de fisuración del hormigón entre el primero y el quinto día de edad. Esto sucede ya sea por el enfriamiento de la zona superficial que es más rápido que el del núcleo y por lo tanto conduce a tracciones en esa zona que pueden provocar la fisuración o por esfuerzos generados entre el hormigón recién vertido y el previamente existente endurecido y enfriado o por el terreno, etc. (Calavera, 2005)

Parte de la expansión térmica es elástica, en ese caso el hormigón vuelve a sus dimensiones originales una vez que se enfría. Pero la parte que no presenta un comportamiento elástico da como resultado retracción a edad temprana. (Holt, 2001)

A edad temprana, el diferencial de temperatura causado por las condiciones ambientales externas en una pieza de hormigón genera esfuerzos que pueden provocar fisuras al no poder alcanzarse la temperatura de equilibrio. Este fenómeno es más riesgoso en estructuras de hormigón en masa de espesor mayor a 1 m. Sin embargo, su magnitud puede ser controlada mediante medidas tales como el empleo de áridos de bajo coeficiente de dilatación térmica, la utilización de bajos contenidos de cemento que tengan bajo calor de hidratación, la selección adecuada de aditivos, la reducción de la velocidad de enfriamiento superficial, el curado adecuado, la disposición de armaduras superficiales que controlen el reparto y ancho de las fisuras o el diseño de juntas de retracción adecuadas, etc. (Holt, 2001; Calavera, 2005)

Cada hormigón tiene un coeficiente de expansión térmica característico que depende de las propiedades individuales de los materiales, tales como tipo de agregado o relación agua/cemento. Según Mehta y Monteiro (2006) los valores típicos del coeficiente de expansión térmica para el hormigón endurecido se encuentran entre $6 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ y $12 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$.

En las edades tempranas el coeficiente de expansión térmica cambia muy rápidamente a medida que el hormigón aumenta su resistencia, alcanzando valores altos en las primeras horas. A largo plazo, la expansión térmica se produce como resultado de las variaciones de la temperatura del ambiente circundante. El hormigón se puede fisurar si las tasas de retracción o expansión son demasiado severas. (Holt, 2001)

Las expansiones térmicas también pueden causar problemas si se restringe de alguna manera el movimiento del hormigón y no queda espacio para que ocurra el cambio de volumen. Este es el caso de piezas de hormigón extensas, en las que se restringe su movimiento y no se realizan juntas. (Holt, 2001)

2.2.2 Retracción por carbonatación

Este tipo de retracción se debe a la ocurrencia de carbonatación y es de poca entidad. La carbonatación es una reacción química que sucede cuando el hidróxido de calcio de la pasta de cemento en estado endurecido reacciona con la humedad y el dióxido de carbono del aire, formando carbonato cálcico insoluble, ver Fórmula (1). Esta reacción provoca retracción junto con una reducción en el pH del hormigón. La disminución del pH del hormigón puede derivar en otras formas de deterioro, por ejemplo la corrosión de las armaduras. A su vez, la corrosión puede causar expansión, fisuración y desprendimiento del hormigón.



La cantidad de carbonatación depende de la densidad y calidad del hormigón pero es usualmente limitada a 2 cm de profundidad desde la superficie expuesta. También depende de la edad del hormigón y de las condiciones ambientales circundantes. (Holt, 2001)

2.2.3 Retracción por secado

La retracción por secado se refiere a la reducción de volumen del hormigón provocado por la pérdida de agua del mismo. A partir del momento del vertido y compactación, el agua libre se desplaza a la superficie del hormigón como agua de exudación, al mismo tiempo que las partículas de agregado se asientan. El agua de exudación se puede evaporar al ambiente. Si esto sucede, el hormigón queda sujeto a secado y el agua en exceso es atraída desde el interior de la masa de hormigón. La retracción por secado a edad temprana, usualmente da como resultado la aparición de fisuras superficiales.

Según establece Calavera (2005) la exudación sólo puede reducirse (no anularse) a través de: la utilización de menor contenido de cemento, adiciones en el cemento o adiciones al hormigón de finura comparable a la del cemento, reducción de la relación agua/cemento, control riguroso del tipo y calidad si se usan retardadores y empleo de agentes aireantes.

La retracción por secado se produce debido simultáneamente a reacciones químicas y a la reducción de humedad. Se controla con la utilización de armadura adecuadamente dispuesta que controle la separación y el ancho de las fisuras así como con el curado que, aunque a largo plazo no modifica la retracción total, mejora a corto plazo la resistencia y la deformabilidad

del hormigón a tracción, reduciendo el riesgo de fisuración. Calavera (2005)

La retracción por secado crece con la relación agua/cemento, con el contenido de cemento y la sequedad del ambiente. Fisuras que aparecen a edad temprana no deben ser atribuidas a la retracción por secado, ya que su desarrollo en ese plazo alcanza valores despreciables. Calavera (2005)

Los mecanismos que causan retracción por secado dependen del tamaño de los poros internos. La pasta de cemento hidratada, además de sólidos, contiene diferentes tipos de huecos que influyen en sus propiedades. Los tamaños usuales de la fase sólida y los huecos de una pasta de cemento hidratada se indican en el esquema de la Figura 2.10.

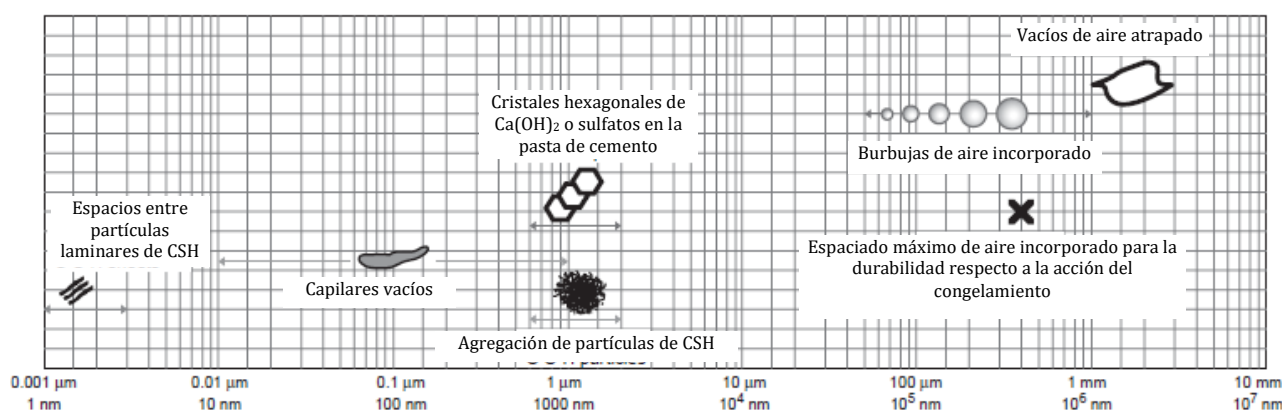


Figura 2.10 – Dimensiones de sólidos y poros en la pasta de cemento hidratada (Mehta y Monteiro, 2006)

Los capilares corresponden al espacio que no se llena por los componentes sólidos de la pasta de cemento hidratada. La hidratación es un proceso en el que el espacio originalmente ocupado por cemento y agua va siendo reemplazado por los productos de la hidratación. El agua en exceso dentro de los capilares es removida por las reacciones de hidratación del cemento. En consecuencia, el tamaño de los capilares se va reduciendo, hasta tamaños en el orden de 0,01 μm , a medida que se forma una microestructura más densa.

La retracción por secado se asocia principalmente a la remoción del agua adsorbida de la pasta de cemento hidratada. La fuerza conductora es el diferencial de humedad relativa entre el hormigón y el ambiente.

El agua capilar es el agua presente en los espacios mayores a 50 Å. El agua contenida en los capilares de la pasta de cemento hidratada se puede clasificar en agua libre, que es el agua situada en espacios con un tamaño mayor de 50 nm (su remoción no causa cambios en el volumen), y agua mantenida por tensión capilar en pequeños capilares (de tamaño entre 5 nm y 50 nm), cuya remoción puede causar retracción en el sistema.

Según Mehta y Monteiro (2006), con cantidades equivalentes de cemento en una pasta, la microestructura es más densa a medida que descende la relación agua/cemento. En pastas de cemento bien hidratadas con baja relación agua/cemento, los capilares pueden promediar de

10 a 50 nm; en pastas con alta relación agua/cemento, a edades tempranas de hidratación, los capilares pueden alcanzar dimensiones de entre 3 a 5 μm .

Con el propósito de mejorar la durabilidad de hormigones de alta resistencia, la permeabilidad se reduce a través de microestructuras más densas, compuestas por poros pequeños y con similar volumen total de poros a los hormigones convencionales. Se genera una estructura más fina modificando los componentes del hormigón, por ejemplo, incluyendo humo de sílice. Según Lea (1998) *apud* Holt (2001), el humo de sílice, o microsílíce, modifica la estructura de poros, subdividiendo los poros más grandes pero manteniendo igual volumen total de poros.

La interacción de los espacios de poros y el agua interna está influenciada por el movimiento del agua. Si durante el secado del hormigón fresco, la tasa de evaporación excede la cantidad de agua de exudación se produce pérdida de agua interna que causa la retracción por secado.

Powers (1968) *apud* Holt (2001) establece cómo cambia el agua superficial y cómo esto se relaciona con los espacios de poros:

“la superficie del líquido se convierte en una multitud de superficies curvas (meniscos), entre las partículas, que son cóncavas. Puesto que la presión de fluido en el lado convexo de un menisco es menor que la del lado cóncavo, es decir, menor que la presión atmosférica, la diferencia constituye una fuerza motriz en el mismo sentido a la gravedad que empuja a las partículas superficiales hacia abajo. La curvatura de la superficie del agua está limitada por las dimensiones de los espacios intersticiales entre partículas superficiales”

Radocea (1992) *apud* Holt (2001) muestra un esquema para dos partículas de cemento ubicadas en la superficie de la pasta sujeta a secado, ver Figura 2.11. En este caso el agua de evaporación (W) excede el agua de exudación (W_s). Esto genera esfuerzos y hace que los meniscos bajen, aumentando la presión capilar.

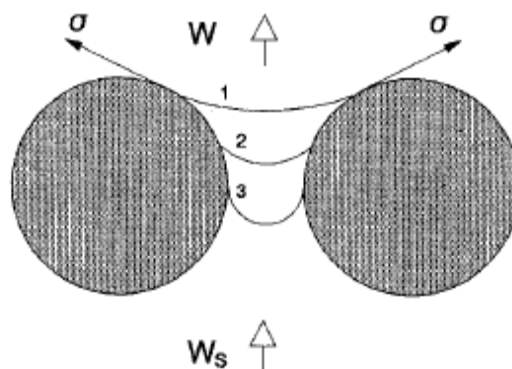


Figura 2.11 – Esfuerzos entre dos partículas de cemento que empujan los meniscos de agua hacia abajo, debido a la transferencia de humedad y al desarrollo de presión capilar (Radocea, 1992 *apud* Holt, 2001)

La presión del agua en los poros, o succión, que se genera en la pasta de hormigón se debe a las fuerzas de capilaridad. La fuerza de capilaridad resultante entre el agua y el aire está en función del radio de curvatura del menisco. Esta succión, s , está dada por la ecuación de Laplace, ver Fórmula(2) (Janz, 2000 *apud* Holt, 2001).

$$s = \frac{2\sigma}{r} \quad (2)$$

donde

s es la presión de succión (Pa),

σ es la tensión superficial de la interfase aire-agua ($\sim 0,074$ N/m), y

r es radio del menisco (m)

En resumen, la presencia de meniscos causa esfuerzos de tensión en el poro. (Lura, Jensen y Breugel, 2003)

Según Czernin (1980) *apud* Holt (2001), como el diámetro de los capilares decrece, la presión capilar (y por lo tanto la retracción) se incrementa en consecuencia. Según Scherer (1999) *apud* Holt (2001), la presión capilar está en el orden de los 10 a los 100 MPa debido a los cambios de humedad.

Otra relación útil para la interpretación del efecto de los tamaños de los poros está dada en la ecuación de Kelvin, ver Fórmula (3) presentada por Janz (2000) *apud* Holt (2001). En esta ecuación la humedad relativa dentro de un cuerpo se relaciona con el tamaño del poro capilar.

$$\ln \emptyset = \frac{2\sigma M}{\rho R T r} \quad (3)$$

donde

$\emptyset$ es la humedad relativa,

M es el peso molecular del agua (18 kg/Kmol),

ρ es la densidad del agua (998 kg/m³),

R es la constante del gas (8,214 J/(KmolK),

T es la temperatura (K), y

r es radio del poro (m)

Se demuestra que cuando el tamaño del poro decrece, la humedad relativa interior rápidamente cae, lo que provoca la generación de esfuerzos y retracción. La fórmula de Kelvin se grafica en la Figura 2.12 con una escala logarítmica en el eje de abscisas para el radio del poro y temperatura de 20°C.

Las ecuaciones de Laplace y Kelvin pueden ser combinadas para mostrar la relación entre la humedad relativa y la presión, según la Fórmula (4) de Janz (2000) *apud* Holt (2001). Esta relación se grafica en la Figura 2.13, donde la presión se incrementa drásticamente cuando decrece la humedad. Esto sirve para comprender como un cambio en la humedad interna del hormigón puede generar grandes esfuerzos dentro del sistema, que luego conducen a la retracción.

$$\ln \emptyset = \frac{sM}{RT\rho} \quad (4)$$

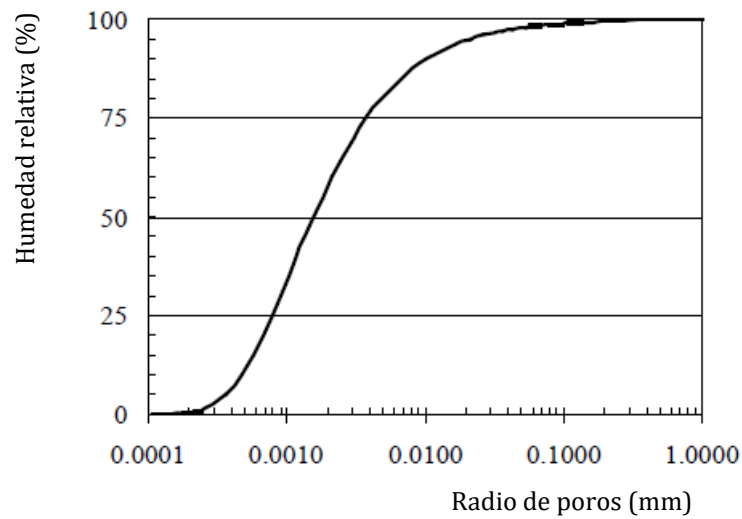


Figura 2.12 – Relación de la humedad relativa en función del radio del poro vacío basada en la ecuación de Kelvin a T=20°C (Holt, 2001)

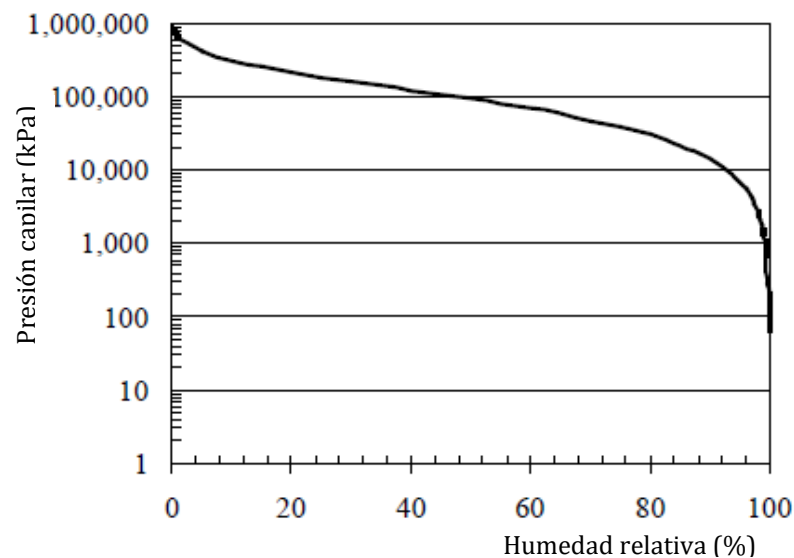


Figura 2.13 – Relación de la humedad relativa y la presión (succión) (Holt, 2001)

Una medida final de la cantidad de esfuerzo inducida por el vaciamiento de los poros puede ser mostrada por un aumento en la altura del agua de los capilares. La altura del agua de los capilares es una función del radio de los poros, como fue establecido por Washburn (1921) *apud* Holt (2001), ver Fórmula (5). Como el radio decrece, la altura del agua en los capilares se incrementa. Esto se traduce en un incremento en el esfuerzo y por lo tanto en retracción.

$$h = \frac{2\sigma \times \cos\alpha}{r \times \rho \times g} \quad (5)$$

donde

h es la altura en el capilar,

α es el ángulo de contacto entre el agua superficial y la pared del poro, y

g es la aceleración debida a la gravedad.

Las magnitudes de retracción por secado son altamente dependientes de la cantidad de agua perdida y de la tasa de evaporación.

La retracción es típicamente medida en una escala lineal, con la conversión de las mediciones direccionales a cambio de volumen total, ver Fórmula (6).

$$\text{cambio de volumen} = 1 - \left(1 - \frac{\text{retracción}}{\text{longitud}} \right) \quad (6)$$

Según Holt (2001), los valores de retracción por secado están en el orden de $500 \mu\epsilon$ a $1000 \mu\epsilon$ ($0,5 \text{ mm/m}$ a 1 mm/m) a largo plazo, pero en algunos casos, pueden exceder $5000 \mu\epsilon$ (5 mm/m), incluyendo el secado acelerado en edades tempranas.

La exposición de una pieza de hormigón sin restricciones a bajas condiciones de humedad relativa provoca retracción por secado, la cual aumenta con el tiempo. Sin embargo, si la pieza está restringida, es decir, no está libre de movimiento, la tensión será cero, pero, con el tiempo, se desarrollarán esfuerzos de tracción y se producirán fisuras debido a la retracción por secado. (Mehta y Monteiro, 2006)

De acuerdo a lo que establece Mehta y Monteiro (2006), el hormigón sometido a periodos de secado y rehumedecimiento no vuelve a su dimensión original, ver Figura 2.14. De allí que la retracción por secado se divide en retracción reversible e irreversible, según se pueda reproducir o no en ciclos de secado y humedecimiento. La retracción por secado irreversible se debe probablemente al desarrollo de enlaces químicos dentro de la estructura de CSH como consecuencia del secado.

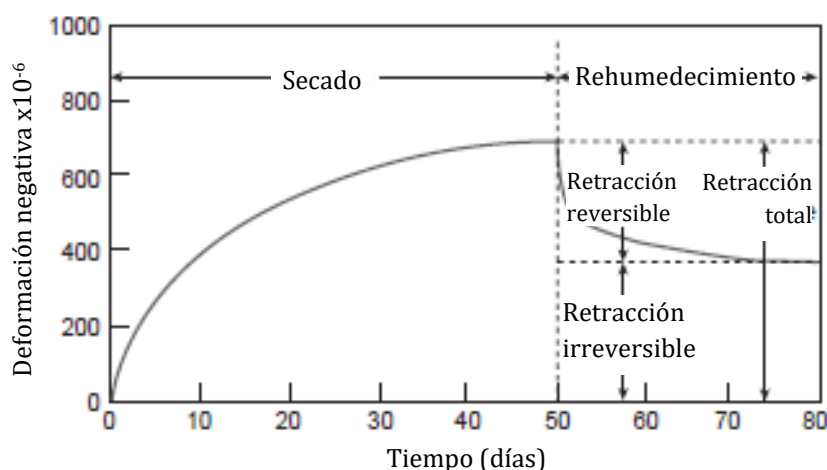
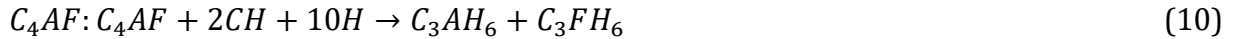


Figura 2.14 – Reversibilidad de la retracción por secado (Mindess y Young, 1981 *apud* Mehta y Monteiro, 2006)

2.2.4 Retracción Química

La retracción química es un resultado de las reacciones producidas por la mezcla del cemento y el agua que provocan una reducción del volumen. En las primeras horas después del mezclado, la retracción autógena está completamente relacionada a la retracción química.

El cemento es un componente del hormigón que produce reacciones químicas con el propósito de aglomerar la masa. Las reacciones básicas del clinker de cemento son definidas mediante las siguientes ecuaciones de las fases del clinker, ver Fórmulas (7) a (10). (Paulini, 1992; Lea, 1998 *apud* Holt, 2001)



La retracción química se basa en la relación entre los volúmenes de los productos iniciales y finales tal como se muestra en la Fórmula (11).

$$CS = \frac{(V_c + V_w) - V_{hy}}{V_{ci} + V_{wi}} \times 100 \quad (11)$$

donde

- CS es la retracción química,
- V_{ci} es el volumen de cemento antes del mezclado,
- V_c es el volumen de cemento hidratado,
- V_{wi} es el volumen de agua antes del mezclado,
- V_w es el volumen de agua que reacciona, y
- V_{hy} es el volumen de los productos de hidratación.

Basado en la ecuación de Boyles, Paulini (1996) ha modelado teóricamente, en el gráfico de la Figura 2.15, los componentes individuales del clinker que influyen en la retracción autógena. El modelo de Paulini muestra la expansión del C_2S en el primer día, mientras que los demás componentes se retraen. Esto se debe a las reacciones superficiales del C_2S y su comportamiento polimórfico. Paulini (1990) también atribuye la expansión a la presencia de agentes retardadores, que disminuyen el tiempo de fraguado. El C_3A reacciona rápidamente durante las primeras horas, mientras que las reacciones del C_3S y el C_4AF son mucho más lentas y graduales durante varios días. (Holt, 2001)

Otra manera de analizar las reacciones químicas es considerando matemáticamente los volúmenes producto basándose en su peso y densidad. Como se muestra en las Fórmulas 7 a 10, cada uno de los cuatro compuestos del clinker de cemento requieren agua para reaccionar. Estos procesos son exotérmicos y provocan un decrecimiento del volumen de los productos de reacción. Esta reducción del volumen, o retracción química, empieza inmediatamente después del mezclado del agua con el cemento y la relación es mayor durante las primeras horas o días. La cantidad de retracción química puede ser determinada analizando como cambian los pesos moleculares y las densidades de los componentes de los productos a partir de los productos básicos de reacción.

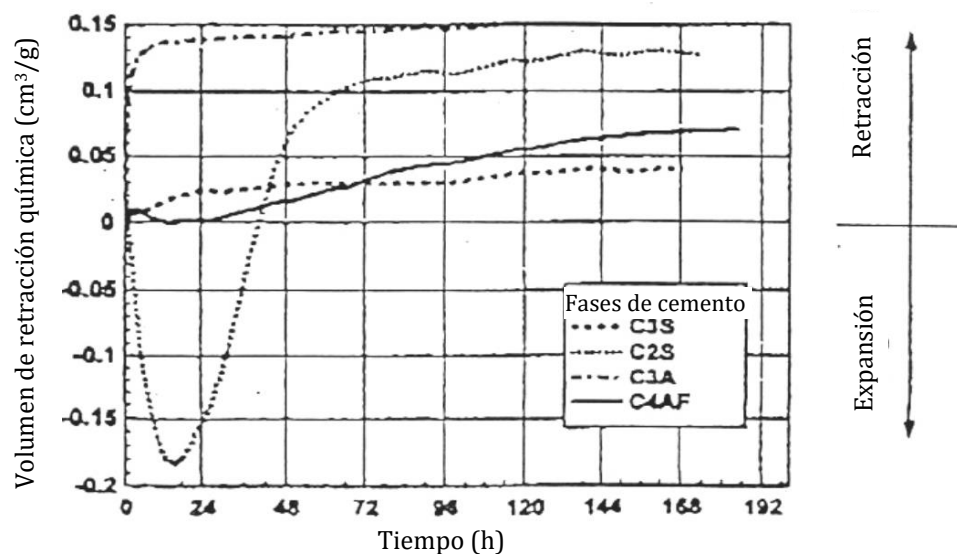


Figura 2.15 – Modelo de la influencia de la composición del cemento en la retracción química (Paulini, 1996 *apud* Holt, 2001)

La diferencia entre el volumen molecular del producto básico, V_b , y el producto de reacción, V_r , da el volumen de retracción, V_s . Entonces, para determinar el volumen de retracción química, V_{CS} , es necesario relacionar el volumen de retracción con la masa original, M , del sólido del producto básico, mediante la Fórmula (12).

$$V_{CS} = \frac{V_s}{M} \quad (12)$$

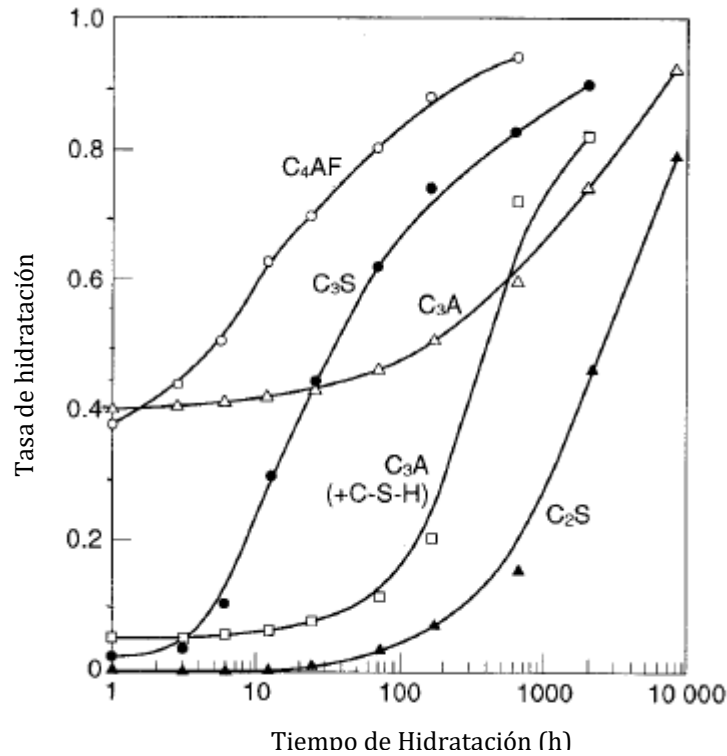
Las cuatro fases individuales pueden ser calculadas de la misma manera y así predecir el total de retracción química del cemento.

La retracción química de la pasta de cemento no es afectada por la relación agua/cemento. (Gagné et al., 1999) La relación agua/cemento y la finura del cemento sólo podrá afectar la tasa de retracción química. La hidratación de un cemento fino avanza rápidamente mientras que un cemento molido grueso tendrá una hidratación más lenta. La cantidad final de retracción química, entendida como el grado de hidratación que se aproxima a 100%, solo se ve influenciada por la composición química del cemento. (Holt, 2001)

Por lo tanto, se sabe que las reacciones químicas empiezan inmediatamente después de mezclar el cemento con el agua, pero la química real del cemento puede variar la cantidad de retracción química que se produce. Como se muestra más adelante en la Figura 2.21 del apartado 2.2.5, la retracción autógena se desvía a partir de determinado momento de la retracción química, por lo que es importante identificar cuáles son los componentes del clinker que van a reaccionar a partir de ese momento. (Holt, 2001)

Los cuatro componentes del clinker de cemento tienen diferente hidratación cuando están en contacto con agua al inicio del proceso de mezclado. Los grados de hidratación para los componentes puros individuales del clinker y para el cemento portland son presentados por

Lea (1998) y se muestran en las Figuras 2.16 y 2.17, respectivamente. Estos gráficos muestran diferentes escalas de tiempo en el eje x y representan en el eje y el grado de hidratación, con 1 (o 100%) como máximo.



NOTA: Tasa de hidratación 1= 100 % de hidratación

Figura 2.16 – Cinética de hidratación típica de los minerales puros del cemento en función de la hidratación de la pasta a temperatura ambiente (Lea, 1998 *apud* Holt, 2001)

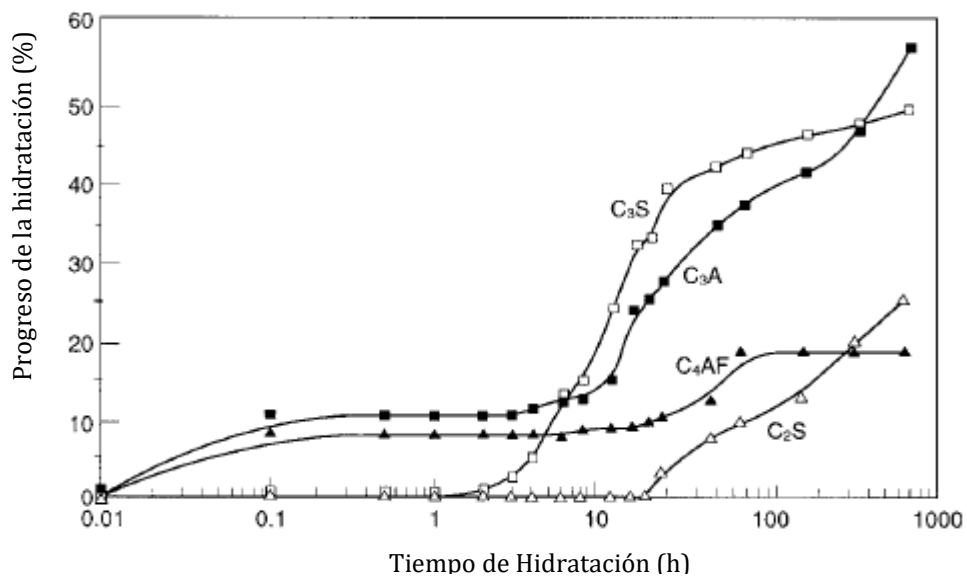


Figura 2.17 – Cinética de hidratación de cemento portland común, (hidratación de la pasta a temperatura ambiente) (Lea, 1998 *apud* Holt, 2001)

Cuando los componentes individuales del clinker, tal como el C_3A , reaccionan en presencia de yeso (CSH) el grado de hidratación disminuye como resultado de la formación de etringita temprana. Esto se observa en la Figura 2.16 en las diferentes curvas de C_3A , donde el yeso contribuye al crecimiento de cristales de etringita que bloquean la hidratación del C_3A . (Virola y Raivio, 2000 *apud* Holt, 2001). En la Figura 2.17 se incluye el yeso en la reacción del cemento portland, por lo tanto la cantidad de C_3A hidratado es menor. El cambio en la hidratación última de C_4AF de 40% a 90% en la Figura 2.17 comparado con la Figura 2.16 es también atribuida a la presencia de yeso y al crecimiento de cristales de etringita. (Holt, 2001)

Para la interpretación de la retracción química a edad temprana, es deseable una combinación de los dos gráficos de hidratación. La Figura 2.16 proporciona una escala de tiempo de la hidratación aproximada al 90% mientras que la Figura 2.17 proporciona mediciones tempranas (< 1 hora) y una mejor representación del C_4AF hidratado. (Holt, 2001)

2.2.5 Retracción Autógena

La retracción autógena es el cambio de volumen que ocurre cuando no se permite la transferencia de humedad al ambiente. Esta reducción de volumen es atribuida a los cambios asociados a las reacciones químicas de los componentes y a los cambios estructurales internos que se producen en la matriz cementícea.

En otras palabras, la retracción autógena es el resultado de la retracción química relacionada con la hidratación del hormigón en un sistema cerrado sin intercambio con el exterior y es una consecuencia de la retracción química. (Aitcin et al., 2008)

Holt (2001) sostiene que la fuerza conductora de la retracción autógena es la retracción química tanto durante la etapa líquida, de formación del esqueleto y en el endurecimiento. La retracción química ocurre desde las primeras reacciones al mezclar el agua con el cemento, es inevitable y va a permanecer mientras se produzca la hidratación del cemento. Es por esta razón que la retracción autógena no puede ser evitada pero puede ser minimizada considerando los parámetros que intervienen en la mezcla.

Mehta y Monteiro (2006) agrega que la retracción autógena no incluye cambios de volumen debido a la pérdida o ingreso de sustancias, variación de temperatura o aplicación de una fuerza externa o restricción.

Los cambios de volumen causados por retracción química y autógena se representan en el gráfico de la Figura 2.18. Este gráfico de barras muestra como la retracción autógena es una porción de la retracción química. Mientras la retracción química es una reducción de volumen interna, la retracción autógena es un cambio de volumen externo, lo que hace posible medirla como un cambio lineal en una probeta de matriz cementícea. Cuando la humedad relativa interna se reduce por debajo de un umbral dado (es decir, el exceso de agua no está disponible) se produce la autodesecación de la pasta, lo que resulta en una reducción uniforme de volumen. (Jensen y Hansen, 1996)

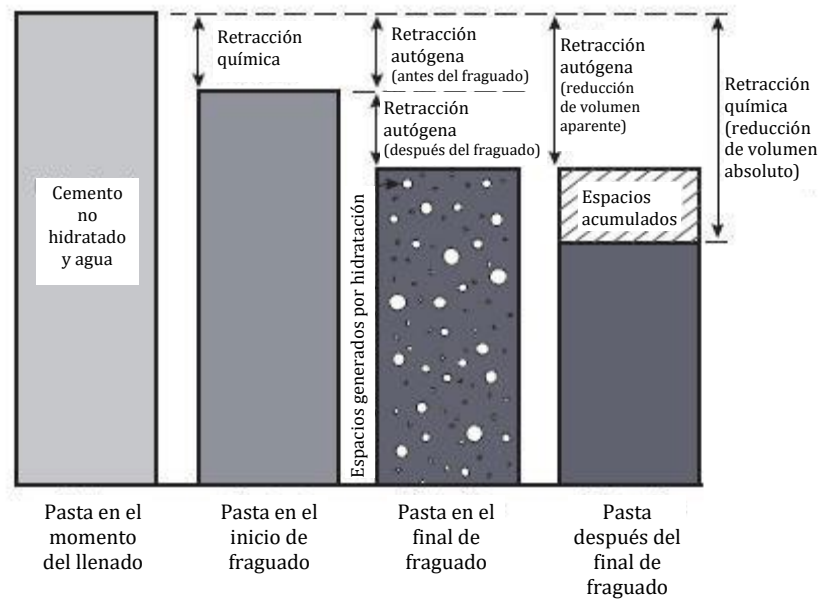


Figura 2.18 – Cambios de volumen causados por retracción química y retracción autógena en hormigón fresco (D'Ambrosia, 2015)

La retracción autógena fue inicialmente descrita por Lyman en 1934 y por Davis en 1940 como un factor que contribuye a la retracción total asociado a la retracción química del cemento portland. (Holt, 2001; Lee et al., 2006; Esping, 2007; Aitcin et al., 2008; Hai y Zhu, 2009) Lyman define retracción autógena como la retracción que se observa en ausencia de secado, a temperatura constante, en un hormigón no sometido a la acción de cargas y en ausencia de cualquier fuente externa de agua.

Si bien su descubrimiento data de los años 30 y 40, recién en la década de los años 90 se le presta atención a este fenómeno debido a su relevancia en hormigones de alto desempeño (con resistencias a la compresión mayores de 40 MPa) que tienen una baja relación agua/cemento. (Jensen y Hansen, 2001a; Lura, 2003)

Según Bentz y Peltz (2008) los hormigones especiales son usualmente más susceptibles a la fisuración temprana en comparación con los hormigones convencionales. Algunas razones para ello pueden ser los altos contenidos de cemento, el uso de cementos más finos con alto contenido de silicato tricálcico y contenidos de álcalis, la formación de la matriz de pasta densa mediante la reducción de la relación agua/cemento y la adición de finas puzolanas.

Según Aitcin et al. (2008) cualquiera sea la relación agua/aglomerante, la retracción química que ocurre durante la hidratación del cemento está restringida por la estructura de la pasta y el esqueleto granular. De esta manera se genera una porosidad muy fina que drena el agua contenida en los capilares gruesos.

A medida que se desarrolla la hidratación, se continúa drenando de la red capilar, de manera que los meniscos se transforman en capilares cada vez más finos y las tensiones de tracción desarrolladas en la superficie de estos meniscos aumentan. Son estas tensiones desarrolladas dentro de los capilares las responsables de la retracción volumétrica. Cuando la hidratación se

detiene, la retracción autógena también se detiene porque no se forman más meniscos en el sistema cerrado.

Luego, Aitcin et al. (2008) agregan que cuando hay una fuente externa de agua se produce la retracción volumétrica absoluta de la pasta. La porosidad muy fina que se crea succiona el agua de los capilares más gruesos del mismo modo que en el caso anterior, pero al mismo tiempo, los capilares más gruesos succionan un volumen equivalente de agua de la fuente externa.

Entonces en este caso, no hay meniscos que se formen dentro de la red capilar y, por lo tanto, el volumen aparente de la pasta de cemento no reduce su tamaño; por el contrario, se expande. La retracción química es la misma que en el caso anterior, la diferencia radica en que en este caso no da lugar a la formación de meniscos.

Por último, Aitcin et al. (2008) afirman que cuando una parte del hormigón en que la nanoporosidad creada por la retracción química desconecta la red capilar de una fuente externa de agua existente, esa parte del hormigón continúa hidratándose como un sistema cerrado.

O sea que se reproduce lo explicado en el primer caso, por lo tanto se desarrolla retracción autógena en esa zona localizada del hormigón. En tales casos, los meniscos que aparecen dentro de la zona de hormigón desconectada de la fuente externa de agua son los responsables de la retracción volumétrica local.

Dicho esto, se puede visualizar claramente que la retracción autógena es insignificante en aquellos hormigones en que la relación agua/aglomerante es alta (más de 0,50). Estos hormigones presentan una gran red capilar en términos de volumen, con capilares gruesos con grandes diámetros, a través de los cuales el agua capilar es muy fácilmente succionada por la nanoporosidad resultante de la retracción química. Los meniscos que se forman generan fuerzas de tracción muy débiles que no favorecen el desarrollo de retracción autógena. (Aitcin et al., 2008)

Sin embargo, a partir de que el uso de superplastificantes posibilitó la utilización de hormigones con relaciones agua/aglomerante bajas, el volumen de la red capilar inicial se redujo drásticamente, así como el diámetro de los capilares. En este caso, más partículas de cemento se hidratan por unidad de volumen.

En consecuencia, se pueden generar grandes fuerzas de tracción en la primera etapa de hidratación cuando el hormigón todavía no ha desarrollado una fuerte resistencia a la tracción. Se concluye que si bien se consigue un material con buena trabajabilidad en estado fresco, que permite una adecuada colocación, alta resistencia y durabilidad mejorada, cuanto más baja es la relación agua/aglomerante, la porosidad disminuye y se produce discontinuidad capilar de la estructura de poros de la pasta, lo cual provoca el desarrollo más temprano y mayor de retracción autógena.

Las microfisuras debidas a la retracción autógena se pueden conectar formando un patrón de fisuración continuo que termina generando macrofisuras. Esta fisuración representa un problema respecto a resistencia, durabilidad y estética. Por lo tanto, según Paillere et al. (1989) *apud* Lura (2003) se debería limitar la retracción autógena ya que puede provocar micro y macrofisuras y perjudicar la calidad del hormigón.

Los factores que influyen en la magnitud de retracción autógena se desarrollan más adelante en el apartado 2.5. Es conocido, que la retracción autógena no se puede prevenir mediante la utilización de diferentes métodos de encofrado, colocación o curado, sí debe ser tomada en cuenta al establecerse la dosificación.

Holt (2001) explica cómo se desarrolla la retracción autógena durante tres diferentes fases a edad temprana: fase líquida, fase de formación del esqueleto y fase de endurecimiento.

En primer lugar, la fase líquida comienza inmediatamente después de mezclar el agua y el cemento. El cambio de volumen por retracción química ocurre debido a la ocurrencia de la reacción de hidratación. En esta primera fase, mientras el hormigón está aún líquido, la retracción autógena es equivalente a la retracción química.

De acuerdo a estudios de Jensen y Hansen (2001a), la reducción de volumen se refiere a retracción de fraguado y puede alcanzar el 1 % en volumen, según se muestra en la Figura 2.19. Después del fraguado la retracción química puede ser hasta 50 veces mayor que la deformación autógena en volumen.

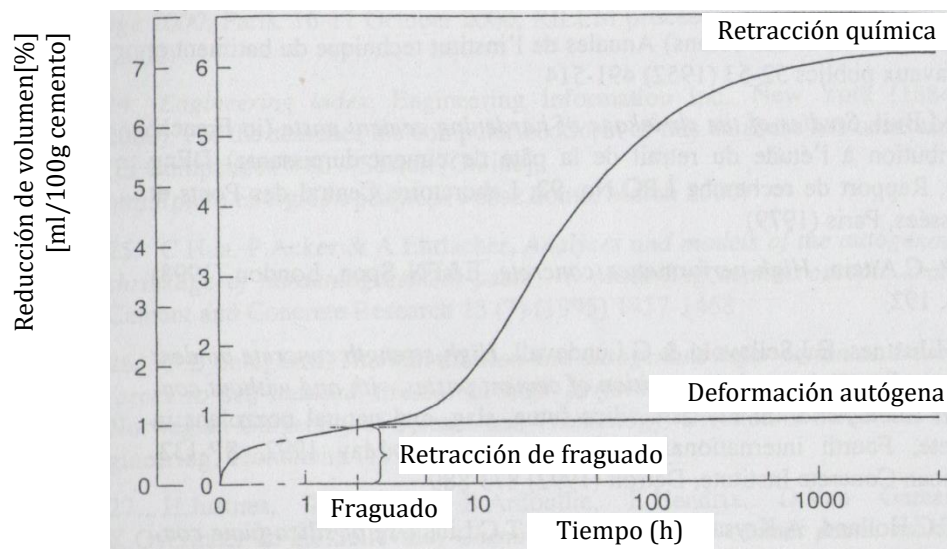


Figura 2.19 – Esquema de los cambios de volumen que tiene lugar en una pasta de cemento sellada (Jensen y Hansen, 2001a)

A continuación, sigue la fase de formación del esqueleto, en que se rigidiza la pasta y el hormigón es capaz de resistir algunos de los esfuerzos de la retracción química. Inmediatamente el hormigón comienza a fraguar. Durante esta etapa se desarrolla presión capilar, que puede causar retracción.

Este mecanismo de presión, como ya se explicó anteriormente, trabaja con agua que forma meniscos en los capilares y se desplaza entre los poros. Como el agua se moviliza continuamente hacia poros cada vez más pequeños, se generan esfuerzos mayores en las paredes de los poros capilares, lo que causa nuevamente retracción en la pasta de cemento.

El momento en que la retracción autógena pasa de estar en función de la retracción química para estar en función de la autodesecación depende del grado de hidratación del cemento. La autodesecación se define como el secado localizado de los poros internos del hormigón.

Los cambios que ocurren durante la formación del esqueleto rígido se resumen en el gráfico de la Figura 2.20. En la primera fase, cuando el hormigón está aún líquido, la retracción autógena es proporcional al grado de hidratación, lo cual se aprecia en el sector AB del gráfico.

Una vez que el esqueleto se ha formado, la retracción química comienza a estar más restringida, esto se representa en el sector BC del gráfico. A partir del punto C el material es rígido y la retracción autógena se relaciona cada vez menos con la retracción química. Según Boivin et al., 1999 *apud* Holt, 2001, las siguientes reducciones de volumen pueden ser solamente adjudicadas a la autodesecación.

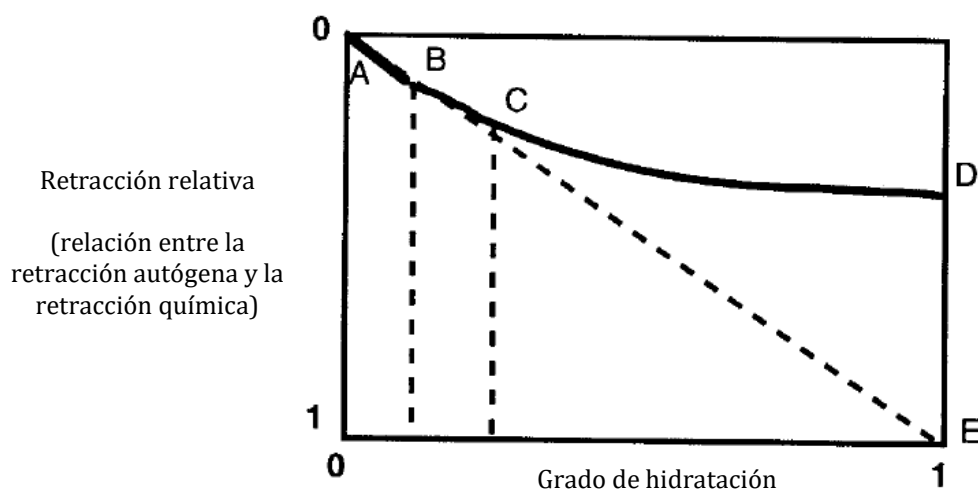
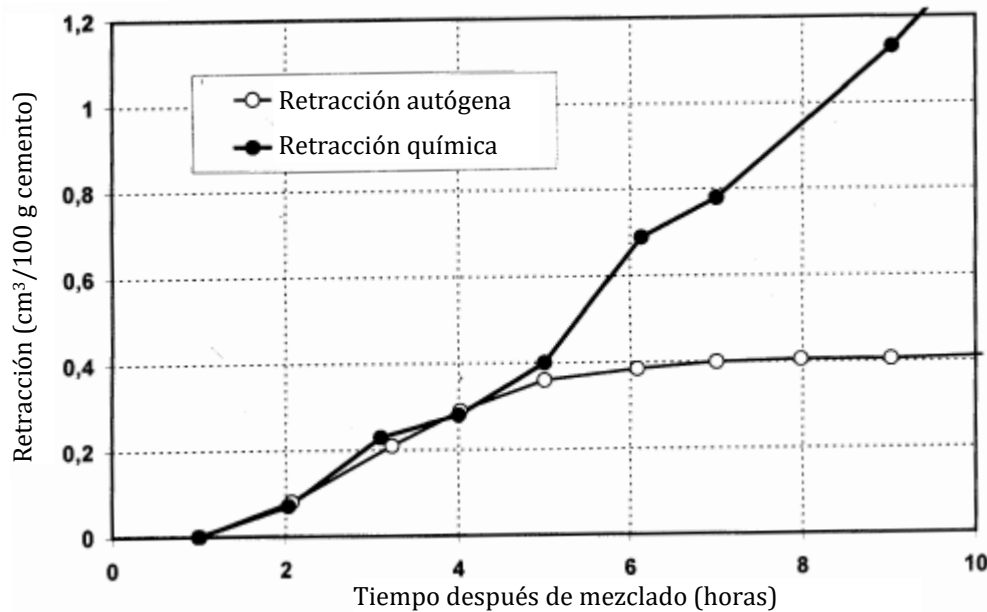


Figura 2.20 – Evolución de la retracción autógena en función del grado de hidratación (Acker, 1988, *apud* Holt, 2001)

Análogamente, Hammer (1999) *apud* Holt (2001) muestra en el gráfico de la Figura 2.21 los resultados de ensayos realizados simultáneamente de retracción química (ensayos de botella) y de retracción autógena (ensayos de membrana de goma fina) en pastas de cemento. Allí se puede ver que una vez que el esqueleto comienza a formarse, a partir aproximadamente de 5 horas, la retracción autógena diverge de la retracción química. Pero durante las primeras horas la retracción autógena puede ser atribuida completamente a los cambios químicos producidos por la hidratación del cemento.

Finalmente, una vez que el hormigón ha endurecido, o sea a edades mayores a un día, la retracción autógena a largo plazo no es el resultado de la retracción química. A largo plazo, dicho de otro modo, a partir que el esqueleto rígido se forma y puede resistir la retracción

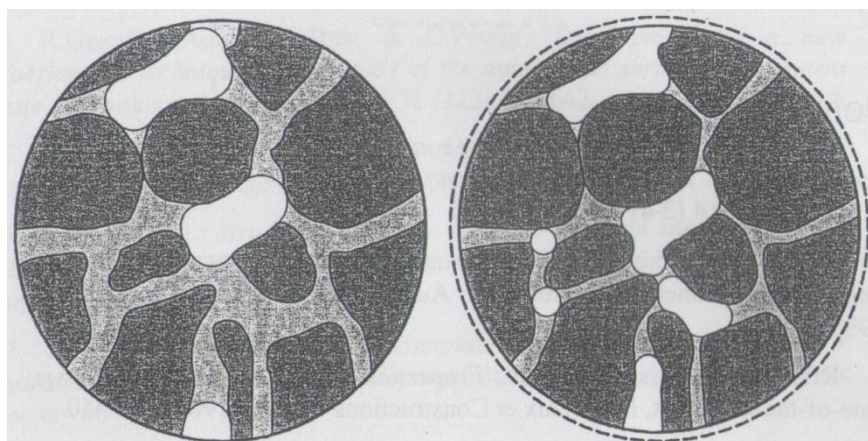
química, la retracción autógena se debe a la autodesecación. En este caso la autodesecación es el secado localizado resultado de un descenso de la humedad relativa. Este descenso de humedad se debe a que el cemento requiere agua extra para su hidratación.



NOTA: Pasta de cemento con relación agua/aglomerante de 0,40 y 5% de humo de sílice

Figura 2.21 – Retracción química por el método de la botella y retracción autógena volumétrica por el método de membrana fina de goma. (Hammer, 1999 *apud* Holt, 2001)

La autodesecación no empieza inmediatamente después del llenado del molde y ocurre durante un largo periodo de tiempo luego de la retracción química. Esto implica un riesgo, solamente, cuando no se dispone de agua para la hidratación del cemento en la pasta. Puede ocurrir después de algunas horas o días en hormigones de alta resistencia.



Bajo grado de hidratación

Alto grado de hidratación

Referencias

Gris oscuro- Sólidos: productos de hidratación, cemento no hidratado, humo de sílice, etc.
Gris claro- Agua en los poros
Blanco- Volumen de poros vacíos

Figura 2.22 – Representación esquemática de una sección transversal de pasta de cemento hidratada (Jensen y Hansen, 2001a)

En síntesis se detallan los efectos del proceso de hidratación descritos por Jensen y Hansen (2001a) y representados en el esquema de la Figura 2.22: a) reducción de la cantidad de agua en los poros debido a la aglomeración en los productos de hidratación, b) incremento de la cantidad de material sólido, c) refinamiento de la estructura de poros, d) formación de volumen de poros vacíos debido a la retracción química, e) disminución del radio de curvatura de los meniscos, y f) la retracción aparente debido al incremento de esfuerzos de tracción en los poros con agua, es decir: retracción por autodesecación.

2.2.6 Retracción Total

La retracción total se define como la suma de cada cambio de volumen individual debido a la carbonatación, la expansión térmica, las deformaciones por secado y autógenas. Sin embargo, a causa de que la expansión térmica es reversible con el transcurso del tiempo, es usual que no se incluya en el cálculo de la retracción total. Por otro lado, la retracción por carbonatación y la retracción térmica por lo general se desprecian por no ser de magnitud relevante.

Holt (2001) afirma que algunos códigos de diseño asimilan la retracción total solamente al valor de la retracción por secado a largo plazo, lo cual considera erróneo. Como se mencionaba antes, la retracción que se produce a edades tempranas puede ser igual o exceder los valores a largo plazo, sobre todo en hormigones de alta resistencia con relación agua/cemento baja (menor de 0,42).

En relación a la retracción autógena, que si bien no puede ser evitada, en muchos casos se asume que es muy pequeña y por lo tanto se desprecia. En hormigones de resistencia convencional con relación agua/cemento mayor de 0,42 no se detecta la retracción autógena. En esos casos, el hormigón tiene suficiente agua, que proviene de la reabsorción del agua tanto de la exudación o del curado, como para permitir la hidratación total. Esto es así, debido a que se trata de pastas de alta permeabilidad que permiten la transferencia de agua.

En contraposición, de acuerdo a estudios de Tazawa y Miyazawa (1993) *apud* Aitcin (2008) en algunos casos de hormigones con baja relación agua/aglomerante la retracción total puede ser atribuida más a la deformación autógena que a la retracción por secado.

En ese mismo sentido, Tazawa y Miyazawa (1995) *apud* Holt (2001) señalan que en materiales cementíceos con relación agua/cemento de 0,40 la retracción autógena es del orden del 40% de la magnitud de retracción total, mientras que para una relación agua/cemento de 0,23 es equivalente al 80%, ver Figura 2.23.

En resumen, en hormigones convencionales, en los que existe suficiente agua para permitir la hidratación total, la retracción autógena es generalmente despreciable, y se destaca la retracción por secado. Pero en hormigones de alto desempeño con relación agua/cemento baja (aproximadas a 0,42 o menores), cementos especiales, aditivos reductores de agua u adiciones que reducen el volumen de cemento, puede llegar a tener efectos de magnitud considerable. Es importante señalar que la retracción autógena ocurre aún cuando hay condiciones suficientes de curado, sin pérdidas de humedad al ambiente circundante.

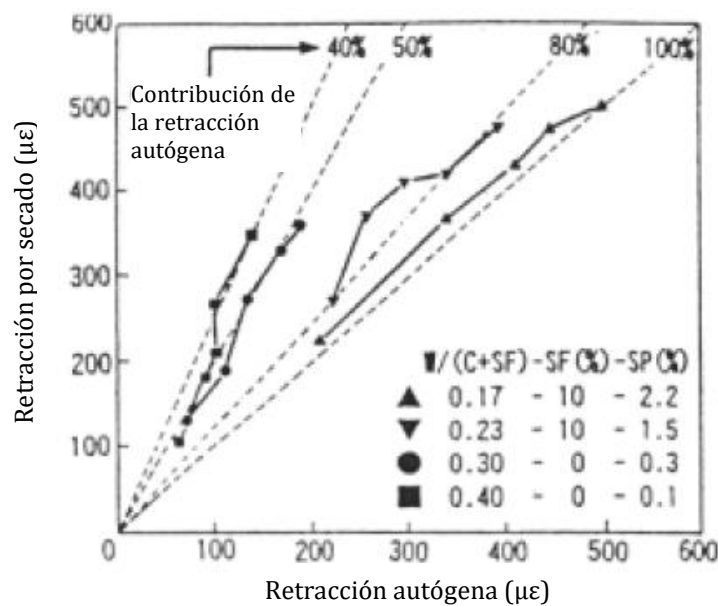


Figura 2.23 – Relación entre retracción autógena y retracción por secado en materiales con baja relación agua/cemento (Tazawa y Miyazawa, 1995 *apud* Holt,2001)

2.3 TERMINOLOGÍA

En esta tesis de maestría básicamente se ha empleado la terminología presentada por Jensen y Hansen (2001a) y por tanto se hacen las siguientes consideraciones.

El término autógeno es un término común, que se autoexplica: significa autogenerado. El mismo designa un estado termodinámico que refiere a un sistema bajo condiciones autógenas o sea cerrado, isotérmico y no sujeto a fuerzas externas. Ejemplos del fenómeno autógeno son la deformación autógena, que incluye tanto retracción por autodesecación como expansión debida a sales o etringita, y cambios de humedad relativa autógenos, que incluyen tanto autodesecación como cambio de humedad relativa debido a la disolución de sales.

La deformación autógena refiere a deformación bajo condiciones autógenas, o sea que no refiere a si la matriz ha fraguado o no. Se relaciona al periodo completo de endurecimiento a partir de la adición de agua. En la definición de deformación autógena se debería evitar el término fraguado ya que no se trata de un estado bien definido físicamente sino más bien de una continua transformación desde el estado fluido hasta el estado sólido.

Sin embargo, la Norma ASTM C 1698, que es el documento que establece la metodología de ensayo, refiere a la expresión “esfuerzo autógeno” en lugar de “deformación autógena”. Asimismo, define esfuerzo autógeno como el esfuerzo aparente de una probeta de mezcla cementícea, no sujeta a fuerzas externas y sometida a temperatura constante, medido a partir del tiempo de fraguado final hasta una edad especificada. Entonces, como en esta tesis de maestría se ha aplicado esta metodología de ensayo para la determinación de deformación autógena, los resultados obtenidos son los correspondientes a deformación autógena medida a partir del tiempo final de fraguado.

Se utiliza el término deformación como un término neutro general, evitando referirse a cambio de volumen o cambio de longitud. Se considera la deformación como positiva cuando se trata de expansión y negativa cuando refiere a retracción.

2.4 TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE RETRACCIÓN AUTÓGENA

Existen diferentes métodos de medición de retracción autógena, los cuales pueden ser clasificados en dos grupos según se realicen mediciones de deformaciones volumétricas o lineales.

Las mediciones volumétricas de la deformación autógena son realizadas colocando pasta de cemento fresca en una membrana elástica o en un molde deformable que se sumerge en un líquido (agua, aceite de parafina, mercurio, etc.). El cambio de volumen en la pasta de cemento se mide a través de la determinación de la cantidad de líquido desplazado por la muestra sumergida, lo cual se realiza midiendo el cambio de masa de la muestra sumergida o el nivel del líquido en un tubo capilar.

Lura y Jensen (2005), realizan una reseña de las mediciones volumétricas de esfuerzo autógeno basadas en diferentes principios, donde citan a los siguientes investigadores:

- Neville y Jones (1928) describieron un aparato para la medición de esfuerzo volumétrico de pasta cementícea sellada durante el período de endurecimiento a una temperatura constante. La pasta cementícea era colocada en un molde deformable de petrolato encabezado con aceite de parafina. El cambio de volumen de la pasta cementícea se registraba mediante el cambio de nivel en un tubo capilar.
- En el mismo sentido, Del Campo (1959) colocó la pasta cementícea fresca en una membrana elástica y utilizó mercurio como líquido de desplazamiento.
- Slate y Matheus (1967) colocaron pasta cementícea fresca u hormigón en un contenedor con aceite mineral y monitorearon el cambio de nivel del aceite en un tubo vertical capilar.
- Yates (1941) utilizó una membrana de goma para contener la pasta cementícea, la que suspendía en un contenedor lleno de agua y realizaba mediciones del nivel de agua en un tubo capilar durante un año. Un método similar fue utilizado para hormigón por Wuerpel (1946) y para la pasta cementícea desaireada por L'Hermite y Grieu (1952). También Edmeades et al. (1966) utilizaron un método parecido para pasta cementícea, pero las lecturas fueron tomadas en un tubo capilar horizontal de mercurio.
- De Haas et al. (1975) midieron, en cambio, el peso de un vaso que intercambia agua con el baño a medida que cambia el volumen de la probeta.
- Yamazaki et al. (1976) midieron el peso bajo agua de una muestra envuelta en una membrana de goma.
- Setter y Roy (1978) presentaron mediciones volumétricas en pastas cementíceas basadas en un método similar al de Haas et al., ver Figura 2.24. Una crítica sobre su trabajo fue escrita por Baron y Buil, basado en el trabajo doctoral de Buil, lo que quizás provocó el primer debate internacional sobre técnicas de medición de retracción autógena.

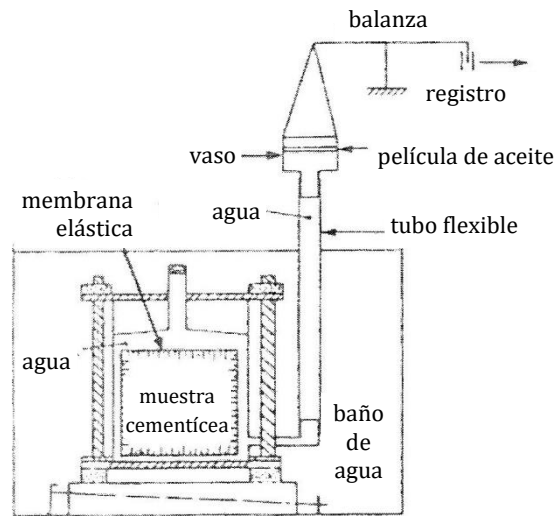


Figura 2.24 – Equipo para mediciones volumétricas de deformación autógena de pasta de cemento (Setter y Roy, 1978 *apud* Lura, 2003)

- Baron y Buil (1979) compararon mediciones volumétricas, por medio del aparato descrito anteriormente de Del Campo, y uno lineal mostrando que los valores de esfuerzo en la técnica volumétrica presentaban un orden de magnitud superior, ver Figura 2.25. Baron y Buil señalaron dos artefactos principales en la técnica volumétrica: 1) En las primeras horas después del fraguado, el método volumétrico puede medir la retracción química debido a la reabsorción de la capa de agua de exudación. La eliminación del agua de exudado con una jeringa puede no ser completa; 2) La presión ejercida por el líquido de medición y por la membrana elástica causa contracción de la pasta, especialmente alrededor del fraguado, cuando la misma aún se encuentra débil. Asimismo, este método podría ser influenciado por la absorción de agua a través de la membrana. Este artefacto no fue mencionado por Baron y Buil, posiblemente porque el aparato de Del Campo no sufrió este inconveniente.

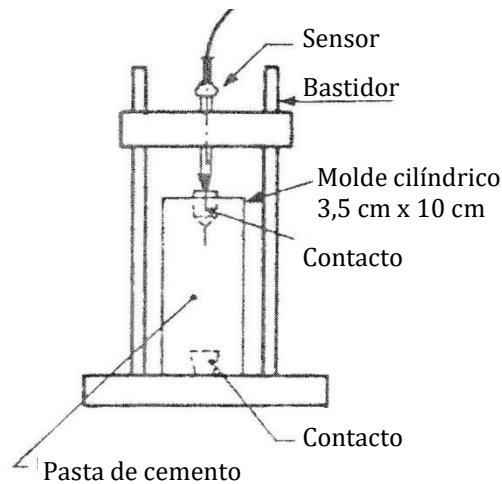


Figura 2.25 – Equipo para mediciones lineales de deformación autógena de pasta de cemento (Buil, 1979 *apud* Lura, 2003)

- En los comienzos de los 80, Ziegeldorf et al. y colaboradores moldearon pasta cementicia fresca en bolsas de polietileno de 0,4 mm de espesor, que fueron sumergidas en un contenedor completo con agua desaireada, cuyo nivel fue monitoreado. Ellos observaron que el esfuerzo volumétrico medido críticamente depende de la exudación y de la gran variedad de formas y tamaños de las probetas.

- La técnica volumétrica para las mediciones de esfuerzo autógeno recibió una renovada atención, a mediados de los 90, en una serie de trabajos de Justnes et al. en los que realizaron mediciones de peso bajo agua de membranas de goma (condones de látex) llenados con pasta cementícea. El artefacto relacionado a la reabsorción de agua de exudación fue solucionado mediante la rotación de las muestras.

La mayoría de los trabajos realizados por diferentes autores sobre la técnica volumétrica hicieron referencia explícita a esta versión particular del método volumétrico y usaron equipos similares. Una excepción es el aparato creado por Gagné et al. (1999), en el que la muestra es contenida en una membrana de goma sostenida por una hoja metálica perforada y sumergida en un baño de agua; el esfuerzo volumétrico autógeno se registra por el cambio de niveles en un tubo capilar graduado.

A modo de ejemplo, la Figura 2.26 muestra las probetas preparadas y la Figura 2.27 muestra un dispositivo para ensayo volumétrico de esfuerzo autógeno.

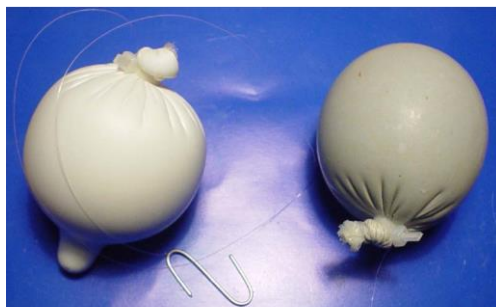


Figura 2.26 – Pasta cementícea colocada en membrana de poliuretano con reserva (izquierda) y en membrana de látex sin reserva (derecha) para mediciones volumétricas (Lura y Jensen, 2005)

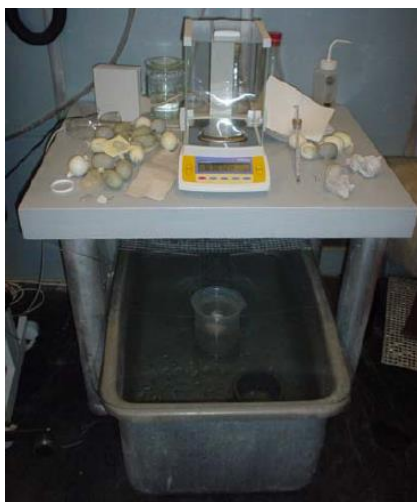


Figura 2.27 – Dispositivo para ensayo volumétrico de esfuerzo autógeno de pasta cementícea (Lura y Jensen, 2005)

Según Lura y Jensen (2005), en los años 90 comenzó nuevamente un debate sobre lo apropiado de la técnica volumétrica o lineal. Se realizaron diferentes trabajos orientados a comparar datos de deformación autógena obtenidos a partir de iguales mezclas y al análisis sistemático de los artefactos de ambas técnicas.

Según el trabajo de investigación de Barcelo et al. (1999) *apud* Lura y Jensen (2005), la comparación de mediciones volumétricas y lineales en la misma pasta revela que, incluso hasta el entorno del primer día, la tasa volumétrica de esfuerzo autógeno era alrededor de tres veces la lineal. Las diferencias antes y en el entorno del fraguado podrían ser explicadas por varias razones, incluyendo las diferencias de temperatura, presión de la membrana en el método volumétrico, anisotropía del esfuerzo autógeno debido a la colocación y fricción en el método lineal. Las discrepancias en los siguientes días eran mucho más difíciles de explicar.

Barcelo et al. (1999) *apud* Lura y Jensen (2005) plantean la hipótesis de que el esfuerzo autógeno podría no ser isotrópico incluso luego del fraguado. Una segunda hipótesis consiste en considerar que la membrana de goma bajo presión, que era aislada de la presión exterior, podría incrementar la retracción en comparación con las mediciones lineales.

Más tarde, la hipótesis de anisotropía de los esfuerzos autógenos después del fraguado fue demostrada como errónea: Charron et al. (2001) descubrieron que el esfuerzo autógeno lineal de dos morteros en prismas de 50 mm era idéntico en 3 direcciones diferentes. Sin embargo, la tasa de retracción lineal autógena era 1/10 de la volumétrica después del fraguado. Para explicar estas discrepancias, estos investigadores sugirieron que la causa de esta diferencia podía provenir de la presión negativa interna en la probeta volumétrica o la succión de la membrana elástica en los espacios de aire en la superficie de la muestra. (Lura y Jensen, 2005)

Lura y Jensen (2006), afirman nuevamente que si bien las mediciones volumétricas y lineales de esfuerzo autógeno deberían dar resultados idénticos, los resultados medidos con el método volumétrico son comúnmente 3 a 5 veces mayores que los resultados de métodos lineales. Adjudican esta inconsistencia al transporte de agua a través de la membrana de goma, que ocurre cuando se utiliza agua como líquido de inmersión. Después del fraguado, el agua que penetra puede llenar parcialmente los espacios internos producidos por retracción química, causando un incremento del peso sumergido o una disminución del nivel de agua que es erróneamente interpretado como retracción en mediciones volumétricas.

La toma de agua a través de la membrana puede ser evitada utilizando aceite de parafina como líquido de inmersión. Las mediciones volumétricas de esfuerzo autógeno realizadas de este modo coinciden con las mediciones realizadas utilizando una técnica dilatómétrica lineal. Esto confirma la validez de éstas dos técnicas. Sólo se dan algunas pequeñas diferencias entre ellas en un par de horas alrededor del fraguado.

Tanto los métodos de medición lineales como los volumétricos presentan ventajas y desventajas. Basados en las observaciones mencionadas anteriormente, Jensen y Hansen concuerdan con Buil y Baron (1979) en que el método volumétrico parece menos adecuado para mediciones de retracción autógena. (Jensen y Hansen, 1995b)

Una ventaja del método volumétrico es la posibilidad de comenzar las mediciones inmediatamente después del llenado el molde. Antes del fraguado, las mediciones deben ser volumétricas debido a que el estado plástico impide una definición no ambigua de la longitud. (Jensen y Hansen, 1995b)

Una desventaja del método volumétrico puede ser la falta de contacto firme entre el molde deformable o membrana elástica y la pasta de cemento, ya que el agua de exudación o el aire atrapado en la superficie de la pasta de cemento puede impedir este contacto de manera significativa. A medida que avanza la hidratación, como una consecuencia de la reducción de volumen interno causado por las reacciones químicas, el agua de exudación o el aire atrapado pueden ser incorporados a la pasta de cemento. Como la reducción de volumen es considerablemente mayor que la deformación autógena esto puede inducir a un error sustancial.

Asimismo, este método presenta el inconveniente de que la presión ejercida por el molde deformable o membrana elástica y por el líquido donde está sumergida la probeta puede romper parte de la estructura cristalina de la mezcla, debido a que esta última se presenta muy débil en las primeras edades. Por lo tanto, se pueden obtener resultados erróneos respecto de la retracción real que dicha mezcla experimenta. En este sentido, Lura (2003) afirma que las mediciones volumétricas de deformación autógena son normalmente asociadas a una amplia dispersión de los datos.

Según Lura (2003), el método volumétrico no puede ser utilizado para hormigón debido a que el agregado puede dañar la membrana de goma. Por ello, diferentes métodos lineales han sido utilizados para la medición de deformación autógena en vigas, losas y cilindros de hormigón:

- 1) sistemas con inserciones en prismas de hormigón, ver Figura 2.28,
- 2) sistemas con placas con movimiento en los extremos conectadas a los prismas de hormigón, ver Figura 2.29,
- 3) sistemas con barras horizontales que atraviesan prismas de hormigón, ver Figura 2.30,
- 4) sistemas con barras verticales en losas de hormigón, ver Figura 2.31,
- 5) sistemas con bandas extensométricas en el hormigón, ver Figura 2.32,
- 6) sistemas con placas metálicas colocadas en la parte superior de los cilindros, ver Figura 2.33.

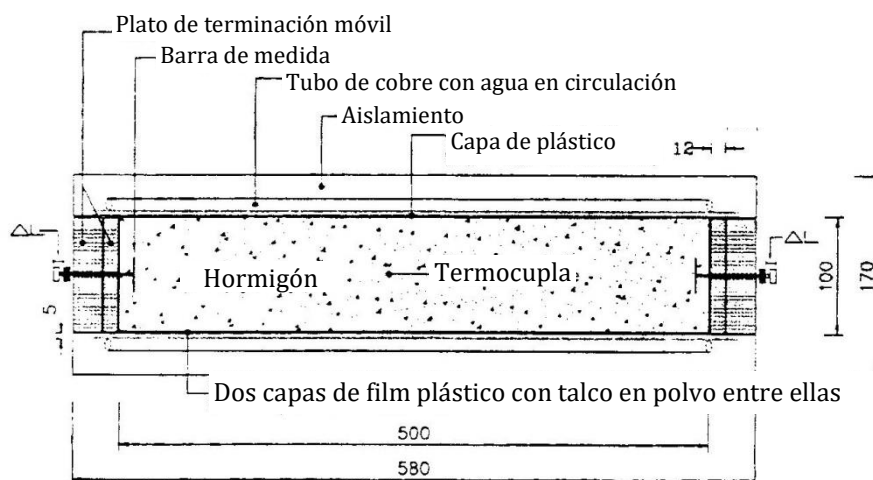


Figura 2.28 – Sistema de medición con inserciones (Bjontegaard, 1999 *apud* Lura, 2003)

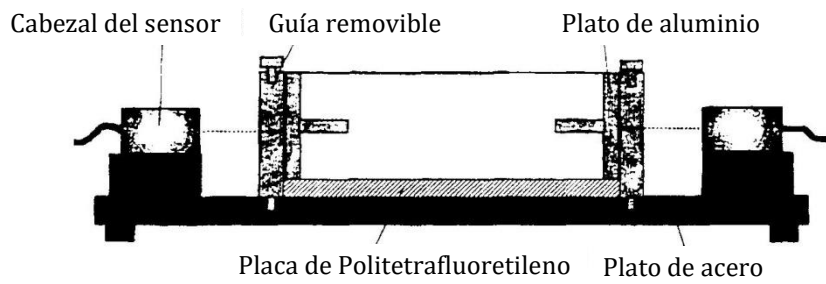


Figura 2.29 – Sistema de medición con extremos removibles en prismas de (40x40x160) mm (Morioka et al., 1999 *apud* Lura, 2003)

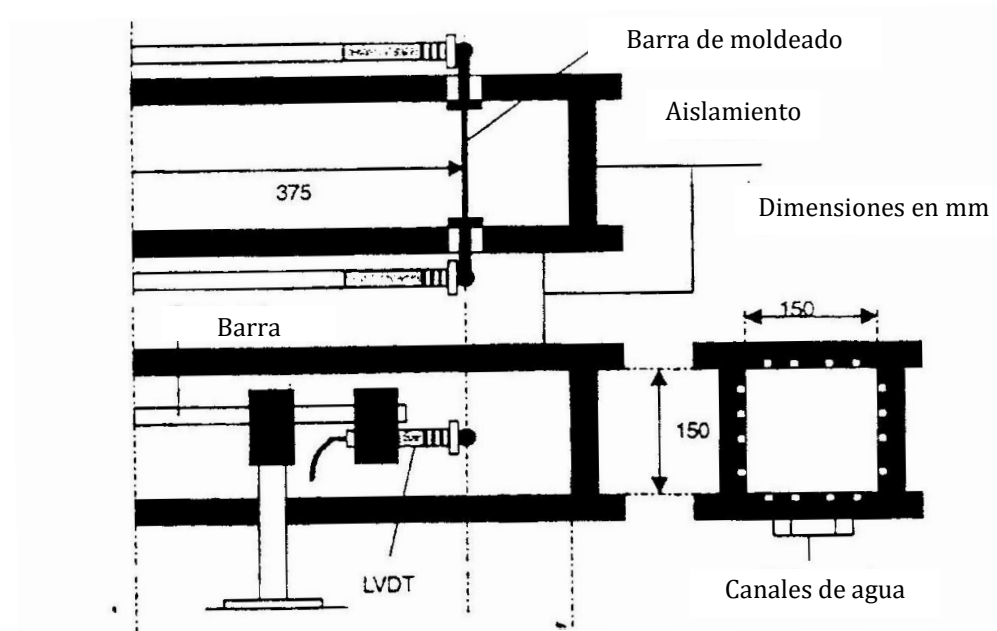


Figura 2.30 – Sistema de medición con barras horizontales en vigas de (150x150x1000) mm (Lokhorst, 1998 *apud* Lura, 2003)

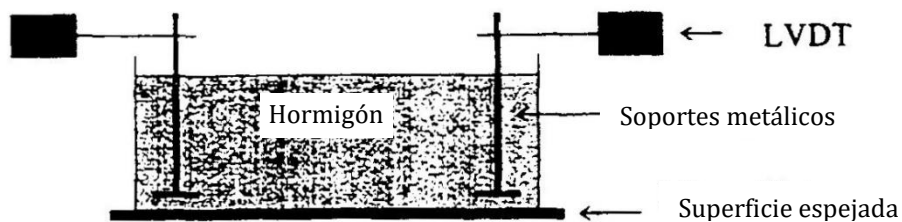


Figura 2.31 – Sistema de medición con barras verticales en losas de (270x270x100) mm (Holt y Leivo, 1999 *apud* Lura, 2003)

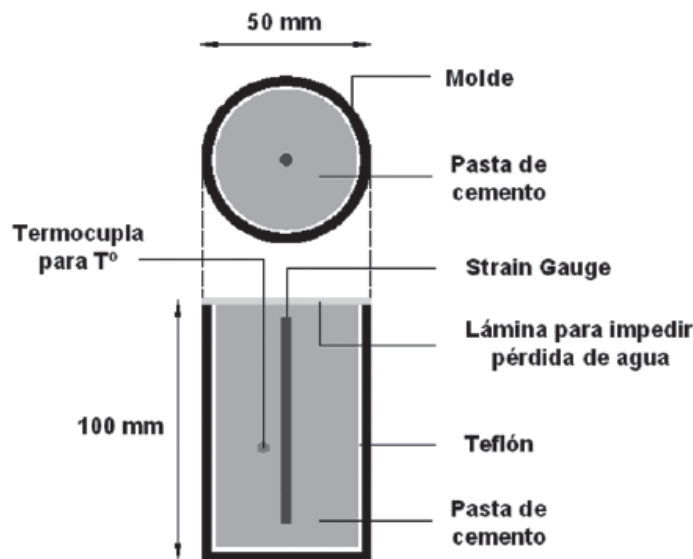


Figura 2.32 – Sistema de medición con extensómetros (Nawa y Horita, 2004 *apud* Giani, Navarrete y Bustos, 2008)

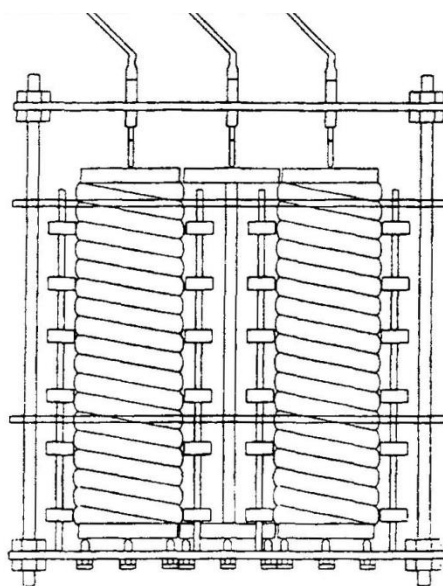


Figura 2.33 – Sistema de medición con tubos flexibles (de diámetro igual a 100 mm y longitud igual a 375 mm) y mediciones verticales de longitud (Hansen y Jensen, 1997 *apud* Lura, 2003)

Los problemas que presentaban estos sistemas de medición consistían en: mantener un buen contacto entre los puntos de medición y el hormigón, minimizar la restricción y la pérdida de humedad y mantener una temperatura constante. Por ello, los sistemas que se muestran en la Figura 2.25 y en las Figuras 2.28 a 2.30 buscan solucionar estos problemas embebiendo las barras, sobre las que fijan los puntos de medición en el hormigón fresco, reduciendo la fricción en la cara inferior de la probeta con láminas de baja fricción. De esta manera, se reduce la pérdida de humedad mediante la utilización de láminas plásticas o de aluminio en la cara superior de la probeta y se mantiene la temperatura mediante baños de temperatura controlada o por la circulación de líquidos refrigerantes en el molde. (Lura, 2003)

En 1989, para la medición de expansiones térmicas y retracción por autodesecación de las probetas de ensayo, Jensen y Hansen diseñan un dilatómetro que consiste en un marco rígido de Invar con un bajo coeficiente de expansión térmica. Las probetas se colocan entre dos barras guía que generan un espacio en forma de V. Para la medición de los cambios de longitud se utilizaron transductores de desplazamiento inductivos TRANSTEK 350.

La temperatura del dilatómetro y las probetas se midió con termopares de cobre. Durante los ensayos, el dilatómetro quedaba colocado en una caja de acero inoxidable cerrada y era sumergido en un baño de agua termostáticamente controlado. La humedad relativa dentro de la caja era controlada por sales *NaCl* a aproximadamente a 75 % de humedad relativa. (Jensen y Hansen, 1989)

Los moldes consistían en tubos de acero de 300 mm de largo y 25 mm de diámetro. Las probetas de mortero se dejaban endurecer por 13 horas a 20 °C antes de ser desmoldadas. A esa edad, las probetas se transferían a tubos de acero de 300 mm los que eran sellados con silicona y revestidos con juntas de goma. Este dispositivo a prueba de agua aseguraba cambios de peso insignificantes durante el periodo de ensayo de 6 meses y las juntas de goma aseguraban una restricción insignificante a las probetas. (Jensen y Hansen, 1989)

Más tarde, Jensen y Hansen (1995b) desarrollan un nuevo equipo para la medición de retracción autógena que busca combinar las ventajas del método lineal y del método volumétrico. Consiste en un dilatómetro que se sumerge en un baño termostáticamente controlado de glicol. Esta técnica de medición permite: a) comenzar las mediciones poco después de llenado el molde, b) restricción despreciable de la pasta de cemento endurecida, c) control exacto de la temperatura del dilatómetro y de la pasta de cemento endurecida, y d) sellado eficiente de la pasta de cemento.

Este equipo fue construido a partir de dos platos de acero, unidos rígidamente por cuatro barras de Invar sólidas de 22 mm de diámetro. Se medían los cambios de longitud de cada probeta, las cuales se deslizaban libremente sobre las barras soporte. Se utilizaron los transductores TRANS-TEK 350-000. Cada molde consistía en un tubo plástico con dos abrazaderas y un disco metálico que cerraba los extremos. Los tubos plásticos eran corrugados de polietileno de 0,5 mm de espesor y restringían la pérdida de humedad. Se realizaron mediciones cada 15 minutos.

Como no se pueden realizar mediciones lineales mientras el sistema es fluido, es importante determinar exactamente la transición fluido-sólido, ya que las mediciones se deben iniciar a partir del fraguado. Una ventaja del método lineal es el firme anclaje del punto de medición a la pasta de cemento, lo cual reduce significativamente los problemas antes mencionados. Al mismo tiempo esta es una desventaja del método lineal debido a que las mediciones no pueden comenzar antes que la pasta de cemento fragüe. (Hansen y Jensen, 1995b)

El método lineal tiene un problema adicional: el riesgo de restricción de la pasta de cemento. En las primeras horas después del fraguado, la pasta de cemento es muy débil para vencer la fricción de un tubo rígido. Sin embargo, este problema se puede reducir lubricando el tubo. (Hansen y Jensen, 1995b)

Jensen cuestiona estas técnicas de medición y sugiere la técnica lineal como la más adecuada para la medición de la deformación autógena en pastas de cemento endurecidas. Con éste propósito sugiere la utilización de un sistema de molde especial que consiste en la utilización de tubos corrugados de baja fricción. (Ostergaard y Jensen, 2003; Jensen, 2005)

Antes del fraguado los moldes corrugados transforman la deformación volumétrica en deformación lineal, y después del fraguado el tubo corrugado permite medir la deformación lineal con una restricción despreciable. El cambio de longitud de la matriz cementícea se registra por un transductor de desplazamiento en el extremo de la probeta. (Ostergaard y Jensen, 2003; Jensen, 2005)

Estos moldes impiden la pérdida de humedad y aseguran restricciones insignificantes durante el endurecimiento de la pasta de cemento. Antes del fraguado, el molde corrugado transforma la deformación volumétrica en deformación lineal y después del fraguado permite medir una deformación lineal normal. De esta manera, es posible comenzar las mediciones lineales directamente después de llenado el molde.

El agua de exudación afecta también las mediciones lineales de deformación autógena. Después del fraguado, el agua de exudación puede ser reabsorbida por la pasta de cemento y entonces, reducir la deformación autógena o causar expansión (Hammer et al., 2002). Este problema puede ser eliminado mediante la rotación de las muestras. (Lura, 2003)

Para la investigación experimental de esta tesis de maestría, como se explicará más adelante en el apartado 3.2.5 del Capítulo 3, se utilizó la metodología para la determinación del esfuerzo autógeno en pastas y morteros de cemento establecida en la norma ASTM C 1698. Esta metodología se basa en la utilización de un sistema de moldes corrugados flexibles sellados, combina las ventajas de las técnicas de medición de esfuerzo autógeno volumétrico y lineal y evita la mayoría de las desventajas de cada técnica de acuerdo a las afirmaciones de Jensen y Hansen (1995b).

La Norma ASTM C 1698:2009 considera el tiempo final de fraguado como “tiempo cero” para el cálculo de la deformación autógena. El mismo criterio se ha aplicado en investigaciones llevadas adelante por Rodríguez de Sensale et al. (2008) y Kawashima y Shah (2011). Sin embargo, otros investigadores han determinado el “tiempo cero” para la medición de la deformación autógena de otras maneras, a continuación se reseñan algunos ejemplos.

Lura (2003) utilizó como “tiempo cero” para la determinación de la deformación autógena el instante en el que la muestra alcanza el equilibrio térmico, después del fraguado, debido a que a partir de ese momento las mediciones mostraban buena repetibilidad. Consideró que la deformación autógena comienza a partir del momento en que se registra el primer esfuerzo en la máquina de ensayo de Esfuerzo-Temperatura (del inglés: Temperature-Stress Testing Machine (TSTM)). Shen et al. (2015) siguen este mismo criterio en sus investigaciones.

Fontana et al. (2007) determinan el “tiempo cero” para el cálculo de deformación autógena como el instante en el que la velocidad de deformación alcanza un máximo. A partir de ese

instante se ha formado un cuerpo sólido continuo y se pueden generar los esfuerzos que inducen deformaciones.

Otros investigadores han establecido el “tiempo cero” para la deformación autógena a través de la determinación del tiempo inicial de fraguado (Mounanga et al., 2006; Alrifai, Aggoun y Cabrillac, 2008; Alrifai et al., 2011; Jiang et al., 2014), o de la determinación de la depresión capilar (Chang-wen et al., 2007).

Este problema de considerar distintos instantes como “tiempo cero” dificulta la comparación entre los resultados de deformación autógena que aparecen en las diferentes publicaciones existentes.

2.5 PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL DESARROLLO DE LA RETRACCIÓN AUTÓGENA

Una vez que la retracción autógena se puede determinar con una metodología adecuada, entonces, es posible estudiar cuáles son los parámetros fundamentales que influyen en su desarrollo. Por lo tanto en este trabajo interesa el estudio de algunos de los parámetros de la mezcla que inciden en la reducción de este fenómeno con el fin último de minimizar la fisuración en el hormigón sin perder las características propias del microhormigón de alto desempeño.

Según Neville (2011) la retracción autógena tiende a aumentar a altas temperaturas, con altos contenido de cemento, con la finura del cemento y con cementos que poseen un alto contenido de C_3A y de C_4AF . Asimismo, la retracción autógena aumenta cuando disminuye la relación agua/cemento debido a que aumenta la autodesecación. A continuación, se presentan algunos estudios sobre los distintos parámetros que influyen en la retracción autógena.

2.5.1 Relación agua/cemento

La retracción autógena se diferencia de los otros tipos de retracción, por cuanto no es atribuible a pérdida de agua, sino a la reducción de volumen que esta experimenta al combinarse químicamente con el cemento. El volumen de agua que se combina químicamente es siempre igual a aproximadamente un 23% del peso del cemento y su pérdida de volumen, al pasar a formar parte de los productos de hidratación, es del orden del 25% respecto de su volumen inicial. Esta reducción de volumen, de no existir aportes de agua externos que permitan compensarla, da origen al vaciado de los poros en la masa del hormigón y en consecuencia a la generación de esfuerzos capilares capaces de generar retracción. (Holt, 2001)

El orden de magnitud de la retracción por autodesecación en hormigones normales varía entre 40 micras por metro a la edad de un mes y 100 micras por metro a la edad de cinco años, valor que sin duda resulta secundario con respecto al de la retracción por secado. (Neville, 2011) No obstante lo anterior, algunos resultados más recientes indican que la

retracción autógena, medida a partir del instante inmediatamente posterior a la elaboración del hormigón, puede alcanzar valores superiores a los indicados por Neville. (Holt, 2001)

Además, la retracción autógena adquiere una importancia creciente a medida que se consideran hormigones con baja relación agua/cemento. Es importante en hormigones con una relación agua/cemento inferior a 0,42, ya que bajo este límite no hay agua disponible para que sigan desarrollándose las reacciones de hidratación. Esto implica la existencia de un volumen considerable de poros vacíos, junto con una creciente dificultad para absorber agua desde el ambiente dada la baja permeabilidad de este tipo de hormigones. (Holt y Leivo, 2004)

Para una mejor comprensión de esto último, es necesario recordar que en todas las pastas de cemento una parte del volumen total de agua de amasado forma poros de gel. El volumen de los poros de gel es igual al 25%, según Powers y 28% según Neville del volumen de pasta resultante, independientemente de la relación agua/cemento utilizada. Por lo tanto, si no se consideran aportes de agua desde el exterior, el agua disponible para llenar los poros vacíos es solo el agua remanente después de haber descontado el agua combinada y el agua de amasado que genera los poros de gel. (Holt, 2001; Jensen y Hansen, 2001b)

Según estudios de Jensen y Hansen (1996), los valores de retracción autógena de muestras frescas extraídas de hormigones elaborados con relaciones agua/cemento inferiores a 0,4, a los 14 días de edad, alcanzaron deformaciones de 1000×10^{-6} m/m.

Asimismo, Sant, Lura y Weiss (2005) *apud* Giani, Navarrete y Bustos (2008) considerando hormigones con una relación agua/cemento igual a 0,3, publican valores aún mayores.

Pease, Hossain y Weiss (2004) *apud* Giani, Navarrete y Bustos (2008) estudiaron el fenómeno de la retracción autógena en hormigones con agua/cemento de 0,3 y 0,5, determinaron los valores de 0,320 mm/m y de 0,070 mm/m respectivamente, a las 24 horas. Extrapolando linealmente, según Holt (2001), es esperable una retracción igual a 0,200 mm/m para una relación agua/cemento igual a 0,4.

Baroghel et al. (1996) *apud* Holt (2001) midieron retracción autógena en pastas de cemento con relaciones agua/cemento iguales a 0,25, encontrando que a los 120 días se alcanzaban valores del orden de 1 mm/m.

Independientemente de la relación existente entre los valores de retracción autógena y relación agua/cemento, el análisis de las curvas que representan su evolución en el tiempo, parece indicar que la retracción autógena se desarrolla en buena medida durante las primeras 48 horas de elaborado el hormigón, período que generalmente corresponde al de mayor actividad de las reacciones de hidratación. (Giani, Navarrete y Bustos, 2008)

En el trabajo de investigación de Alrifai et al. (2009) se evalúa la retracción autógena en morteros con relación agua/cemento entre aproximadamente 0,50 y 0,70 (manteniendo el volumen de pasta), concluyendo que la retracción autógena y la reducción de la humedad relativa es mayor cuanto más baja es la relación agua/cemento, ver Figuras 2.34 y 2.35.

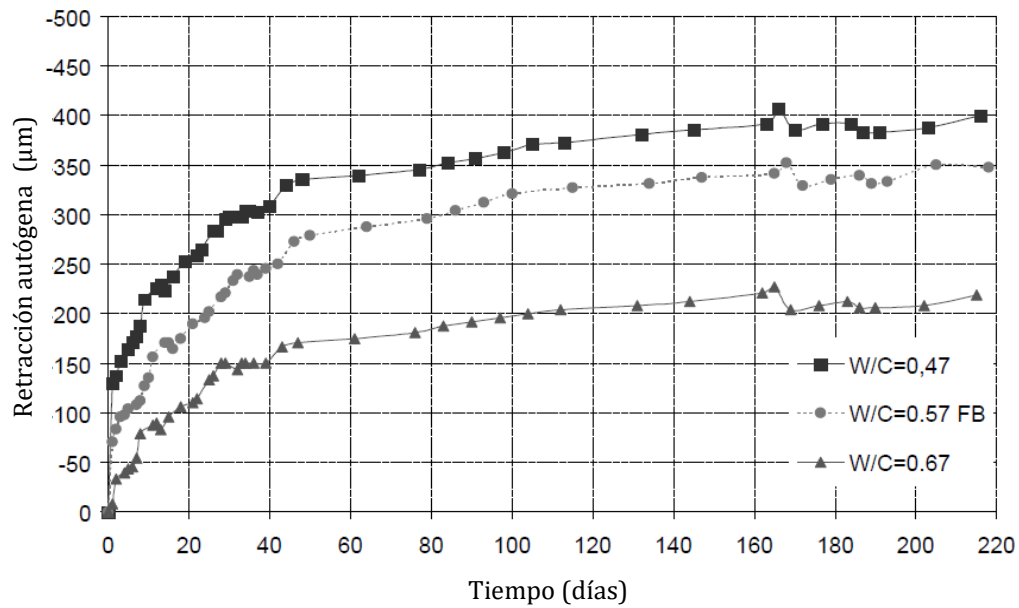


Figura 2.34 – Retracción autógena del mortero tipo I (Alrifai, Aggoun y Cabrillac, 2009)

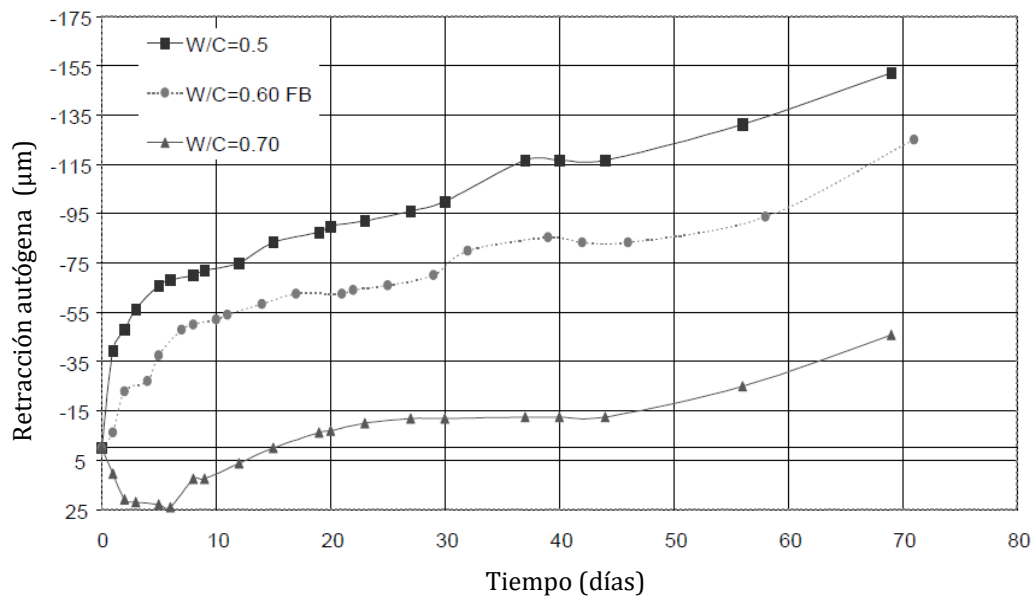


Figura 2.35 – Retracción autógena del mortero tipo II (Alrifai, Aggoun y Cabrillac, 2009)

En síntesis, la relación agua/cemento tiene una influencia muy significativa en la retracción autógena. A medida que la relación agua/cemento disminuye, la retracción autógena aumenta, debido a que existe una menor disponibilidad de agua que llene los espacios que se generan durante la hidratación del cemento, apareciendo fuerzas capilares que provocan la retracción del hormigón. (Holt, 2001; Giani, Navarrete y Bustos, 2008)

2.5.2 Tipo de cemento

De acuerdo a cálculos termodinámicos realizados por Jensen (1995), la hidratación del C_2S se dificulta en bajas humedades relativas. O sea que la presencia de C_2S en el cemento puede contribuir a restringir la autodesecación de la pasta de cemento.

Según Jensen et al. (1999) en hormigón de alto desempeño, la hidratación de los minerales de clinker de cemento puro en contacto con el vapor de agua es relevante ya que el mismo puede autodesecarse. Por lo tanto, es importante asegurar la calidad del cemento durante su almacenamiento. Se debe tener en cuenta que el C_2A se puede hidratar a bajas humedades relativas en comparación con el C_3S y el C_2S .

La química del cemento puede afectar la retracción autógena debido a la variación de la retracción química en las primeras edades. O sea que, si un cemento tiene un alto contenido de C_3A se espera que tenga una mayor retracción en comparación con un cemento con menor contenido de C_3A . Además, algunos componentes trabajan juntos, tales como el C_2S y el C_3S . Los cementos con alto contenido de C_2S usualmente tienen un bajo contenido de C_3S . Esta combinación de alto C_2S y bajo C_3S podría resultar en una baja retracción total en comparación con un cemento de referencia. (Holt, 2001)

Jensen (2000), estudió cinco cementos diferentes: dos de referencia y tres sintéticos. El primer cemento de referencia consistía en un cemento portland blanco puro con superficie específica de 410 m²/kg, el segundo cemento de referencia, de superficie específica igual a 480 m²/kg, se obtuvo luego de ser molido el primer cemento de referencia durante una hora en un molino de bolas. Los cementos sintéticos se elaboraron mezclando 80% del cemento portland blanco de referencia con 20% de los siguientes minerales de clinker puros: C_3S , C_2S y C_3A . A este último, también se le agregó 15% de yeso para evitar falso fraguado, siendo la proporción de C_3A y yeso la típica de un cemento portland normal. En la Tabla 2.1 se indica la composición de los cementos utilizados en porcentaje en peso.

Tabla 2.1 – Composición de cementos (Jensen, 2000)

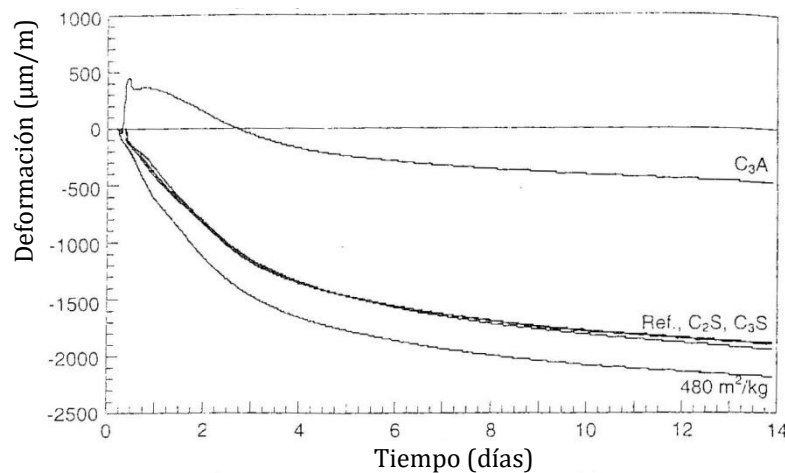
	Cemento de referencia		Reemplazo de 20% de mineral de clinker por:		
	Bogue	QXRD	C_3S	C_2S	C_3A
C_3S	66	75±1,4	80,0	60,0	60,0
C_2S	21	20±1,2	16	36	16
C_3A	4,3	3,4±0,2	2,7	2,7	20
C_4AF	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0
$CaSO_4$	3,4	1,8±0,5	1,4	1,4	1,4

En peso el cemento de referencia contiene 1,96 % de CaO libre y 0,17 % de Na_2O eq. También se agregó a la pasta de cemento humo de sílice con una superficie específica de 21 m²/g determinado por el método BET y 1 % del peso del cemento más el humo de sílice de aditivo superplastificante naftaleno como polvo seco.

Los resultados de deformación autógena obtenidos se presentan en la Figura 2.36. Como se puede ver, un incremento en la superficie específica del cemento acelera el desarrollo de deformación autógena. Esto se debe al incremento de la reactividad y a los cambios en la microestructura debidos a la gran finura del cemento. (Jensen, 2000). Por el contrario, el

contenido de C_3S y C_2S del cemento parece tener poca o nula influencia en la reducción de la deformación autógena.

Sin embargo, la condición de que el cemento tenga un alto contenido de C_3A o yeso conduce a una reducción considerable de la deformación autógena. Esta reducción de la retracción se da por dos mecanismos diferentes: por un lado se observa expansión enseguida después del fraguado (debida a la expansión de la formación de etringita producida por un alto contenido de C_3A y yeso, la cual contrarresta la retracción) y por otro lado, se observa una reducción del desarrollo durante el periodo a largo plazo. (Jensen, 2000)



Referencias

Ref. – pasta con cemento de referencia con finura Blaine 410 m^2/kg

480 m^2/kg – pasta con cemento de referencia con finura Blaine 480 m^2/kg

C_3S , C_2S y C_3A – pastas con 20% de reemplazo de minerales de clinker en la composición del cemento de referencia

Figura 2.36 – Deformación autógena a partir del fraguado de cinco pastas de cemento, determinada a una temperatura de 30°C (Jensen, 2000)

Investigaciones llevadas a cabo por Nawa y Horita, (2004) *apud* Giani, Navarrete y Bustos, (2008) determinaron que los cementos con una mayor generación de calor durante su hidratación presentan mayor retracción autógena.

Alrifai et al. (2009) también afirman que la retracción autógena depende de las propiedades y proporciones de cemento, especialmente de su finura.

2.5.3 Empleo de adiciones

Las adiciones minerales conducen a una densificación de la estructura interna del hormigón. Su incorporación mejora las características del hormigón, durabilidad y fenómenos autógenos y no autógenos. La ceniza volante, el humo de sílice, el metacaolín y la escoria de alto horno han jugado un rol importante en la producción de hormigones de alto desempeño.

Jensen y Hansen (1989) determinaron la deformación autógena de morteros cementíceos elaborados con la dosificación indicada en la Tabla 2.2. Utilizaron cemento portland blanco de finura Blaine 448 m²/kg, humo de sílice de composición química y superficie específica según Tabla 2.3, fibras de polipropileno y relación agua/cemento 0,26.

Tabla 2.2 – Dosificación del mortero cementíceo con sílice reforzado con fibras en porcentaje en peso del cemento (Hansen y Jensen, 1989)

Cemento (%)	Sílice (%)	Agua (%)	Arena (%)	Fibras (%)	SPC ¹ (%)
100	10	22	159	1,7	6,7

¹ Aditivo superplastificante melamínico con 33% de sólidos.

Tabla 2.3 – Composición química en % por peso y superficie específica, S (determinada por BET) del humo de sílice (Hansen y Jensen, 1989)

S (m ² /g)	SiO ₂	C	Fe ₂ O	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	SO ₃	LOI
15-20	89,1	1,7	1,80	0,80	1,10	1,30	1,9	1,3	2,9

Los resultados obtenidos que son del orden de las 1000 µm/m a los 14 días son alrededor de 5 a 10 veces mayores que el esfuerzo último de tracción del mortero. Por lo tanto, afirman que la retracción por autodesecación es probablemente la causa del desarrollo del patrón de fisuración observado en la fabricación de morteros cementíceos con sílice de baja porosidad.

A partir de las mediciones de retracción por autodesecación de los morteros analizados, Jensen y Hansen (1989) concluyen lo siguiente:

- aproximadamente el 80 % de la retracción última se produce en los dos días de curado.
- la retracción por autodesecación última está entre 900-1100 µm/m a los 14 días de curado.
- la tasa de retracción por autodesecación de los morteros después de cuatro meses de curado a 20 °C es aproximadamente 2 µm/m/semana, lo cual es prácticamente despreciable.

Más tarde, Jensen y Hansen (1995a), afirman que a consecuencia de la reacción puzolánica del humo de sílice se incrementa el cambio de la humedad relativa autógena en una pasta de cemento. Para ello, utilizaron cemento portland blanco de rápido endurecimiento con finura Blaine de 426 m²/kg, tres tipos diferentes de humo de sílice, diferenciados por su composición y especialmente, por su superficie específica, S, (ver Tabla 2.4) y aditivo superplastificante melamínico con 33% de sólidos.

Tabla 2.4 – Composición química de los tipos de humo de sílice en % por peso y las superficies específicas, S (determinadas por BET) (Jensen y Hansen, 1995a)

S (m ² /g)	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ Oeq
23	94,7	0,18	1,17	0,51	0,17	0,30
33	99,3	0,09	0,20	<0,01	<0,01	0,06
50±15	99,8	<0,01	<0,08	?	?	?

El humo de sílice de 23 m²/g se adicionó como un líquido con 50 % de agua en peso. Los otros dos tipos de humo de sílice se adicionaron como polvos secos no compactos. El superplastificante se agregó en una proporción de 3,5 % en peso del cemento más el humo de sílice. Se utilizaron moldes de Teflon ajustados de 100 cm³. Luego del llenado de los moldes, las probetas se colocaron a 30 °C durante 8 horas y media. Para evitar la exudación, los moldes se rotaban a 1 rev/min aproximadamente. Luego, se colocaban en una atmósfera libre de CO₂ a 98 % de humedad relativa.

Investigaciones posteriores de Jensen y Hansen (1996) confirman que la adición de humo de sílice aumenta considerablemente la retracción autógena así como el cambio de humedad relativa autógena. En este caso, se utilizó cemento portland blanco con finura Blaine de 426 m²/kg, cemento portland de rápido endurecimiento con finura Blaine de 414 m²/kg, humo de sílice de superficie específica de 23 m²/g (método BET) y composición química según Tabla 2.5 y aditivo superplastificante melamínico con 30% de sólidos.

Tabla 2.5 – Composición química del humo de sílice en % por peso (Jensen y Hansen, 1996)

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ Oeq
94,7	0,18	1,17	0,51	0,17	0,30

El cambio de humedad relativa autógena se debe a la autodesecación y a la presencia de sales disueltas. La deformación autógena asociada al final del fraguado consiste en retracción por autodesecación y retracción debida a la desaparición, a nivel de la microestructura, de un componente que restrinja el movimiento (por ejemplo, partículas de hidróxido de calcio o de humo de sílice).

O sea que se producen tres mecanismos importantes relacionados a la deformación autógena y al cambio de humedad relativa:

- retracción debida a la desaparición de componentes que restrinjan el movimiento,
- cambio de humedad relativa debido a las sales disueltas y
- retracción química que conduce tanto a autodesecación como a retracción por autodesecación.

Asimismo, la adición de humo de sílice conduce a una estructura de poros más fina de la pasta de cemento y de ese modo incrementa la autodesecación y la retracción por autodesecación.

En resumen, a partir de estas investigaciones, Jensen y Hansen (1996) concluyen que la dosis de humo de sílice tiene una influencia considerable en la deformación autógena de pastas de cemento portland endurecidas. La deformación autógena que se produce después del fraguado consiste en retracción por autodesecación y en retracción debida a la desaparición de un componente que restringe el movimiento.

En el mismo sentido, Holt (2001) establece que el uso de las adiciones, tales como el humo de sílice, puede refinar la estructura de poros provocando la formación de una microestructura fina. Si hay una estructura fina de poros el consumo de agua puede aumentar y entonces, también se incrementa la retracción autógena debido a la autodesecación. Por otro lado, Kinuthia et al. (2000) *apud* Holt (2001) han demostrado que el metakaolin puede reducir la retracción autógena causada por la autodesecación mediante la mejora de la distribución del tamaño de las partículas y causar expansión, compensando la retracción.

Rodríguez de Sensale, Ribeiro y Gonçalves (2008) estudiaron el efecto de la sustitución parcial de cemento portland por ceniza de cáscara de arroz en el fenómeno autógeno. Para ello, utilizaron cemento portland común CEM I 42,5 R, agua destilada y superplastificante polimérico de alto rango. Como adiciones se utilizó ceniza de cáscara de arroz residual proveniente de los molinos de la industria arroceras de Uruguay (RRHA), ceniza homogénea producida por incineración controlada de origen estadounidense (CRHA) y para comparar humo de sílice (SF) disponible comercialmente en Portugal.

La Figura 2.37 muestra que la utilización de ceniza de cáscara de arroz disminuye la deformación autógena. Sin la incorporación de esta adición se produce una deformación autógena de aproximadamente 600 $\mu\text{m}/\text{m}$ a la edad de 4 semanas. Reemplazando 5% y 10% del cemento portland por ceniza de cáscara de arroz se consigue una reducción considerable de la deformación autógena, alcanzando valores de 250 $\mu\text{m}/\text{m}$ a la edad de 4 semanas para un reemplazo del 10%.

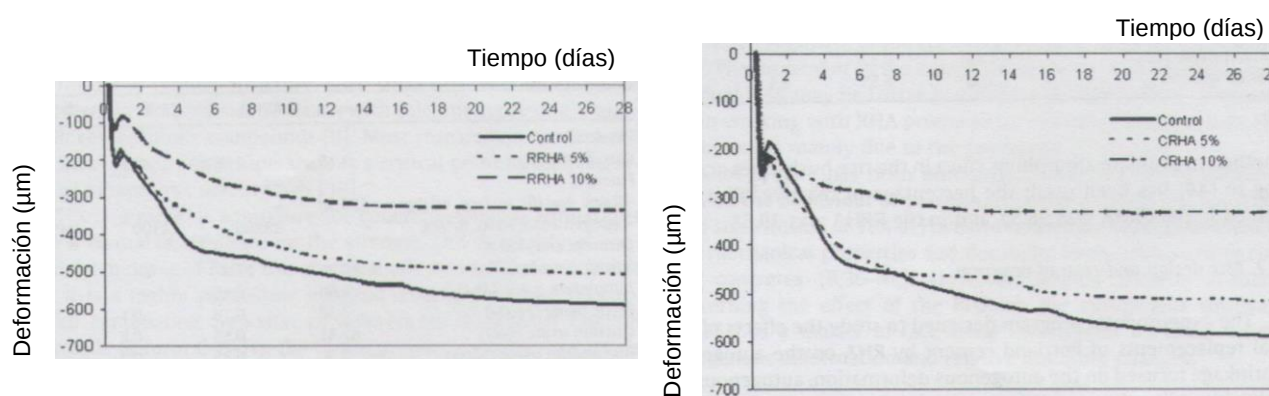


Figura 2.37 – Deformación autógena de pastas de cemento portland y ceniza de cáscara de arroz en función del tiempo (Rodríguez de Sensale, Ribeiro y Gonçalves, 2008)

Según los resultados de esta investigación el uso de ceniza de cáscara de arroz disminuye el desarrollo de retracción autógena. Este efecto positivo se atribuye a la estructura celular porosa de la ceniza que afecta la distribución de agua durante la hidratación.

Alrifai et al. (2009) estudiaron la retracción autógena en morteros y pastas de cemento con filler calcáreo y relación finos/cemento (F/C) entre 0,27 y 0,57 (manteniendo el volumen de pasta fijo). A partir de sus investigaciones concluyen que la retracción autógena es mucho más importante cuanto menor es la relación finos/cemento. O sea que esta aumenta con el porcentaje de filler calcáreo que se incorpora a la mezcla. La sustitución de cemento por filler calcáreo causa un retraso en el debido a que al incrementar la relación finos/cemento, se aumenta la relación agua/cemento. Ver Figura 2.38 y 2.39.

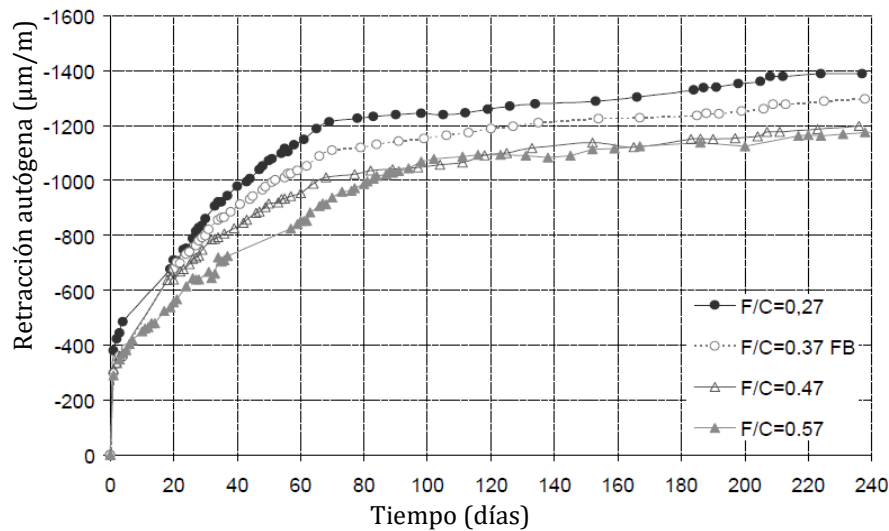


Figura 2.38 – Retracción autógena del mortero tipo I (Alrifai et al., 2009)

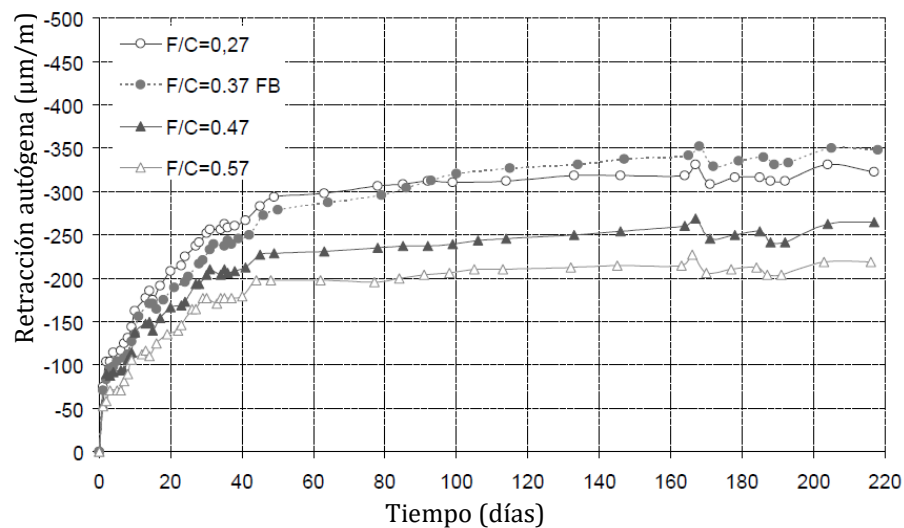


Figura 2.39 – Retracción autógena de la pasta tipo I (Alrifai et al., 2009)

En igual sentido, Giani, Navarrete y Bustos (2008) afirman que a medida que se utiliza un mayor porcentaje de adiciones minerales en la dosificación y mayor es su finura, se desarrolla más retracción autógena.

Maia et al. (2009) también estudian la influencia del filler en hormigones autocompactantes. Utilizan tres diferentes mezclas fabricadas a partir una relación agua/cemento igual a 0,40 y

los mismos componentes, pero con tres niveles de contenido de pasta: bajo, medio y alto, ver Figura 2.40.

Concluyen que el contenido de filler tiene influencia en la retracción probablemente al reducir la permeabilidad y aumentar la compacidad del hormigón estudiado. Las mezclas con alto contenido de pasta presentan propiedades mecánicas mejoradas y menor retracción, en comparación con las mezclas con bajo contenido de pasta. La presencia de filler acelera las reacciones de hidratación y disminuye significativamente el tiempo de fraguado obteniendo tempranamente pastas con baja permeabilidad.

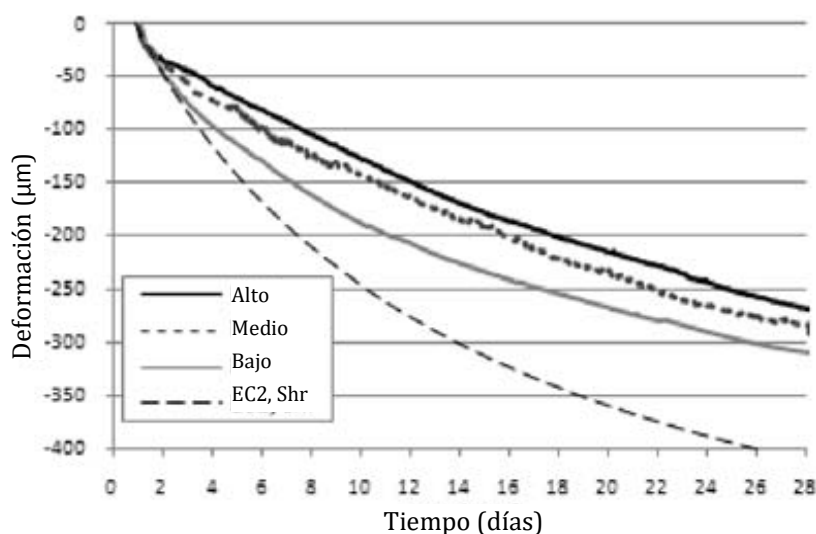


Figura 2.40 – Desarrollo de retracción (Maia et al., 2009)

2.5.4 Esqueleto granular

El trabajo de Igarashi et al. (1999) ha demostrado que colocar más agregado en la mezcla, baja la cantidad de retracción autógena. Esto parece razonable, debido a que los agregados son rígidos y la pasta de cemento es la porción de mezcla responsable de la retracción. (Holt, 2001)

Los áridos generan una restricción interna a la libre deformación de la pasta de cemento. Por lo tanto, la retracción autógena se reduce, si en la dosificación se utiliza una mayor proporción de áridos gruesos, del mayor tamaño máximo posible. (Giani, Navarrete y Bustos, 2008)

2.5.5 Aditivos

En algunos casos se agregan aditivos al hormigón con el fin de mejorar sus características. En el caso de hormigones autocompactantes fundamentalmente se utilizan superplastificantes para mejorar la trabajabilidad de las mezclas. En este trabajo de investigación no se analizará el efecto del aditivo en la mezcla.

2.5.6 Temperatura

La temperatura tiene una influencia importante en la deformación autógena y en el cambio de humedad relativa en pastas de cemento endurecidas. La expansión debida a la cristalización de las sales y al descenso de la humedad relativa provocado por la disolución de las sales en los poros con agua conducen a la deformación autógena y al cambio de humedad relativa en una pasta de cemento no restringida. Sobre este tema Jensen y Hansen (1999) realizan experimentos de determinación de deformación autógena aumentando la temperatura escalonadamente en pastas de cemento con ocho tipos diferentes de humo de sílice y cuatro niveles de temperatura, ver Figura 2.41 y Figura 2.42.

A partir del análisis experimental se concluye que la cantidad última de deformación autógena desarrollada después del fraguado, así como la tasa de retracción autógena, dependen de la temperatura. Especialmente a 20°C, observaron que se producía expansión a partir del fraguado hasta un día después de la adición de agua. El mecanismo de expansión puede tener una duración mayor pero en ese momento comienza a contrarrestarse con la retracción. La expansión se debe a la formación de etringita en la pasta de cemento, que es un proceso expansivo. Asimismo, cuando se agrega C_3A sintético o yeso se puede generar expansión después del fraguado.

Esta investigación concluye que a medida que aumenta la temperatura, se acelera la deformación autógena. Además al aumentar la temperatura escalonadamente, durante un mismo experimento, se observó que la temperatura induce expansión térmica y cambios en la tasa de deformación. En cada cambio de temperatura, al sistema le lleva unas horas estabilizarse, debido a la redistribución interna del agua en el sistema de poros de gel del cemento.

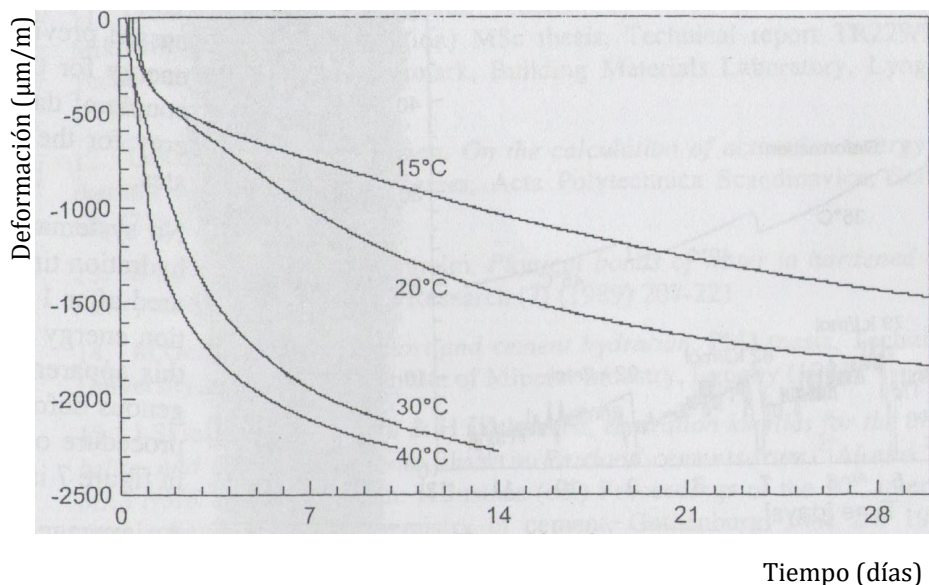


Figura 2.41 – Deformación autógena de pasta de cemento portland blanco con $a/c=0,30$ y 20% de adición de humo de sílice. Las temperaturas de exposición se indican en las curvas (Jensen, 1999)

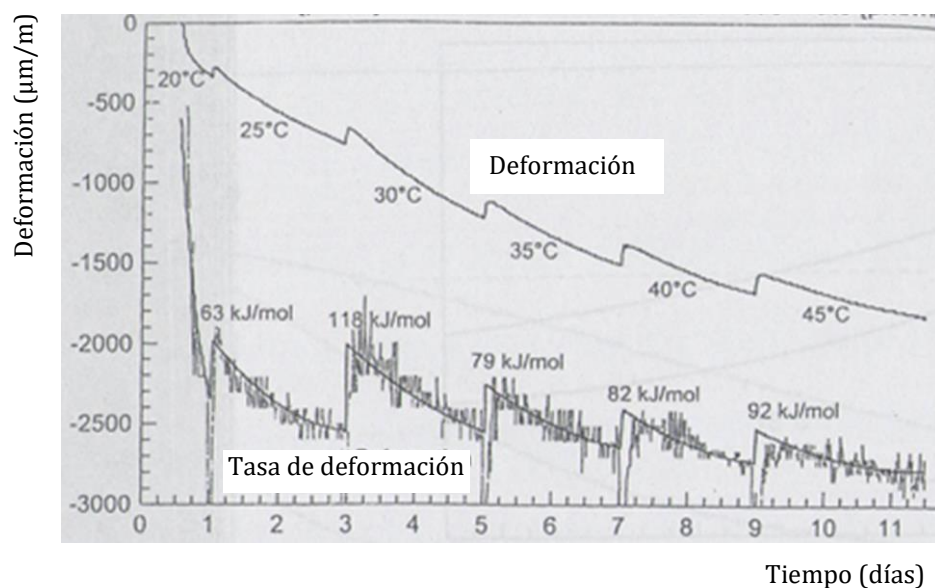


Figura 2.42 – Deformación autógena y tasa de deformación de pasta de cemento Portland blanco con $a/c=0,30$ y 20% de adición de humo de sílice durante el aumento escalonado de temperatura (Jensen, 1999)

Soliman y Nehdi (2011) estudiaron muestras de hormigones de ultra alto desempeño sometidas a diferentes temperaturas ambiente (10, 20 y 40 °C) bajo humedades relativas entre 40% y 80%.

La Figura 2.43 muestra el esfuerzo autógeno para la mezcla de control ($a/c=0,25$) bajo condiciones de sellado en los primeros 7 días a diferentes temperaturas de curado. El incremento de la temperatura de 20°C a 40°C acelera la deformación autógena durante las primeras 24 h, lo que puede ser explicado por la aceleración de las reacciones de hidratación, resultado de mayor retracción química. Esta última es considerada como la principal fuerza conductora para que se produzca retracción hasta el momento en que se forma un esqueleto rígido interno.

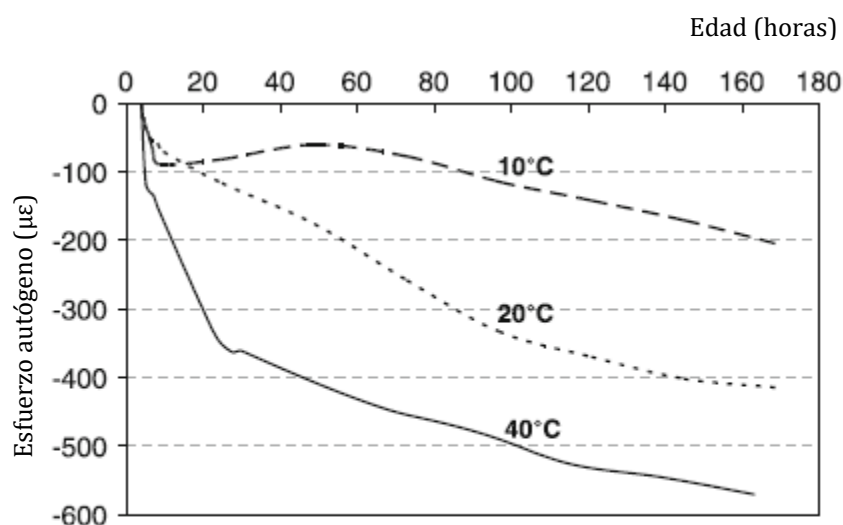


Figura 2.43 – Esfuerzos autógenos para mezcla control ($a/c=0,25$) a 10, 20 y 40°C (Soliman y Nehdi, 2009)

Después del primer día de hidratación la tasa de esfuerzo autógeno a 40°C comienza a decrecer, lo mismo sucede a 20°C a los 4 días. Esto podría ser atribuido a la acción dual de la temperatura en la microestructura de la matriz cementícea. Temperaturas altas de curado motivan el desarrollo de un esqueleto sólido fuerte, que resiste el esfuerzo autógeno. Simultáneamente, la alta temperatura de curado resulta en una estructura gruesa de poros (radios de poros mayores) que conducen a esfuerzos capilares bajos y consecuentemente baja tasa de desarrollo de esfuerzo autógeno.

A 10°C el esfuerzo desarrollado muestra una casi meseta a unas pocas horas luego del inicio de fraguado, después comienza a expandirse ligeramente antes que el esfuerzo de retracción autógena se incremente nuevamente. Esta expansión podría no ser atribuida al efecto térmico de las reacciones de hidratación debido a que la sección transversal de la probeta es pequeña, pero podría ocurrir debido a la formación de etringita.

2.6 DESEMPEÑO, DURABILIDAD Y SOSTENIBILIDAD

Actualmente, se recomienda la utilización de especificaciones en base a requisitos de desempeño, dejando de lado aquéllas establecidas en base a requisitos prescriptivos, ya que estas últimas condicionan la innovación y el desarrollo de nuevos productos. Es así, que los materiales de construcción, son cada vez más, especificados a partir de requisitos que aseguran la adecuación al uso que se pretende de ellos asociado a una función determinada dentro del edificio.

Los materiales cementíceos, objeto de este estudio, no escapan a estos criterios generales. Se entiende necesario profundizar en el conocimiento acerca de los parámetros que afectan en forma desfavorable el comportamiento en uso del hormigón y el mortero con el propósito de evitar o reducir los efectos negativos. Para ello, es necesario distinguir en qué medida los diferentes materiales componentes y las distintas dosificaciones afectan estos parámetros, y por ende, el desempeño de los productos resultantes a partir de los mismos.

En ese sentido, este trabajo de investigación se centra en cuantificar la deformación autógena de distintos microhormigones. Se identifica la retracción autógena como parámetro que puede incidir en la fisuración afectando su desempeño, desde lo estructural hasta lo puramente estético.

Especialmente, en el caso del hormigón, por tratarse de un material estructural, se le exige la adecuación a su destino, o sea que tenga una durabilidad adecuada bajo condiciones reales de exposición. Es así que en las especificaciones actuales, además de los requisitos tradicionales, se incluyen requisitos referidos a durabilidad. En algunos casos, la durabilidad se expresa como una vida útil esperada de la estructura, expresada en años.

Según afirma Aitcin (2003), los problemas de durabilidad del hormigón convencional pueden ser asociados a la severidad del ambiente y al uso inapropiado de relaciones agua/aglomerante altas. Los hormigones de alto desempeño (HAD) que tienen relación agua/aglomerante entre 0,30 y 0,40 son usualmente más durables que el hormigón convencional, no sólo porque son menos porosos, sino también porque sus capilares y redes

de poros no están conectados y entonces, como se muestra en la Figura 2.44, se desarrolla autodesecación. En el HAD, la penetración de agentes agresivos es difícil y solamente superficial. Sin embargo, la autodesecación puede ser muy dañina si no es controlada durante la fase temprana del desarrollo de las reacciones de hidratación, por lo tanto, el HAD debe ser curado de modo diferente al hormigón convencional.

Los hormigones se diseñan con el propósito de alcanzar los requisitos de resistencia previamente establecidos y promover la durabilidad de las estructuras de hormigón a largo plazo, pero estas dos características pueden verse comprometidas si el hormigón se fisura. La fisuración es un proceso complejo que depende de los materiales, de las prácticas de construcción, de las cargas estructurales y de las condiciones ambientales. Por lo tanto, en este trabajo de investigación, específicamente, se propone variar las proporciones de los materiales a los efectos de determinar la retracción autógena en microhormigones, asumiendo que la retracción autógena está asociada directamente al riesgo de fisuración.

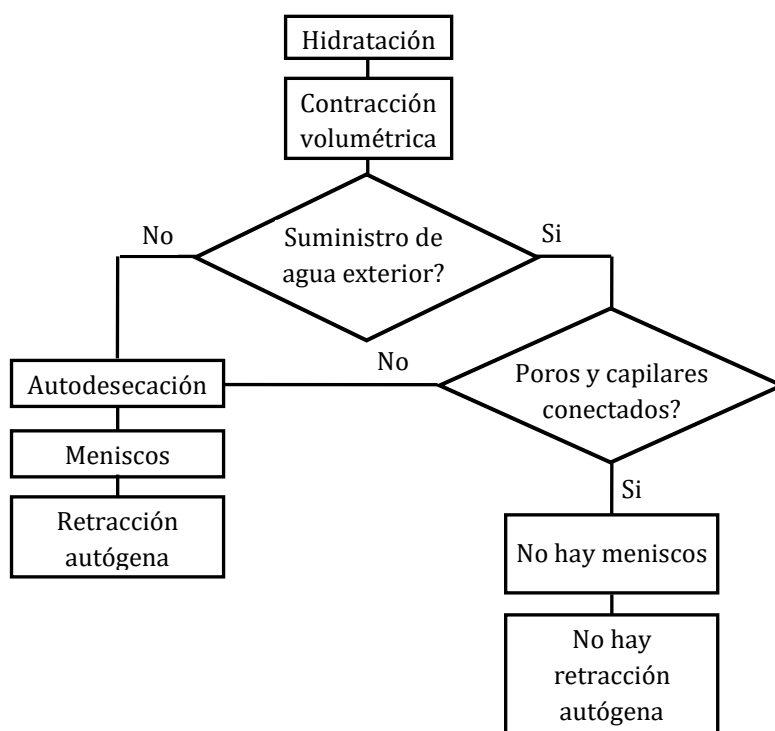


Figura 2.44 – Influencia de condiciones de curado en la ocurrencia de la retracción autógena (Aitcin, 2003)

Una mirada más amplia sobre estos temas, se puede hacer desde el punto de vista de la sostenibilidad. En ese sentido, Aitcin (2003) afirma que cada vez más, son utilizados sistemas ternarios para tomar ventaja de la sinergia de los componentes minerales para mejorar las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido y elaborar hormigón de alto desempeño más económico y ecológico. Asimismo, sostiene que el hormigón de alto desempeño puede ser elaborado solamente con cemento o con cualquier combinación de cemento y componentes minerales, tales como escoria de alto horno expansiva, ceniza volante, humo de sílice, metacaolín, ceniza de cáscara de arroz, y fillers, como por ejemplo, polvo de piedra caliza.

Según Aitcin et al. (2008), los hormigones del mañana serán más tecnificados y de formulaciones más diversas, con el fin de utilizarse en aplicaciones cada vez más específicas por propietarios cada vez más preocupados por la durabilidad de sus edificios o infraestructura en general. Contendrán cada vez menos clinker y cada vez más aditivos y materiales cementantes diferentes al cemento portland para mejorar la sostenibilidad del hormigón.

Siendo más específico, Aitcin et al. (2008) agrega que la relación agua/cemento (a/c) promedio disminuirá para mejorar la eficiencia energética y la sostenibilidad del hormigón. La sustitución parcial de una arena natural de peso normal por una arena de peso ligero saturada será más común, con el fin de contrarrestar todas las formas de retracción (plástica, autógena y por secado) en el hormigón de alto desempeño, así como el hormigón que contenga un alto porcentaje de material cementante requerirá un periodo de curado más prolongado para lograr desarrollar por completo su potencial en resistencia y durabilidad.

En definitiva, Aitcin (2003) afirma que los nuevos desarrollos en hormigón se basan en la utilización de sus componentes en su mayor potencial con el fin de obtener un material con un ciclo de vida más largo. Culminado este ciclo, el hormigón volverá al ambiente terrestre como piedra caliza, arcilla y arena de sílice, los cuales son minerales estables en forma de calcio, sílice, hierro y aluminio.

En virtud de lo antes expuesto, el presente trabajo pretende contribuir al desarrollo de materiales cementíceos fabricados con materiales nacionales, diseñados con criterios de sostenibilidad, capaces de satisfacer los requisitos de desempeño que aseguren una durabilidad adecuada al propósito.

2.7 APLICACIONES

2.7.1 Prefabricación

Jensen (2005) relata que en Dinamarca, desde principios de la década del 80, se realizaron experiencias en prefabricación con nuevas formulaciones de hormigones de alto desempeño (HAD) basadas en la buena trabajabilidad en estado fresco y la alta resistencia en estado endurecido que presentaba este material. Durante el endurecimiento, en piezas de poco espesor, se detectaban fisuras. Este problema fue solucionado más tarde a partir de la utilización de una nueva tecnología de curado desarrollada por P.F. Hansen.

En esa época, la retracción autógena no era considerada por los profesionales dedicados tanto a la investigación como a la práctica del hormigón. Sin embargo, hubo proyectos enfocados al estudio de la deformación y de los fenómenos que se desarrollan durante la edad temprana de la hidratación de los materiales cementíceos. Estos proyectos resaltaban la importancia de establecer técnicas adecuadas para la medición de estos fenómenos. Según Jensen (2005), recién en 1988 se comprendió que el problema de fisuración podría ser solamente explicado por la retracción autógena.

2.7.2 Pavimentos

En general, todo tipo de retracción implica problemas de durabilidad. En el caso de los pavimentos, como el hormigón se contrae debe aliviar las tensiones y si no se realizan juntas para posibilitar el movimiento se produce la fisuración. Aparecen en la bibliografía referencias a casos de pavimentos que se fisuran, aún cuando se aplican prácticas de curado ideales. Holt (2001) sostiene que estas fisuraciones podrían ser el resultado de retracción autógena.

Giani, Navarrete, Bustos (2008) afirman también la probabilidad de que la fisuración temprana que se observa en pavimentos de hormigón esté directamente relacionada con el desarrollo de la retracción autógena. Sobre todo si se considera que el hormigón de pavimentos normalmente se protege frente a pérdidas de agua, inmediatamente después de su acabado superficial. Es así que resulta poco probable que en un plazo tan corto como 24 o 48 horas, se desarrolle una retracción de secado suficientemente elevada como para justificar la formación de fisuras. Éstas se observan normalmente cuando se realiza la junta después de las primeras 24 horas o en las primeras 16 horas dependiendo de las condiciones climáticas y del cuidado que se realice del pavimento.

Choi, Park y Jung (2011) afirman que los pavimentos de hormigón proporcionan una vida útil duradera y notable aplicabilidad para el tráfico pesado. Si bien ofrecen ventajas en términos de durabilidad y eficiencia económica, su reparación en caso de degradación o daños es una gran desventaja. Debido a ello es de interés la investigación para asegurar la disponibilidad de tecnologías para el control de la retracción a temprana edad y a largo plazo. Por consiguiente, estudian la retracción por secado y la retracción autógena en hormigones para pavimento reforzados con fibras.

Gao et al. (2012) plantean que la comprensión de la retracción y la fisuración a edad temprana de estructuras de hormigón es importante, especialmente para pavimentos con grandes superficies expuestas a ambientes exteriores y sometidos a grandes cargas de servicio. Por ello, investigan la influencia de diversos aditivos minerales (cenizas volantes, humo de sílice, escoria de alto horno) sobre el comportamiento de retracción del hormigón, especialmente del hormigón autocompactante.

2.7.3 Hormigones de alto desempeño (HAD)

Los hormigones de alto desempeño (HAD, siendo su sigla en inglés HPC) son aquellos hormigones que muestran ventajas comparados con los hormigones convencionales, por ejemplo, buena trabajabilidad en estado fresco o alta resistencia en estado endurecido. Debido a la baja relación agua/cemento, estos hormigones se caracterizan por tener baja porosidad y una estructura de capilares fina, particularmente cuando se agrega humo de sílice a la mezcla, resultando en una baja permeabilidad. Por otro lado, debido al transporte restringido de humedad, un curado mediante un suministro externo de agua puede ser efectivo sólo superficialmente. En las zonas más profundas se produce autodesecación debido a la hidratación del cemento. Como resultado, se genera retracción autógena y eventualmente

micro o macrofisuras. (Fontana et al., 2007; Lura, Jensen y Breugel, 2003; Jensen y Hansen, 2001)

En lo que refiere a hormigón de alto desempeño expuesto a condiciones ambientales severas, cabe decir que este tipo de hormigón se comenzó a utilizar en los últimos años de la década del sesenta en aplicaciones protegidas (fundamentalmente columnas de edificios muy altos, que no estaban sujetos a condiciones severas del ambiente) y recién a finales de los ochenta se empezó a utilizar en exteriores.

Aitcin et al. (2008) plantea que la falta de conocimientos fundamentales sobre la retracción autógena y sobre las diferentes formas de controlarla conduce a tener estructuras de hormigón de alto rendimiento que presentan fisuras a través de las cuales los agentes agresivos pueden llegar a los aceros. Por lo tanto, entiende que corresponde tomar las medidas necesarias para prevenir o al menos controlar tanto como sea posible el desarrollo perjudicial de retracción autógena. Sin embargo, plantea conveniente tomar ventaja de algunos aspectos positivos del desarrollo de retracción autógena, porque desde el punto de vista de la durabilidad, es muy importante dejar que se generen algunos meniscos dentro de la pasta de cemento hidratada. Estos meniscos desarrollan 'tapones de aire' dentro de la red capilar y estos tapones de aire disminuyen considerablemente la permeabilidad del hormigón.

En particular, el hormigón autocompactante es un hormigón de alto desempeño ya que presenta un mejor comportamiento en estado fresco. Fue primeramente desarrollado por Okamura & Ozawa (2000).

En la Instrucción de Hormigón Estructural EHE 08 (2008) se define hormigón autocompactante como aquel hormigón que, como consecuencia de una dosificación estudiada y del empleo de aditivos superplastificantes específicos, se compacta por la acción de su propio peso, sin necesidad de energía de vibración ni de cualquier otro método de compactación, no presentando segregación, bloqueo de árido grueso, sangrado, ni exudación de la lechada. O sea que se trata de un hormigón muy fluido que tiene la capacidad de llenar el encofrado sin necesidad de ser vibrado, tiene la habilidad de pasar entre las barras de armadura y presenta estabilidad dinámica y estática lo que le permite alcanzar una distribución uniforme del árido en toda su masa.

En comparación con los hormigones convencionales, se obtiene una interfase pasta-árido más densa debido a la ausencia de vibración y a la incorporación de adiciones y fillers. Esto disminuye la velocidad de ingreso de la mayoría de los agentes agresivos favoreciendo la durabilidad.

En definitiva, presenta ventajas desde el punto de vista ambiental, económico y tecnológico, tales como reducción del tiempo total de construcción y de los costos, mejoras en las condiciones de trabajo por la eliminación de la vibración, facilidad para alcanzar un mejor producto final tanto en terminación como en durabilidad y permite el uso de moldes con formas complejas.

Sin embargo, según Alrifari et al. (2009), debido a su particular composición (aumento en el volumen de finos y relación agua/finos baja) el hormigón autocompactante es más sensible a la fisuración en comparación con los hormigones convencionales.

En este sentido la Instrucción de Hormigón Estructural EHE 08 (2008), cuando desarrolla el tema de retracción en hormigones autocompactantes establece lo siguiente:

“Debido a que el hormigón autocompactante tiene una mayor cantidad de finos en su composición y una alta resistencia frente a la segregación, el material prácticamente no exuda agua durante la puesta en obra. Si bien teóricamente este aspecto resulta positivo, en la práctica el efecto puede resultar inverso, ya que muchas veces es el agua de exudación la que compensa el agua que se evapora en estado fresco y, consecuentemente, evita la fisuración por retracción plástica.

De esta manera, debido a las bajas relaciones agua/ligante que en general se consideran, cobra especial importancia el curado del hormigón autocompactante, especialmente en estructuras con altas relaciones superficie/volumen.

En el hormigón autocompactante, más fácilmente que en el hormigón de compactación convencional, puede darse una combinación de factores que podrían conducir a una significativa retracción endógena; un contenido de cemento superior y el uso de un cemento más fino (conducentes a un mayor calor de hidratación), la mayor cantidad de material fino en general y las bajas relaciones agua/finos. La utilización de cenizas volantes y/o filler calizo puede contribuir a la reducción de la retracción endógena.”

Se aclara que la Instrucción de Hormigón Estructural EHE 08 hace referencia a retracción autógena como retracción endógena.

Maia et al. (2009) afirman que usualmente para lograr la autocompactabilidad el contenido de agregado se limita (especialmente el agregado grueso) y el contenido de finos se incrementa, lo que puede cambiar considerablemente su comportamiento frente a la retracción. De esta manera, se logran hormigones autocompactantes que alcanzan las resistencias especificadas y minimizan el contenido de cemento pero no se debe descuidar la retracción.

La experiencia sobre hormigón convencional ha señalado que la durabilidad del hormigón está dada fundamentalmente por la permeabilidad y la rigurosidad del ambiente circundante. En hormigones con baja relación agua/aglomerante, la conectividad del sistema de poros baja dramáticamente. Es así que se da una migración de iones agresivos o gases más dificultosa en hormigones de alto desempeño en comparación con hormigones convencionales. Es por este motivo que se puede suponer que la vida en servicio del hormigón de alto desempeño debería exceder la del hormigón convencional sometido a las mismas condiciones ambientales. (Aitcin, 2003)

2.7.4 Hormigones de ultra alto desempeño (HUAD)

Soliman y Nehdi (2009) estudiaron el efecto de las condiciones de secado en la retracción autógena en hormigones de ultra alto desempeño (HUAD, siendo en inglés UHPC) a edad temprana.

El HUAD tiene alta resistencia y durabilidad mejorada, pero es afectado por la autodesecación y la alta retracción autógena debido a su baja relación agua/aglomerante. La exposición a diferentes condiciones de secado y pérdida de humedad a edad temprana son de interés en aplicaciones de HUAD de poco espesor, tales como plateas, paneles o cuando es utilizado para reparaciones, donde el área superficial por unidad de volumen del material es alta.

Para la elaboración de las mezclas se utilizaron dos relaciones agua/cemento de 0,22 y 0,25, arena con un tamaño de partícula entre 0,1 mm y 0,8 mm (no se incluyó agregado grueso), humo de sílice como sustitución parcial del cemento y un aditivo reductor de agua de alto rango.

Los investigadores plantean que una evaluación exacta de las deformaciones asociadas es útil para buscar soluciones con el fin de reducir las deformaciones a edad temprana y las fisuras asociadas, logrando estructuras más fuertes, más durables y con menor mantenimiento.

Koh et al. (2011) estudiaron las propiedades de retracción del hormigón de ultra alto desempeño (HUAD) y examinaron los efectos de la utilización de un aditivo expansivo y un agente reductor de retracción en la reducción de retracción. Los HUAD desarrollados tenían una resistencia a compresión de más de 180 MPa, resistencia extremadamente alta a la flexión que alcanzaban valores que exceden los 35 MPa y durabilidad mejorada respecto a los hormigones convencionales.

Para la fabricación de las mezclas utilizaron relaciones agua/aglomerante menores de 0,2, grandes cantidades de aglomerante fino, no incorporaron agregado grueso y el curado se realizó a altas temperaturas que alcanzaban los 90°C a temprana edad. Este proceso contribuyó a acelerar significativamente la propagación de la hidratación a temprana edad, lo que determinó un gran desarrollo de retracción autógena.

Ambas investigaciones refieren a microhormigón ya que, como se mencionaba anteriormente, no se utiliza en su composición agregado grueso. Su carácter de ultra alto desempeño refiere a que excede en sus prestaciones a los hormigones de alto desempeño y consecuentemente a los hormigones convencionales. Esta tesis de maestría abordó el estudio de este tipo de material pero, con prestaciones correspondientes a hormigones de alto desempeño.

2.7.5 Microhormigones de alto desempeño (MHAD)

El microhormigón de alto desempeño (MHAD), como señala su denominación, es un hormigón que excede en sus prestaciones al microhormigón convencional y no contiene en su composición agregado grueso.

Las ventajas del MHAD radican, entre otras, en alcanzar resistencias a compresión superiores a las habituales, presentar una mayor durabilidad relacionada con una menor permeabilidad, permitir una mayor libertad de forma de las piezas construidas, posibilitar la elaboración de piezas de espesores reducidos, ofrecer una gran facilidad de colocación, reducir el peso de las estructuras, los tiempos de construcción y los costos directos e indirectos de obra. (Rodríguez de Sensale et al., 2012)

El Proyecto de Investigación y Desarrollo PR_FMV_2009_1_Nº2717 del Programa Fondo María Viñas de la ANII abordó la investigación, desarrollo y aplicación de microhormigón de alto desempeño (MHAD) con materiales y técnicas locales. En este trabajo de investigación se presentaron aspectos vinculados a la selección de materiales y dosificación del MHAD. En el marco de ese proyecto, la presente tesis de maestría se enfoca en el estudio de la retracción autógena en microhormigones fabricados a partir de materiales nacionales.

Capítulo 3

Investigación experimental

Este capítulo contiene 4 apartados. El primero refiere al diseño experimental indicando cuales fueron las matrices cementíceas estudiadas y las propiedades que se analizaron. El siguiente, refiere a los procedimientos de preparación de muestras, llenado de moldes y ensayo. También incluye, cuando corresponde, los métodos para el cálculo de los resultados. El tercer apartado refiere a la selección y caracterización de los materiales, indicando sus especificaciones. Por último, el cuarto apartado señala las dosificaciones utilizadas.

Se realizaron ensayos de determinación de la deformación autógena en 5 muestras de MHAD. Las dos primeras, denominadas POBRE y MEDIA POBRE, corresponden a las usualmente empleadas para realizar microhormigón en Uruguay y en Brasil. Las restantes, denominadas MEDIA, MEDIA RICA y RICA, corresponden a MHAD estudiados en el marco del proyecto ANII FMV 2009-1-2717.

A continuación, con el propósito de conocer la influencia del árido en el desarrollo de deformación autógena, se midió esta propiedad en las pastas correspondientes a los MHAD antes estudiados.

A su vez, para conocer la incidencia de una adición en la deformación autógena se incorporó ceniza de cáscara de arroz (CCA) a uno de los MHAD antes estudiados. El MHAD elegido fue considerado como referencia. Se fabricaron tres MHAD con su misma dosificación, excepto por el hecho de que para su elaboración se sustituyó parte del cemento portland por CCA. En cada una de ellas se utilizó un CCA de diferente origen.

En todos los casos se realizaron ensayos para la determinación del tiempo final de fraguado, pues es el denominado “tiempo cero” a partir del cual se calcula la deformación autógena. Asimismo, con el propósito de estudiar la relación entre la deformación autógena y otras propiedades se realizaron ensayos de deformación por secado y de determinación de resistencias mecánicas.

Todos los ensayos fueron realizados en las instalaciones y con los equipos del laboratorio del Instituto de la Construcción (LabIC) de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad de la República.

En el capítulo siguiente se presentarán los resultados obtenidos de estos ensayos, así como su análisis y discusión.

3.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

El Diseño experimental se divide en tres etapas. La Tabla 3.1 muestra las propiedades y las matrices cementíceas que fueron analizadas.

Tabla 3.1 - Diseño experimental

Etapa	Propiedades		MHAD Y PASTAS													
			MHAD					PASTAS MHAD					MHAD			
			P	MP	M	MR	R	P	MP	M	MR	R	CCAR1	CCAR2	CCARH	
1	a. Deformación autógena	48 h	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
		3 d	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
		7 d	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
		14 d	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
		21 d	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
		28 d	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
		56 d	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
		91 d	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	181 d	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
b. Tiempo final de fraguado		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
2	c. Deformación por secado	2 d	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
		3 d	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
		7 d	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
		14 d	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
		21 d	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
		28 d	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
		56 d	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
		91 d	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
		181 d	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
3	d. Resistencia a compresión	28 d	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	e. Resistencia a flexión	28 d	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	

En la primera etapa se estudió la deformación autógena a diferentes edades de 5 muestras de MHAD denominadas, según el contenido de cemento portland que incorporan: pobre (P), media pobre (MP), media (M), media rica (MR) y rica (R). Estas muestras difieren en cuanto a relación arena/cemento portland, agua/cemento portland y en la cantidad de cada uno de sus materiales componentes, principalmente en la cantidad de cemento portland, lo cual se presenta en 3.3 (específicamente, ver Tabla 3.9).

Este estudio se complementó con el análisis de deformación autógena en las pastas correspondientes a cada uno de los MHAD analizado previamente. También se analizó la influencia de la incorporación de una adición mineral (CCA) en el MHAD rica (R), considerado como de referencia. Para ello, se consideraron 3 tipos diferentes de ceniza de cáscara de arroz (CCAR1, CCAR2 y CCARH). Más adelante en el apartado 3.2.5 se indican las características de

cada una de estas CCA.

Se aclara que el tiempo de fraguado se estudió, pues como se explica en el apartado 3.4.4, es fundamental para el cálculo de la deformación autógena.

En la segunda etapa se estudió la deformación por secado y en la tercera etapa se determinaron las resistencias mecánicas en los MHAD, en sus pastas y en los MHAD con CCA.

En resumen, las propiedades analizadas fueron las siguientes: deformación autógena, tiempo final de fraguado, deformación por secado, resistencia a flexión y a compresión.

La Tabla 3.2 muestra la cantidad de probetas ensayadas por propiedad analizada y el total de probetas ensayadas.

Tabla 3.2- Cantidad de probetas ensayadas por propiedad analizada

Propiedades	Cantidad de probetas ensayadas	
	por tipo de MHAD o pasta	Cantidad
a. Deformación autógena	3	39
b. Tiempo de fraguado final	2	26
c. Deformación por secado	3	39
d. Resistencia a flexión	3	39
e. Resistencia a compresión	6	78
	Cantidad total :	221

3.2 SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Los materiales componentes del MHAD son básicamente los de un hormigón convencional, excepto por el hecho de que no tiene agregado grueso. Es así, que el MHAD contiene: cemento portland, agregado fino, agua y aditivos. Se le puede incorporar fibras para disminuir la fisuración temprana y, excepcionalmente, adiciones cuando se necesita obtener valores muy altos de resistencia mecánica o mejorar otra propiedad.

A continuación, se proporcionan las características de los materiales utilizados en el presente trabajo, siendo el cemento portland, el agregado fino y el aditivo los mismos que se emplearon en el proyecto ANII FMV 2009-1-2717.

3.2.1 Cemento portland

Respecto al aglomerante, de acuerdo a lo expuesto en 2.5.2, se eligió el cemento portland fabricado en Uruguay de mayor contenido de C_2S , menor contenido de C_3A y mayor finura, basándose en estudios de Jensen (1995) y Jensen et al. (1999).

Durante la ejecución del proyecto se utilizó cemento portland gris normal, CPN 40 fabricado en la planta de Paysandú, Uruguay de acuerdo a la Norma UNIT 20. Sus principales características se indican en las Tablas 3.3, 3.4 y 3.5.

Tabla 3.3 - Valores característicos del análisis químico del cemento portland normal utilizado

Análisis Químico	Unidad	Valor característico	Requisito Norma UNIT 20
Pérdida por calcinación (PPC)	%	1,44	≤ 5
Trióxido de azufre (SO_3)	%	1,86	$\leq 3,5$
Oxido de magnesio (MgO)	%	2,97	≤ 6
Dióxido de silicio (SiO_2)	%	22,19	---
Oxido de calcio (CaO)	%	63,89	---
Oxido de aluminio (Al_2O_3)	%	3,83	---
Oxido de hierro (Fe_2O_3)	%	3,30	---
Oxido de sodio (Na_2O)	%	0,05	---
Oxido de Potasio (K_2O)	%	0,22	---
Oxido de Sodio equivalente ($\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O}$)	%	0,19	---
Residuo insoluble	%	0,64	≤ 5

Tabla 3.4 - Valores de resistencia a compresión del cemento portland normal utilizado

Resistencia a compresión	Unidad	Valor característico	Requisito Norma UNIT 20
Resistencia compresión 2 días	MPa	16,3	≥ 10
Resistencia compresión 7 días	MPa	30,8	-
Resistencia compresión 28 días	MPa	52,3	$\geq 40 \text{ y } \leq 60$

Tabla 3.5 - Propiedades físicas del cemento portland normal utilizado

Ensayos físicos	Unidad	Valor característico	Requisito Norma UNIT 20
Retenido tamiz 74 μm	%	4,3	≤ 15
Superficie específica (Blaine)	m^2/g	358	≥ 250
Tiempo de fraguado inicial	min	195	≥ 45
Tiempo de fraguado final	min	325	≤ 600
Expansión en autoclave	%	0,05	$\leq 0,90$

3.2.2 Áridos

Como árido fino se empleó arena de río, cuyas características principales se indican en la Tabla 3.6. Su módulo de finura es 2,84 y la Tabla 3.7 muestra la composición granulométrica.

Tabla 3.6 – Características principales del árido utilizado

Propiedad	Valor característico	Metodología de ensayo
Módulo de finura	2,84	UNIT-NM 248
Dimensión máxima característica (mm)	4,76	UNIT-NM 248
Contenido de finos (%)	< 1	UNIT-NM 46
Densidad de partículas (kg/m ³)	1610	UNIT-NM 45
Densidad relativa del agregado seco (g/cm ³)	2,61	UNIT-NM 52
Índice de espacios vacíos (%)	38	UNIT-NM 45
Absorción de agua (%)	0,3	UNIT-NM 30

Tabla 3.7 – Granulometría del árido fino utilizado determinada según Norma UNIT-NM 248

Tamiz		Árido fino			Gráfico
Nº	Abertura de malla (mm)	Masa retenida (g)	Masa retenida (%)	Masa retenida acumulada (%)	
4	4,76	2,8	0,6	0,6	
8	2,38	12,7	2,5	3,1	
16	1,19	100,3	20,0	23,1	
30	0,590	210,3	42,1	65,2	
50	0,297	140,8	28,2	93,4	
100	0,150	24,4	4,9	98,3	
RESTO		8,7	1,7	100,0	

3.2.3 Agua

Para la preparación de las probetas de MHAD y de las pastas se utilizó agua destilada.

3.2.4 Aditivos

El uso de un aditivo superplastificante es requisito fundamental en el hormigón autocompactante. Para esta investigación, se utilizó un aditivo superplastificante basado en policarboxilatos con densidad de 1,10 kg/l, compatible con el cemento, cuyo porcentaje óptimo es de 0,2 % del peso del cemento.

Para seleccionar un aditivo superplastificante bueno y eficaz, fue necesario estudiar la compatibilidad de éste con el cemento, lo cual fue realizado en el proyecto ANII FMV 2009-1-2717, a partir de la aplicación de los métodos simplificados de miniasentamiento (minislump) y del cono Marsh.

3.2.5 Adiciones

Como en Uruguay se dispone de ceniza de cáscara de arroz (CCA) residual, en esta tesis se utilizaron tres tipos de CCA como adición, ya que la CCA es una adición mineral (Malhotra y Mehta, 1996; RILEM, 1988):

- CCA residual (CCAR1) producida a partir del proceso de parbolización con incineración a temperatura no controlada que proviene de la única fábrica de arroz parbolizado del Uruguay, Arroz Uruguayo S.A. (Arrozur),
- CCA residual (CCAR2) producida por el empleo de cáscara de arroz como biomasa para generar energía eléctrica en Galofer S.A. y
- CCA homogénea (CCAH) producida por incineración controlada que proviene de E.E.U.U. (Mehta, 1994).

La CCAR es un residuo procesado que fue molido en seco por el tiempo necesario para obtener un tamaño de partícula de 8 μm , o menor de acuerdo a Mehta (1994). Ambas cenizas residuales fueron molidas durante 30 minutos para su empleo en este trabajo. El tiempo óptimo de molienda fue determinado en el proyecto ANII FSE 2011-6476.

Las características físicas y químicas de las cenizas se presentan en la Tabla 3.8. El análisis químico muestra que todas las cenizas están principalmente compuestas por SiO_2 , a los efectos de tener similar tamaño medio de partícula.

Tabla 3.8 - Características de las cenizas de cáscara de arroz utilizadas

Propiedad		CCAR1	CCAR2	CCAH
Ensayos físicos	Densidad específica	2,08	2,16	2,16
	Tamaño medio de partículas	6,76 μm	3,4 μm	8 μm
Análisis químicos (%)	Dióxido de silicio (SiO_2)	83	83	88
	Óxido férrico (Fe_2O_3)	0,096	0,24	0,1
	Óxido de calcio (CaO)	0,30	0,29	0,8
	Óxido de magnesio (MgO)	0,10	0,13	0,2
	Óxido de manganeso (MnO)	0,12	0,25	0,2
	Óxido de Sodio (Na_2O)	No se detecta	No se detecta	0,7
	Óxido de Potasio (K_2O)	0,7	2	2,2
	Pérdida por calcinación	13,15	11,01	8,1

3.3 DOSIFICACIÓN DE LOS MHAD Y LAS PASTAS

Las dosificaciones de los morteros estudiados son las indicadas en la Tabla 3.9, siendo las utilizadas en el proyecto PR_FMV_2009_1_Nº2717.

Tabla 3.9 - Dosificación de las muestras estudiadas

Muestras	Relación arena/cemento portland	Relación agua/cemento portland	Cemento portland (kg/m³)	Arena (kg/m³)	Agua (kg/m³)	Aditivo (kg/m³)
POBRE	3,5	0,60	471	1647	280	2
MEDIA POBRE	3	0,50	536	1608	266	2
MEDIA	2,5	0,42	611	1531	253	2,5
MEDIA RICA	2	0,36	707	1413	252	3
RICA	1,5	0,30	856	1286	255	3

Como se ha mencionado antes, los dos primeras mezclas de MHAD, denominadas pobre (P) y media pobre (MP), corresponden a las usualmente empleadas para realizar microhormigón en Uruguay y en Brasil.

Las restantes, denominadas media (M), media rica (MR) y rica (R), se han obtenido siguiendo el procedimiento para dosificar desarrollado en el proyecto ANII FMV 2009-1-2717, el cual consta de 5 etapas (Rodríguez de Sensale et al, 2008); (Rodríguez de Sensale et al, 2012):

- 1) optimización de la pasta, mediante el cono de Marsh y el minislump,
- 2) optimización del esqueleto granular con los agregados secos sin compactar para obtener un MHADAC,
- 3) construcción de diagramas de dosificación y estudio de correlación entre las distintas variables involucradas (agua/cemento, agregado/cemento, consumo de cemento y resistencias),
- 4) cálculo de los materiales a emplear,
- 5) ajuste de mezclas de acuerdo a humedad de los agregados y contenido de sólidos del aditivo.

Cabe señalar que del MHAD pobre (p) al MHAD rica (R), se aumenta el contenido de cemento portland, se disminuye la relación arena/cemento portland y la relación agua/cemento portland.

Para la elaboración de las pastas se utilizaron las mismas relaciones agua/cemento portland que fueron indicadas en la Tabla 3.9 para los MHAD.

Para estudiar la influencia de la incorporación de CCA se hizo una sustitución en la dosificación de un MHAD seleccionado de referencia de 5% del cemento portland en peso para cada una de las cenizas de cáscara de arroz estudiadas. Se eligió la dosificación rica (R) como MHAD de referencia ya que es la que contiene mayor cantidad de cemento y la que alcanza mayores valores de deformación autógena.

3.4 PROCEDIMIENTOS

3.4.1 Metodologías de ensayo

Para cada una de las propiedades analizadas, se utilizaron las metodologías de ensayo establecidas en las normas técnicas que se indican en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10 – Metodologías de ensayo

Propiedad	Norma de referencia
Consistencia	UNE-EN 1015-3:2000/A1:2005/A2:2007
Tiempo de fraguado	ISO 9597:2008
Deformación autógena	ASTM C 1698:2009 (2014)
Resistencia a flexión	UNIT-ISO 679:2009
Resistencia a compresión	UNIT-ISO 679:2009
Deformación por secado	UNE 83831:2010 EX

Estas normas fueron seleccionadas a partir de una búsqueda en los catálogos disponibles de diferentes organismos de normalización. De existir varias con el mismo propósito, se eligió una en base a la adopción de un criterio.

En el caso de la determinación de la deformación autógena, se utilizó la norma ASTM C 1698 por ser la única norma técnica que se identificó a la fecha de la realización del análisis experimental.

La norma ASTM C 1698 referencia las normas ASTM C 191 y ASTM C 403 para la determinación del tiempo de fraguado. Sin embargo, se decidió utilizar a tales efectos, la norma ISO 9597 por ser un documento de nivel de normalización internacional. Esta última norma se corresponde con la norma ASTM C 191 en cuanto ambas refieren a la determinación del tiempo de fraguado de pastas de cemento utilizando el aparato de Vicat. La norma ISO 9597 amplía el alcance de aplicación de esta normativa a cementos comunes, otros cementos y materiales, y aclara que no debe ser utilizada para por ejemplo cementos con tiempo inicial de fraguado muy corto.

Con el propósito de verificar que la consistencia de las muestras amasadas alcanza un valor previamente definido antes de proceder a evaluar otras propiedades, se realizaron ensayos para la determinación de la consistencia. Para ello, se seleccionó la metodología establecida en

la norma EN 1015-3 para morteros frescos. Si bien esta norma pertenece a una familia de normas sobre métodos de ensayo de los morteros para albañilería tiene por objeto determinar, por medio del valor del escurrimiento, la consistencia de los morteros frescos amasados, por lo que es aplicable a las muestras de MHAD estudiadas en este trabajo de investigación.

De acuerdo a lo mencionado en la Introducción, este trabajo de investigación se realizó en el marco de un Proyecto más amplio que abordó la investigación, desarrollo y aplicación de MHAD. En ese proyecto se realizaron ensayos para la determinación de las resistencias mecánicas y de retracción por secado siguiendo las metodologías aplicables a muestras de hormigón. Por lo tanto, en este trabajo de investigación se decidió complementar esa información con la determinación de esas propiedades en las mismas muestras de MHAD en probetas de pequeñas dimensiones. Para ello, se siguieron los procedimientos establecidos en la norma internacional ISO 679 y la norma española UNE 83831. En particular, se utilizó la norma UNIT-ISO 679 que es la traducción del documento internacional. También corresponde aclarar que se seleccionó la norma española debido a que se solo se contaba con la barra de referencia y los moldes normalizados especificados en ese documento.

En todos los casos se utilizó la última versión vigente y se verificó que estuviera disponible el equipamiento especificado en cada documento normativo.

3.4.2 Preparación de las muestras de ensayo y llenado de los moldes

El árido fino se secó hasta masa constante en una estufa con capacidad de 160 l, rango de temperatura de (0–200)°C, precisión de 1°C, control de temperatura electrónico y circulación de aire forzada.

Para la preparación de las muestras de MHAD, primero se pesan los materiales necesarios según las dosificaciones establecidas en la Tabla 3.9 del apartado 3.2.2. Para ello, se utilizó una balanza con precisión de 0,1 g y capacidad máxima de 32 kg, ver Figura 3.3 a).

Después se incorpora el cemento portland al agua con el aditivo. Ese instante se registra como “tiempo cero” de mezcla. Se mezcla en la amasadora durante 30 segundos a velocidad lenta. A continuación, se incorpora el árido fino y se mezcla durante 60 segundos adicionales a velocidad alta. La Figura 3.1 muestra los materiales y equipos utilizados para la preparación de las muestras de ensayo.

El amasado se realizó en una amasadora que cumple las especificaciones de la Norma UNIT-ISO 679, de 5 l de capacidad, ver Figura 3.1. La velocidad de giro del recipiente de la amasadora es de 62 r.p.m. y 125 r.p.m. para velocidad baja y alta respectivamente. La velocidad de la paleta de la amasadora es de 140 r.p.m. y 285 r.p.m. para velocidad baja y alta respectivamente.

En el caso de las pastas se incorpora el cemento portland al agua y ese instante se registra como “tiempo cero” de mezcla. Seguidamente, se mezcla en la amasadora durante 90 s a velocidad baja. Inmediatamente, con una espátula se vuelca la pasta adherida en las paredes y

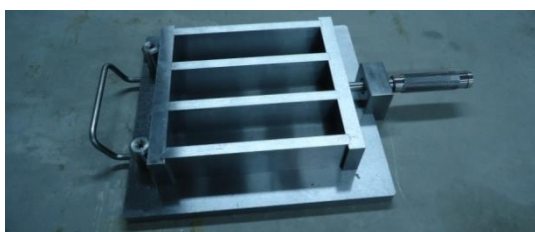
en el fondo del recipiente al centro del mismo, ver Figura 3.3 b). Se vuelve a mezclar en la amasadora por 90 s adicionales a velocidad alta.



Figura 3.1 – Equipos para la preparación de las muestras de ensayo

Para la elaboración de las probetas de los ensayos de resistencias mecánicas se utilizaron moldes de acero desmontables y rígidos, con tres compartimentos iguales para la preparación de 3 probetas idénticas de (40x40x160) mm, ver Figura 3.2, a). Estos moldes cumplen las especificaciones establecidas en la Norma EN 196-1.

Para la elaboración de las probetas de los ensayos de deformación por secado se utilizaron moldes similares a los descritos en el párrafo anterior, ver Figura 3.2, b). La diferencia radica en que las piezas laterales de los moldes de deformación por secado tienen orificios roscados, en los cuales se introducen pernos que quedan embutidos en la matriz cementícea. Ellos se encuentran en el centro de la cara de (40x40) mm y son necesarios para medir la variación de longitud de dichas probetas.



a)



b)

Figura 3.2 – Moldes de acero para probetas de (40x40x160) mm: a) para ensayos de resistencias mecánicas, b) para ensayos de deformación por secado

El llenado de los moldes para determinación de la resistencia a flexión, compresión y deformación por secado se realiza volcando en 2 capas la mezcla elaborada, en el interior del molde lubricado. Cada una de las capas se compacta con 25 golpes de pisón. Ver Figura 3.3 c) y d). Una vez llenado el molde se enrasa con una regla y se coloca en una bolsa de polietileno

cerrada, ver Figura 3.3 e). El molde se deja 24 h en ambiente con temperatura controlada a $(20,0 \pm 1,0) ^\circ\text{C}$.

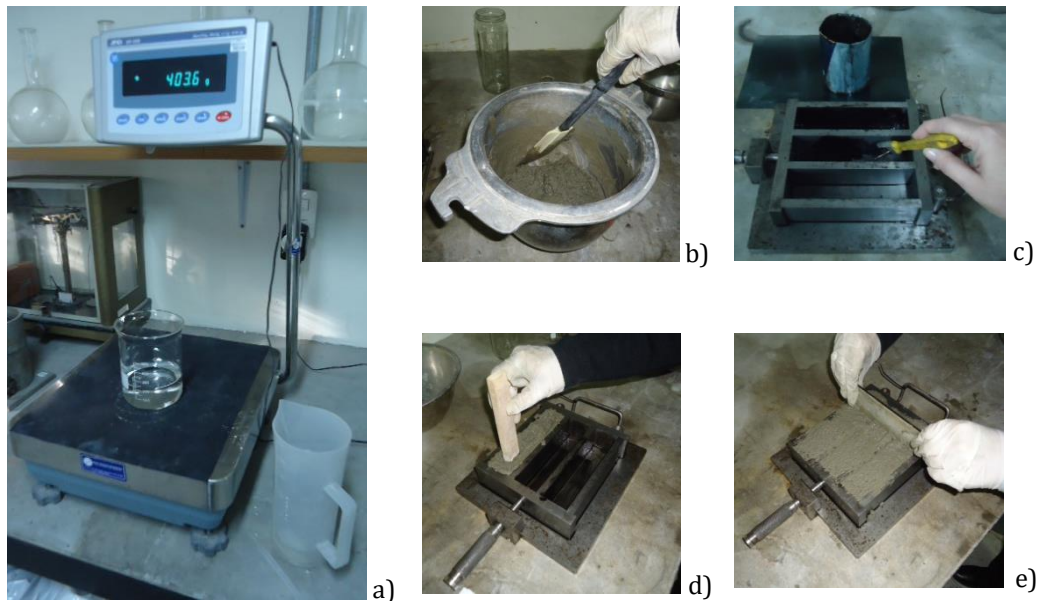


Figura 3.3 – Preparación de las probetas de (40 x 40 x 160) mm: a) determinación de la masa, b) amasado, c) lubricación del molde, d) compactación de la mezcla y e) enrasado de las probetas

Luego, hasta la fecha de ensayo, las probetas para la determinación de las resistencias mecánicas se curaron en un armario capaz de mantener la temperatura a $(20,0 \pm 1,0) ^\circ\text{C}$ y la humedad relativa constante por encima de 95 %, ver Figura 3.4. Este equipo también se utilizó para mantener bajo condiciones controladas de temperatura y humedad los moldes para determinar el tiempo de fraguado durante los intervalos entre mediciones.



Figura 3.4 – Armario de curado

El llenado de los moldes para determinación del tiempo de fraguado y para determinación de deformación autógena se explica en los apartados 3.2.4 y 3.2.5 respectivamente.

3.4.3 Determinación de la consistencia

Una vez finalizado el amasado se determina la consistencia de la muestra mediante el asentamiento del tronco de cono en la mesa de sacudidas, según el procedimiento establecido en la Norma UNE-EN 1015-3. Para determinar el escurrimiento se miden dos diámetros de cada muestra ensayada y luego se promedian los valores, ver Figura 3.5.



Figura 3.5 – Determinación de la consistencia con la mesa de sacudidas: a) equipo de ensayo y b) medición del escurrimiento

Para cada una de las 5 muestras de MHAD de referencia, se verificó que el valor de escurrimiento hallado estuviera dentro del rango de (26 ± 2) cm. En el caso de las pastas y de los MHAD con incorporación de CCA, se determinó el escurrimiento con el propósito de compararlo con el de los MHAD de referencia.

3.4.4 Determinación del tiempo final de fraguado

Debido a que el tiempo final de fraguado es un dato necesario para el cálculo de la deformación autógena, la Norma ASTM C 1698 (metodología para la determinación de la deformación autógena) referencia a la Norma ASTM C 191 (metodología para la determinación del tiempo final de fraguado). Para el presente trabajo, en lugar de este último documento, se siguió la metodología establecida en la Norma ISO 9597 debido a que es equivalente pero de nivel de normalización internacional.

A continuación, se describe brevemente el procedimiento utilizado para la determinación del tiempo final de fraguado según la Norma ISO 9597.

Para la determinación del tiempo de fraguado se utilizó un equipo normalizado que consiste en un aparato de Vicat automático, con agujas para inicio y final de fraguado y molde troncocónico, ver Figura 3.6.

El llenado de los moldes, para determinación del tiempo de fraguado, se realiza volcando la mezcla preparada de acuerdo a 3.2.2 en el interior del molde apoyado en la base y

previamente lubricado con aceite mineral. Este molde no se compacta ni se vibra, se remueven los vacíos en la pasta con unos golpes suaves con la mano y luego se enrasa.

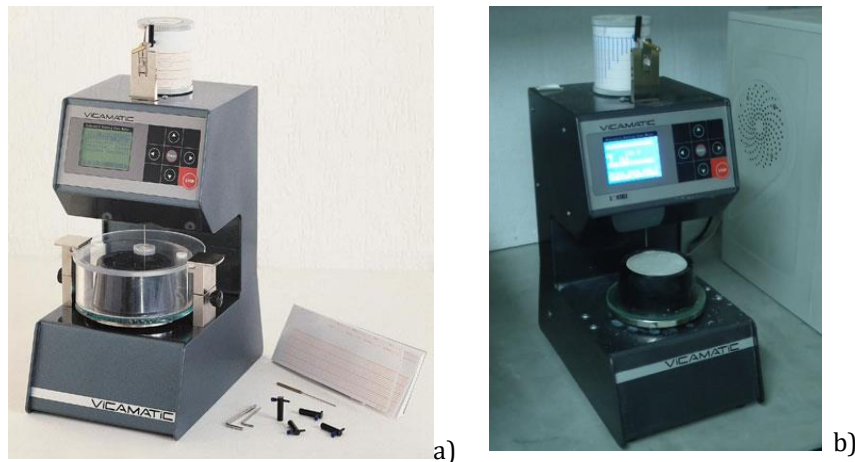


Figura 3.6 – Aparato de Vicat automático: a) método de referencia b) método alternativo

Después, se coloca el molde con la base en un contenedor y se le agrega agua hasta que la superficie de la pasta quede sumergida una profundidad de al menos 5 mm. Se almacena en el ambiente con temperatura controlada a $(20,0 \pm 1,0) ^\circ\text{C}$. Luego de un tiempo adecuado, se posiciona el molde con la base y el contenedor debajo de la aguja del aparato de Vicat. Se baja la aguja hasta que quede en contacto con la pasta, se mantiene en esa posición por un periodo de tiempo entre 1 s y 2 s con el propósito de evitar la velocidad inicial de las partes móviles. Luego se deja caer la aguja penetrando verticalmente en la pasta. Se registra la distancia entre el extremo de la aguja y la base y el instante en que fue realizada esta operación. Se repite la penetración en diferentes posiciones e intervalos de tiempo. Después, se determina el tiempo de fraguado inicial, como el tiempo transcurrido medido desde el “tiempo cero” de mezcla hasta que la aguja penetra hasta una distancia de (6 ± 3) mm desde la base.

A continuación, para la determinación del tiempo final de fraguado, se invierte el molde utilizado sobre la base. Se coloca el molde en el contenedor con agua y se almacena en el ambiente con temperatura controlada a $(20,0 \pm 1,0) ^\circ\text{C}$. Más tarde, se posiciona el molde con la base y el contenedor debajo de la aguja del aparato de Vicat. Se baja la aguja hasta que quede en contacto con la pasta, se mantiene en esa posición por un periodo de tiempo entre 1 s y 2 s con el propósito de evitar la velocidad inicial de las partes móviles.

Luego se deja caer la aguja penetrando verticalmente en la pasta. Se registra la distancia entre el extremo de la aguja y la base y el instante en que fue realizada esta operación. Se repite la penetración en diferentes posiciones e intervalos de tiempo. Finalmente, se registra como tiempo de fraguado final, el tiempo transcurrido hasta que la aguja penetra solamente 0,5 mm en la muestra medido desde el “tiempo cero” de mezcla. El tiempo de fraguado final hallado debe ser confirmado repitiendo el ensayo en otras dos posiciones.

A los efectos de complementar este trabajo, también se realizó la determinación del tiempo de fraguado siguiendo el método de ensayo alternativo establecido en el Anexo A de la Norma ISO 9597, ver Figura 3.6 b). Si bien la norma proporciona este método alternativo, establece que debe ser contrastado contra el método de referencia. El realizar estas determinaciones

siguiendo las dos metodologías permite conocer los desvíos, si es que existen, de un método respecto al otro.

El equipamiento necesario y el procedimiento son similares a los descritos para el método de referencia. La diferencia radica en que, entre determinaciones, el molde se coloca en un armario de curado capaz de mantener la temperatura a $(20,0 \pm 1,0)^{\circ}\text{C}$ y la humedad relativa no menor de 90% en lugar de ser colocado dentro de un contenedor con agua.

Debido a que el tiempo final de fraguado se requiere para el cálculo de la deformación autógena, se realizaron ensayos para su determinación en todas las muestras analizadas, ver Tabla 3.1.

3.4.5 Determinación de la deformación autógena

Para la determinación de la deformación autógena se siguió el procedimiento establecido en la Norma ASTM C 1698. Por lo tanto, se utilizaron 3 dilatómetros idénticos que cumplen las especificaciones de esa norma y se ensayaron tres probetas idénticas por muestra.

Como se indicó en el capítulo 2, los dilatómetros son equipos que han sido diseñados para realizar mediciones lineales de deformación autógena en materiales cementíceos. Se colocan en ellos, moldes plásticos corrugados capaces de evitar la pérdida de humedad y permitir la deformación de los ejemplares libremente. Fueron desarrollados por Jensen en cooperación con Hansen.

Este tipo de equipos ha sido utilizado en gran número de investigaciones y proyectos. Un prototipo de dilatómetro fue diseñado y fabricado inicialmente en 1988. Más tarde, en 1991 se rediseñó y se han efectuado modificaciones en base a la experiencia acumulada de su utilización durante los últimos años. (Jensen, 1996)

Si bien admiten otros usos, los dilatómetros en esta investigación han sido utilizados para medir deformación autógena de probetas selladas de matrices cementíceas, acondicionadas a temperatura constante.

Se dispone de 3 dilatómetros Modelo AS-1100 M Auto-Shrink, Marca: Germann Instruments y de un equipo de adquisición de datos. Cada uno está compuesto por los siguientes elementos, ver Figura 3.7:

- Moldes de plástico corrugado con tapones que se ajustan en los extremos para la preparación de las probetas de ensayo.
- Un soporte rígido para sostener la probeta
- Un reloj comparador digital con control remoto para medir cambios en la longitud de la probeta
- Una barra de referencia
- Tubos soporte para el llenado de la probeta

El reloj comparador digital se fija firmemente al soporte rígido y se conecta a él, el control remoto.



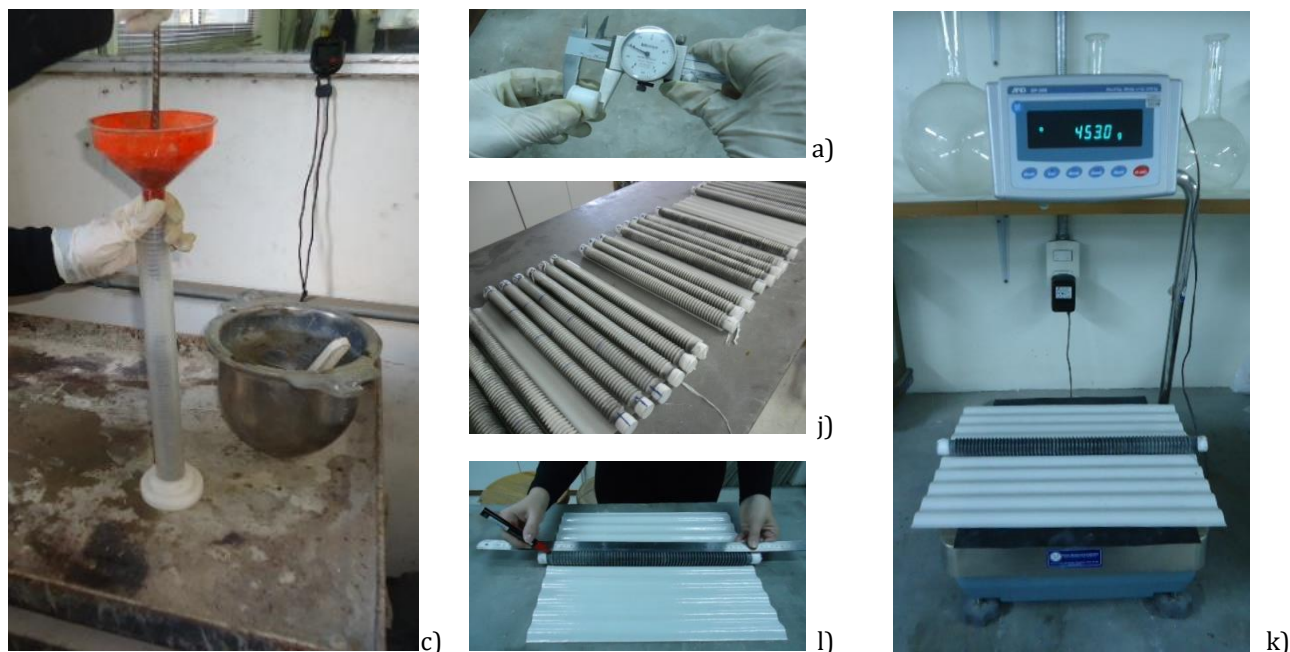
Figura 3.7 – Principales componentes del dilatómetro según la Norma ASTM C 1698

3.4.5.1 Llenado de los moldes

Luego de elaborada la muestra según lo establecido en 3.2.2 y determinada la consistencia según lo establecido en 3.2.3 se procede al llenado de los moldes de la siguiente manera:

- a) Se mide la longitud de los tapones a ser usados en cada probeta, ver Figura 3.8.
- b) Se tapa uno de los extremos del molde con el tapón y se coloca dentro del tubo soporte con el extremo cerrado hacia abajo.
- c) Si la mezcla cementícea es fluida, se vierte lentamente la mezcla en el molde corrugado con la mesa vibradora encendida. Para una mezcla semifluida, se llena el molde en cuatro capas iguales y se compacta cada capa 10 veces con la varilla de apisonado, penetrando la capa anterior. Para una mezcla rígida, se prepara manualmente rollos de la mezcla cementícea, se coloca en el molde y se consolida con la varilla de apisonado. Ver Figura 3.8.
- d) Luego de llenar cada capa se prende la mesa vibradora por 30 segundos y se mantienen los tubos soporte apoyados en ella. Luego se golpea el molde, tomado del extremo superior, contra la mesa vibradora hasta que no se visualicen burbujas de aire en su interior.
- e) Para asegurar que las probetas tienen aproximadamente igual longitud, no se debe estirar ni comprimir el molde corrugado durante el llenado. Para mezclas fluidas, el molde corrugado debe ser mantenido solamente por el tubo soporte durante el llenado. Para mezclas semifluidas y mezclas rígidas, se debe mantener manualmente la longitud inicial del molde durante la compactación.
- f) Se completa el molde aproximadamente 15 mm por debajo del extremo final del molde para dejar espacio para el tapón superior.
- g) Antes de colocar el tapón, el molde corrugado se comprime suavemente para hacer que la pasta de cemento o mortero haga contacto con él.
- h) Se coloca el tapón liberando la compresión del molde corrugado. Se realiza un movimiento de atornillado para facilitar la operación de colocación del tapón.
- i) Inmediatamente luego del llenado, se limpia cuidadosamente la superficie del molde corrugado con un trapo seco removiendo pasta, mortero o agua.

Para minimizar la influencia de las variaciones de temperatura, las probetas y los dilatómetros se mantienen en un ambiente termostáticamente controlado a $(20,0 \pm 1,0)$ °C, durante todo el tiempo de ensayo.



Nota: Las referencias corresponden a los ítems del apartado 3.2.5.1

Figura 3.8 – Llenado de los moldes de las probetas para medición de deformación autógena

j) Después del llenado y sellado de los moldes, las probetas se disponen horizontalmente en una superficie que evite cualquier restricción al cambio de longitud, ver Figura 3.8. Durante su manipulación, las probetas se deben sostener a lo largo de toda su longitud para evitar daños y asegurar su horizontalidad. Se debe mantener una separación de al menos 30 mm entre probetas durante el primer día de medición para permitir la dispersión del calor de hidratación.

k) Se determina la masa de cada una de las probetas, ver Figura 3.8.

l) Se traza una línea con tinta permanente en ambos extremos del molde corrugado para indicar tanto el lado superior como la posición del reloj comparador. De esta manera, las probetas se miden siempre colocadas en la misma posición, ver Figura 3.8.

m) Se colocan las probetas en cada dilatómetro y se realizan las mediciones de longitud, ver Figuras 3.9 y 3.10.



Figura 3.9 – Medición de deformación autógena durante las primeras 48 h



Figura 3.10 – Colocación de la probeta en el dilatómetro para realizar la medición

3.4.5.2 Mediciones de longitud

Para las mediciones de longitud se coloca la barra de referencia en el dilatómetro y se ajusta el reloj comparador de modo que haga contacto con el extremo de la barra. Luego se retira la barra de referencia y se coloca la probeta para proceder a la medición de su longitud durante las primeras 48 horas contabilizadas a partir de la mezcla de los materiales secos con los húmedos. Se repite este procedimiento en cada uno de los dilatómetros, ver Figura 3.9.

De acuerdo a lo planificado (ver Tabla 3.1), las primeras mediciones se realizaron cada 15 minutos durante las primeras 48 horas mediante el uso de un software específico para la adquisición de datos, ver Figura 3.9. Posteriormente, se realizaron mediciones a los 3, 7, 14, 21, 28, 56, 91 y 181 días, ver Figura 3.10.

3.4.5.3 Cálculo de los resultados

El tiempo t se define como el tiempo que transcurre desde el momento en que se mezcla el agua con el cemento portland, denominado en apartados anteriores como “tiempo cero” de mezcla.

La longitud de la probeta en un instante dado, $L(t)$, se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$L(t) = L_{\text{ref}} + R(t) - 2L_{\text{plug}}$$

donde

L_{ref} es la longitud de la barra de referencia, en mm

$R(t)$ es la lectura de la longitud de la probeta en el dilatómetro, en mm, y

L_{plug} es el promedio de la longitud de los tapones que se colocan en los extremos, en mm.

La deformación autógena de la probeta en el tiempo t , expresada en $\mu\text{m}/\text{m}$, se calcula con la siguiente fórmula:

$$\varepsilon_{\text{autogena}} = \frac{L(t) - L(t_{fs})}{L(t_{fs})} \cdot 10^6 \mu\text{m}/\text{m}$$

donde

t_{fs} es el tiempo final de fraguado, en min, considerado como “tiempo cero” (Norma ASTM C 1698:2009). O sea que es el tiempo en el cual se realiza la primera medición de longitud en el ensayo de deformación autógena.

3.4.6 Determinación de las resistencias mecánicas

Los ensayos de flexión y compresión se realizaron en una máquina de ensayo de capacidad máxima de carga de 3000 kN. Esta consta de dispositivos normalizados que permiten realizar la rotura de probetas de (40x40x160) mm a flexión así como, la rotura a compresión de los semiprismas resultantes de la rotura a flexión, ver Figura 3.11.

3.4.6.1 Determinación de la resistencia a flexión

Para la determinación de la resistencia a flexión se siguió el procedimiento establecido en la Norma UNIT-ISO 679 que consiste en el método de carga en 3 puntos, ver Figura 3.11 b).



Figura 3.11 – a) Máquina de ensayo con dispositivos para: b) flexión y c) compresión de probetas de (40x40x160) mm

Este procedimiento consiste en la realización de las siguientes actividades:

- a) se coloca la probeta prismática en el dispositivo de flexión de la máquina de ensayo, con una cara lateral sobre los rodillos de apoyo que se encuentran separados $(100,0 \pm 0,5)$ mm y con el eje longitudinal normal a ellos, ver Figura 3.11 b);
- b) mediante un rodillo, se aplica una carga central vertical en la cara lateral opuesta a la de apoyo y se incrementa uniformemente a una velocidad de (50 ± 10) N/s hasta alcanzar la rotura.
- c) se registra la carga máxima aplicada en newtons (N).
- d) se mantienen las mitades del prisma cubiertas con un paño húmedo hasta el ensayo de compresión.
- e) se calcula la resistencia a flexión, R_f , en N/mm² por medio de la siguiente ecuación:

$$R_f = 1,5 \frac{F_f \cdot l}{b^3}$$

donde

- F_f es la carga aplicada en la rotura, en newtons (N),
 l es la distancia entre apoyos, en milímetros (mm),
 b es el lado de la sección cuadrada del prisma, en milímetros (mm)

- f) se calcula el promedio de los 3 valores obtenidos de resistencia a flexión y el resultado se expresa en N/mm².

De acuerdo a lo planificado se realizaron ensayos de determinación de la resistencia a flexión de todas las muestras estudiadas, a los 28 días de edad, ver Tabla 3.1. La Figura 3.12 a) muestra una probeta luego de la rotura a flexión.

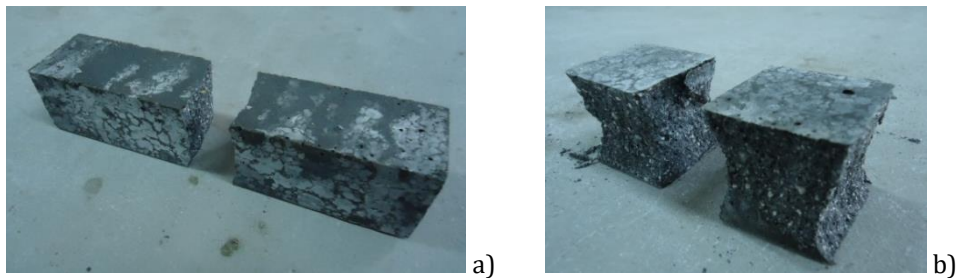


Figura 3.12 – a) Probeta de (40x40x160) mm ensayada a flexión, b) Semiprisma del ensayo a flexión, luego ensayado a compresión

3.4.6.2 Determinación de la resistencia a compresión

Para la determinación de la resistencia a compresión se siguió el procedimiento establecido en la Norma UNIT-ISO 679, en el que se utilizan los semiprismas obtenidos del ensayo para la determinación de la resistencia a flexión. Este consiste en la realización de las siguientes actividades:

- a) se coloca el semiprisma en el dispositivo de ensayos a compresión, ver Figura 3.11, c);

- b) se centra lateralmente con relación a los platos de acero del dispositivo a $\pm 0,5$ mm, ver Figura 3.11 c);
- c) se le aplica una carga uniforme a una velocidad de (2400 ± 200) N/s hasta alcanzar la rotura;
- d) se registra la carga máxima de rotura, en newtons (N) de cada probeta.
- e) se calcula la resistencia a compresión R_c , expresada en megapascasles (MPa), mediante la ecuación:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

donde

F_c es la carga máxima de rotura, expresada en newtons (N),

1600 es la superficie de los platos (40 x 40) mm, expresada en mm².

- f) se realiza el promedio de los valores obtenidos de resistencia a compresión, en MPa.

Según lo planificado se realizaron ensayos de determinación de la resistencia a compresión de todas las muestras a los 28 días, ver Tabla 3.1. La Figura 3.12 b) muestra cada una de las dos partes de una de las probetas sometida previamente a flexión, luego de la rotura a compresión.

3.4.7 Determinación de la deformación por secado

Para la medición de deformación por secado de probetas de (40x40x160) mm se utilizó un equipo para medir la longitud con una exactitud de $\pm 0,001$ mm, ver Figura 3.13. Este equipo incluye una barra de calibrado de metal invar de 160 mm de longitud.

Para la determinación de la deformación por secado se sigue el procedimiento de la Norma UNE 83831. Se elaboran 3 probetas para cada muestra a ensayar de (40x40x160) mm.

El molde con las probetas se coloca durante 2 días en una bolsa de plástico para protegerlas del secado. Luego se desmoldan, se mide su longitud, se pesan y se mantienen durante 5 días en el armario de curado. A continuación, las probetas se conservan al aire a una temperatura de $(20,0\pm 2,0)$ °C y una humedad relativa del (65 ± 5) %, separadas entre ellas al menos 10 mm, durante el periodo de realización de las mediciones.

Antes de cada medición, se verifica el aparato de medida con el uso de la barra de calibrado, ver Figura 3.13 a) y b).

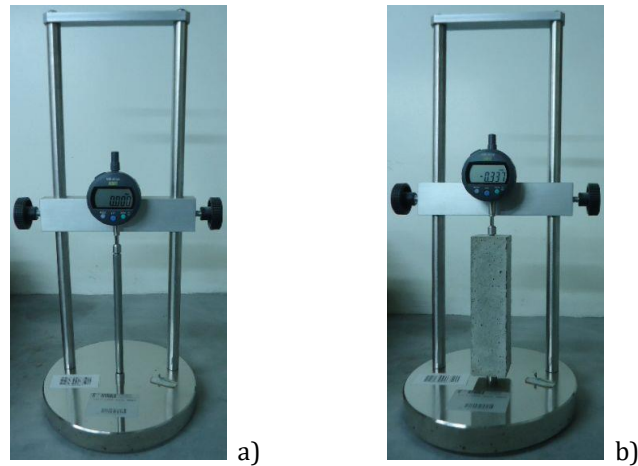


Figura 3.13– Medición de longitud de una probeta: a) ajuste con barra de calibración y b) medición de una probeta.

Las variaciones de la longitud específica (ε), se calculan por medio de la siguiente expresión:

$$\varepsilon = (\Delta L/L) \times 100 \%$$

donde

ΔL variación de longitud en relación con la longitud inicial, en mm;

L longitud inicial de la probeta de ensayo en el momento del desmolde, en mm.

El valor medio de retracción o de expansión, según corresponda, se calcula dividiendo entre tres la suma de los valores de las variaciones de longitud individuales de las tres probetas para cada edad, con una aproximación de 0,001 %.

3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Como descriptor estadístico de la tendencia central se tomó la mediana que es una medida robusta de la tendencia central más eficiente que la media (muy sensible a valores dispersos). Como los datos no ajustan a una distribución gaussiana, se utilizaron Test de distribución libre o no paramétricos.

Se utilizó el Test de distribución libre de Kruskal-Wallis como análisis de la varianza para comparar medias entre tres o más muestras y el Test U de Mann-Whitney para comparar la tendencia central entre dos muestras independientes. Se considera una diferencia como estadísticamente significativa cuando el p-valor (probabilidad de encontrar una diferencia por simple azar cuando la diferencia realmente no existe) asociado a la prueba estadística es inferior al 5 %.

Capítulo 4

Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las tres etapas indicadas en el apartado 3.1 Diseño experimental, junto con su análisis y discusión.

En particular en el apartado 4.1 se presentan los resultados correspondientes a deformación autógena. También se indican, para cada muestra, los valores de tiempo final de fraguado utilizados como “tiempo cero” para el cálculo de la deformación autógena.

En primer lugar, se estudia la deformación autógena en las diferentes muestras de MHAD utilizando dos métodos distintos para la determinación del tiempo final de fraguado. Luego, se estudia la deformación autógena correspondiente a las pastas de estos MHAD. A continuación, se incluye los resultados de deformación autógena de muestras a las que se les incorporó ceniza de cáscara de arroz (CCA) como sustitución de parte del cemento.

En el apartado 4.2 se presentan los resultados de deformación por secado. Al igual que en el apartado anterior, primero se estudia en los MHAD, luego en las pastas correspondientes y por último en los MHAD con CCA.

Finalmente, en el apartado 4.3 se presentan los resultados de resistencias mecánicas a los 28 días obtenidos para las mismas muestras.

De acuerdo a lo que se mencionaba en el apartado 3.5 del capítulo anterior, para el análisis estadístico de los resultados se utilizaron test no paramétricos y estudios de correlación.

4.1 DEFORMACIÓN AUTÓGENA

4.1.1 Deformación autógena de los MHAD con tiempo final de fraguado según método de referencia (Norma ISO 9597)

A continuación, en la Tabla 4.1 y en la Figura 4.1 se presentan los resultados de deformación autógena de los MHAD estudiados. Cada valor indicado corresponde al promedio de la medición de tres probetas idénticas de la misma muestra a una edad determinada. Las deformaciones fueron registradas hasta los 181 días considerando su inicio a partir de los tiempos finales de fraguado hallados según el método de referencia de la Norma ISO 9597, ver Figura 4.2.

Tabla 4.1 – Deformación autógena de los MHAD a diferentes edades, considerando tiempo final de fraguado determinado según método de referencia (Norma ISO 9597)

MHAD	Deformación autógena ($\mu\text{m}/\text{m}$)								
	Edad (días)								
	2	3	7	14	21	28	56	91	181
P	-2	-2	-12	-12	-2	12	3	-14	-38
MP	-1	-4	3	-1	1	-2	-27	-47	-57
M	-2	-11	-26	-52	-34	-38	-51	-69	-124
MR	-92	-123	-142	-177	-167	-164	-180	-207	-275
R	-67	-74	-118	-109	-125	-141	-187	-230	-295

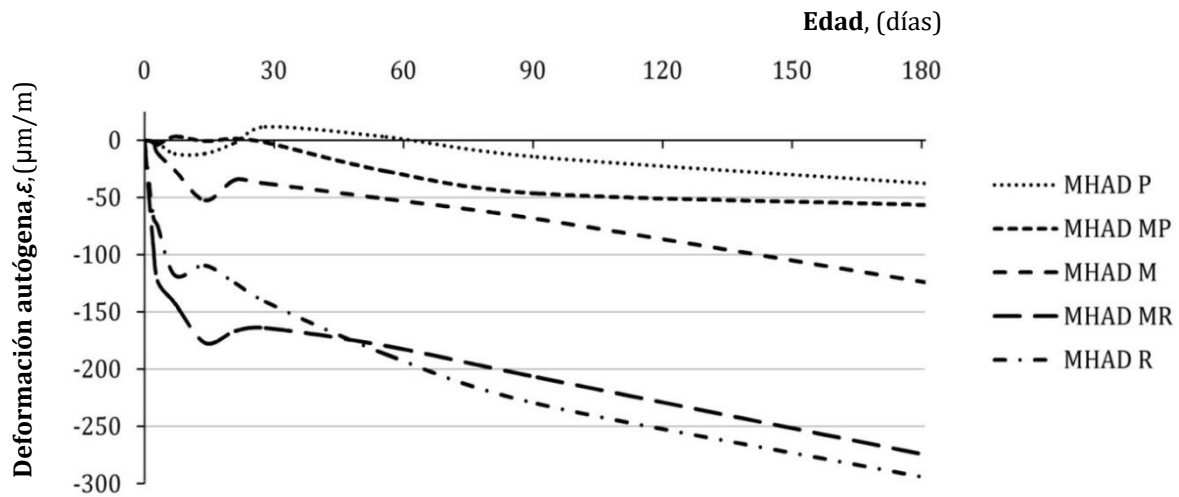


Figura 4.1- Deformación autógena de los MHAD en función del tiempo considerando tiempo final de fraguado según método de referencia (Norma ISO 9597)

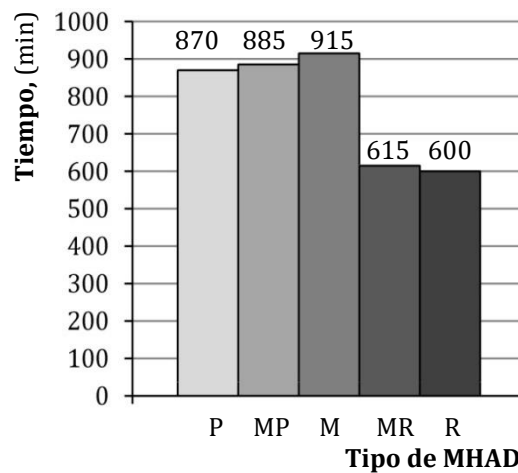


Figura 4.2- Tiempo final de fraguado de los MHAD según método de referencia (Norma ISO 9597)

En la Figura 4.1 se observa, a partir de los 50 días, el aumento de deformación autógena a medida que aumenta el contenido de cemento y disminuye la relación árido/cemento y la relación agua/cemento en la mezcla. El cambio de curvatura que se da en los primeros días puede ser debido a la reabsorción del agua de exudación acumulada entre la matriz y la superficie interior del tubo corrugado, el desarrollo de etringita, la generación de cristales de hidróxido de calcio o reacciones del C_3S (Rodríguez de Sensale et al., 2008).

Asimismo, en la Figura 4.1 se observa una separación marcada entre las curvas de deformación autógena de los MHAD pobre (P), media pobre (MP) y media (M) y las curvas de los MHAD media rica (MR) y rica (R). La deformación autógena de las muestras de MHAD pobre (P), media pobre (MP) y media (M) varía en un rango que abarca desde $+12\ \mu\text{m}$ a $-124\ \mu\text{m}$. Mientras que las muestras de MHAD media rica (MR) y rica (R) varían en un rango mayor que va desde 0 a $300\ \mu\text{m}$.

Se destaca además que las muestras de MHAD media rica (MR) y rica (R) alcanzan valores de retracción autógena mayores a $-100\ \mu\text{m}$ en los primeros 7 días, que son similares a los de MHAD media (M) a los 181 días y del orden del doble de los de MHAD pobre (P) y media pobre (MP) a los 181 días.

En la Tabla 4.2 se indican valores que representan la variación de la deformación autógena en los MHAD a las edades de 2, 28 y 181 días. Para ello se consideraron los valores de deformación autógena del MHAD pobre (P) como referencia (valor =1).

Tabla 4.2 – Comparación de los valores de deformación autógena de los MHAD respecto a los del MHAD pobre (P), a las edades de 2, 28 y 181 días

MHAD	Edad (días)		
	2	28	181
P	1,0	1,0	1,0
MP	-0,5	0,2	1,5
M	1,0	19,0	3,3
MR	46,0	82,0	7,2
R	33,5	70,5	7,8

A partir de estos valores, se puede distinguir un comportamiento similar en las muestras de MHAD pobre (P) y media pobre (MP), así como en las muestras de MHAD media rica (MR) y rica (R). Asimismo, se evidencia, a la edad de 2 días, un gran desarrollo de deformación autógena en las muestras de MHAD media rica (MR) y rica (R), que se atenúa a largo plazo. De todas maneras, a los 181 días se observa el aumento de deformación autógena a medida que aumenta el contenido de cemento y disminuye la relación árido/cemento y la relación agua/cemento en la mezcla, comportamiento que como se mencionaba en párrafos anteriores se da a partir de los 50 días.

En la Tabla 4.3 se indican valores que representan la variación de la deformación autógena en los MHAD a las edades de 2, 28 y 181 días. Para ello se consideraron los valores de deformación autógena a la edad de 2 días como referencia (valor =1).

Tabla 4.3 – Comparación de los valores de deformación autógena de los MHAD a los 28 y 181 días respecto a los de los 2 días

MHAD	Edad (días)		
	2	28	181
P	1,0	6,0	19,0
MP	1,0	2,0	57,0
M	1,0	19,0	62,0
MR	1,0	1,8	3,0
R	1,0	2,1	4,4

Estos valores muestran un comportamiento similar en las muestras de MHAD pobre (P) y media pobre (MP) en el sentido que las variaciones son más acentuadas a largo plazo. También se produce un comportamiento similar en las muestras de MHAD media rica (MR) y rica (R), pero en este caso las variaciones son de menor entidad. Sin embargo, corresponde aclarar que, como se mencionaba antes, el desarrollo de deformación autógena en estas muestras de MHAD media rica (MR) y rica (R) se produce fundamentalmente a edad temprana. Por otro lado, la muestra del MHAD media (M) presenta una variación superior a la de las otras muestras a la edad de 28 días.

Se realiza un Test U de Mann-Whitney para las dos primeras muestras y se obtienen los valores: $U=380,5$ y $p=0,304$. Entonces, se puede afirmar que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los resultados de MHAD pobre (P) y media pobre (MP).

Luego, se realiza un Test de Kruskal-Wallis considerando los resultados de las tres primeras muestras y se obtienen los siguientes valores: $H=17,688$ y $p=1,44 \times 10^{-4}$. Entonces, se puede afirmar que existen diferencias estadísticamente significativas entre los resultados de las tres primeras muestras. Pero, según se mencionaba antes, como entre las dos primeras muestras no las había esto significa que el MHAD media (M) presenta valores significativamente mayores de retracción autógena que los MHAD pobre (P) y media pobre (MP).

Entre los resultados de las muestras de MHAD media rica (MR) y rica (R) no existen diferencias estadísticamente significativas. Los valores obtenidos a partir del Test U de Mann-Whitney son: $U=373,5$ y $p=0,258$.

Por último, se realiza un Test de Kruskal-Wallis con los resultados de los MHAD media (M), media rica (MR) y rica (R) que presenta los siguientes valores: $H=31,087$ y $p=1,776 \times 10^{-7}$. Entonces, se puede afirmar que existen diferencias estadísticamente significativas entre los resultados de las tres muestras, pero como entre los resultados de las dos últimas muestras no las había, esto significa que los valores de retracción autógena de la muestra MHAD media (M) son significativamente menores que los valores de las muestras de MHAD media rica (MR) y rica (R).

En conclusión, respecto a los resultados de deformación autógena de los MHAD se puede afirmar que hay tres grupos que presentan diferencias estadísticamente significativas. Por un lado se encuentran las muestras de MHAD pobre (P) y media pobre (MP), luego la muestra de MHAD media (M) y finalmente las muestras de MHAD media rica (MR) y rica (R).

Las diferencias entre las muestras del primer y segundo grupo (MHAD pobre (P), MHAD media pobre (MP) y MHAD media (M)) y las del tercer grupo (MHAD media rica (MR) y MHAD rica (R)) se podrían asociar a la diferencia que existe entre los correspondientes tiempos finales de fraguado. Mientras los primeros presentan valores de tiempo final de fraguado cercanos a 900 min, los últimos presentan valores en el orden de los 600 min, ver Figura 4.2.

Por otro lado, como se mencionaba en el apartado 2.5.1, la relación agua/cemento es una de las fuerzas conductoras principales de la retracción autógena. Powers, 1968 *apud* Holt, 2001 sostiene que cuando la relación agua cemento es menor de 0,42 no hay suficiente agua para la hidratación del cemento. Sin embargo, ese límite es estimado. Holt (2001) afirma que la retracción autógena se desarrolla a partir de relaciones agua/cemento en el rango de 0,38 a 0,45 dependiendo de la química del cemento. El gráfico de la Figura 4.1 muestra como aumenta la retracción autógena a medida que disminuye la relación agua/cemento y especialmente como las curvas correspondientes a los MHAD con relación agua cemento 0,36 y 0,30 (media rica (MR) y rica (R), respectivamente) alcanzan los mayores valores de retracción autógena.

4.1.2 Deformación autógena de MHAD con tiempo final de fraguado según método alternativo (Anexo A de la Norma ISO 9597)

La Norma ISO 9597 establece el método de referencia para la determinación del tiempo de fraguado que fue el utilizado para hallar los resultados expuestos en el apartado 4.1.1. Sin embargo, en el Anexo A de la misma norma se establece un método alternativo para determinar el tiempo de fraguado. Para complementar este estudio se entendió conveniente utilizar también el método alternativo y comparar los resultados con los hallados a partir del método de referencia.

En la Figura 4.3 se muestran los nuevos valores de tiempo final de fraguado. Como se puede observar, en comparación con los hallados en el apartado 4.1.1, los valores de tiempo final de fraguado disminuyen. Los de los MHAD pobre (P), media pobre (MP) y media (M) disminuyen en el orden de un 35% y los de los MHAD media rica (MR) y rica (R) un 13% y 18% respectivamente en comparación con los tiempos finales de fraguado obtenidos a partir del método de referencia.

Si ahora se consideran estos resultados de tiempo final de fraguado, hallados según el método alternativo, para calcular los valores de deformación autógena se obtienen los valores que se presentan en la Tabla 4.4 y en la Figura 4.4 para los MHAD estudiados. Dicho de otro modo, se consideran los resultados de tiempo final de fraguado hallados a partir del método alternativo como tiempo cero para el cálculo de los nuevos valores de deformación autógena.

En este caso, desde los 28 días se puede observar el aumento de retracción autógena a medida que aumenta la proporción de cemento y disminuye la proporción árido/cemento y la relación agua/cemento en la mezcla, ver Figura 4.4.

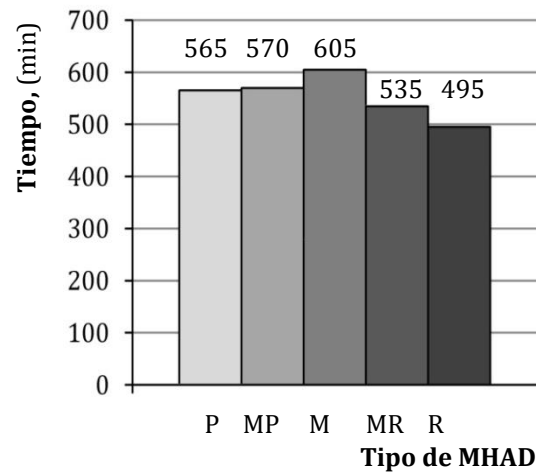


Figura 4.3 - Tiempo final de fraguado de los MHAD según método alternativo (Anexo A de la Norma ISO 9597)

Tabla 4.4 – Deformación autógena de los MHAD a diferentes edades, considerando tiempo final de fraguado según método alternativo (Anexo A de la Norma ISO 9597)

Deformación autógena ($\mu\text{m}/\text{m}$)									
MHAD	Edad (días)								
	2	3	7	14	21	28	56	91	181
P	-183	-183	-193	-193	-183	-161	-178	-196	-219
MP	-224	-224	-212	-207	-206	-208	-226	-239	-244
M	-211	-220	-235	-261	-243	-246	-260	-278	-333
MR	-210	-240	-260	-294	-284	-281	-297	-324	-392
R	-230	-238	-282	-273	-289	-305	-351	-394	-458

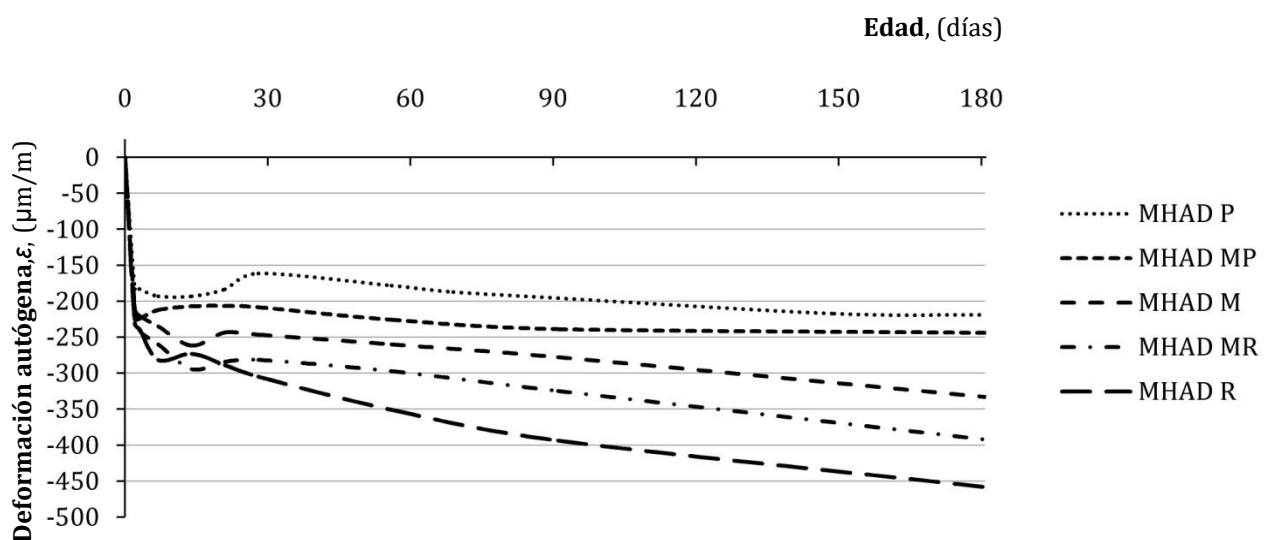


Figura 4.4 - Deformación autógena de los MHAD en función del tiempo considerando tiempo final de fraguado según método alternativo (Anexo A de la Norma ISO 9597)

Asimismo se observan valores mayores de retracción autógena respecto a los hallados a partir del tiempo final de fraguado obtenido con el método de referencia. Obviamente este incremento se produce debido a que, como se mencionaba en los párrafos anteriores, los tiempos finales de fraguado han disminuido.

En la Tabla 4.5 se indican valores que representan la variación de la deformación autógena en los MHAD a las edades de 2, 28 y 181 días. Para ello se consideraron los valores de deformación autógena del MHAD pobre (P) como referencia (valor =1).

Tabla 4.5 – Comparación de los valores de deformación autógena de los MHAD respecto a los del MHAD pobre (P), a las edades de 2, 28 y 181 días

MHAD	Edad (días)		
	2	28	181
P	1,0	1,0	1,0
MP	1,2	1,3	1,1
M	1,2	1,5	1,5
MR	1,1	1,7	1,8
R	1,3	1,9	2,1

En la Tabla 4.5 se puede observar que los valores de las diferentes muestras de MHAD no difieren en más de un 30 % a la edad de 2 días. Sin embargo, a los 28 días el porcentaje de variación entre las diferentes muestras de MHAD va en aumento a medida que las muestras aumentan el contenido de cemento y disminuyen la relación árido/cemento y la relación agua/cemento. Lo mismo sucede a la edad de 181 días. Por ejemplo, la muestra MHAD rica (R) alcanza un valor 90 % mayor a los 28 días y a los 181 alcanza un valor 110% mayor en comparación con el de la muestra del MHAD pobre (P) a la misma edad.

En la Tabla 4.6 se indican valores que representan la variación de la deformación autógena en los MHAD a las edades de 2, 28 y 181 días. Para ello se consideraron los valores de deformación autógena a la edad de 2 días como referencia (valor =1).

Tabla 4.6 – Comparación de los valores de deformación autógena de los MHAD a los 28 y 181 días respecto a los de los 2 días

MHAD	Edad (días)		
	2	28	181
P	1,0	0,9	1,2
MP	1,0	0,9	1,1
M	1,0	1,2	1,6
MR	1,0	1,3	1,9
R	1,0	1,3	2,0

Estos valores muestran un comportamiento similar en las muestras de MHAD pobre (P) y media pobre (MP) ya que a los 28 días de edad los valores disminuyen un 10 % y a los 181 días de edad aumentan un 20% y un 10% respectivamente. También se produce un

comportamiento similar entre las muestras de MHAD media (M), media rica (MR) y rica (R), a los 28 días el aumento es del orden del 20% para la primera y 30% para las últimas y a los 181 días el aumento es de un 60%, 90% y 100% respectivamente.

Se realiza un Test U de Mann-Whitney para las dos últimas muestras y se obtienen los valores: $U=363,5$ y $p=0,201$. Entonces, se puede afirmar que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los resultados de MHAD media rica (MR) y rica (R).

Luego, se realiza un Test de Kruskal-Wallis con los resultados de las muestras media (M), media rica (MR) y rica (R) que presenta los siguientes valores: $H=4,476$ y $p=0,107$. Por consiguiente, se puede afirmar que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los resultados de las tres primeras muestras.

A continuación, se realiza un Test de Kruskal-Wallis con los resultados de las muestras pobre (P), media pobre (MP) y media (M) que presenta los siguientes valores: $H=6,956$ y $p=0,031$. Por consiguiente, se puede afirmar que existen diferencias estadísticamente significativas entre los resultados de las tres primeras muestras.

Por último se realiza un Test U de Mann-Whitney para las dos primeras muestras y se obtienen los valores: $U=479,5$ y $p=0,436$. Entonces, se puede afirmar que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los resultados de MHAD pobre (P) y media pobre (MP).

Juntando toda la información respecto a los resultados de deformación autógena de los MHAD, calculada a partir de los tiempos finales de fraguado obtenidos con el método alternativo, se puede concluir que hay dos grupos que presentan diferencias estadísticamente significativas. Por un lado se encuentran las muestras de MHAD pobre (P) y media pobre (MP) y por otro lado las muestras de MHAD media (M), media rica (MR) y rica (R).

4.1.3 Comparación de la deformación autógena de MHAD con tiempo final de fraguado según método de referencia (Norma ISO 9597) y método alternativo (Anexo A de la Norma ISO 9597)

A modo de resumen, se incluye a continuación el gráfico de la Figura 4.5 en el que se comparan los resultados de deformación autógena de MHAD con tiempo final de fraguado determinado según método de referencia (Norma ISO 9597) y método alternativo (Anexo A de la Norma ISO 9597). Se indican con la abreviación “ref” los primeros y con la abreviación “alt” los últimos. Dicho de otra manera, se comparan los resultados mostrados en el apartado 4.1.1 y 4.1.2 y se superponen los gráficos de las Figuras 4.1 y 4.4 respectivamente.

Como se mencionaba en el apartado 4.1.1 respecto a los resultados de deformación autógena de los MHAD determinados con tiempo final de fraguado según método de referencia, existen tres grupos que presentan diferencias estadísticamente significativas. Por un lado se encuentran las muestras de MHAD pobre (P ref) y media pobre (MP ref), luego la muestra de MHAD media (M ref) y finalmente las muestras de MHAD media rica (MR ref) y rica (R ref).

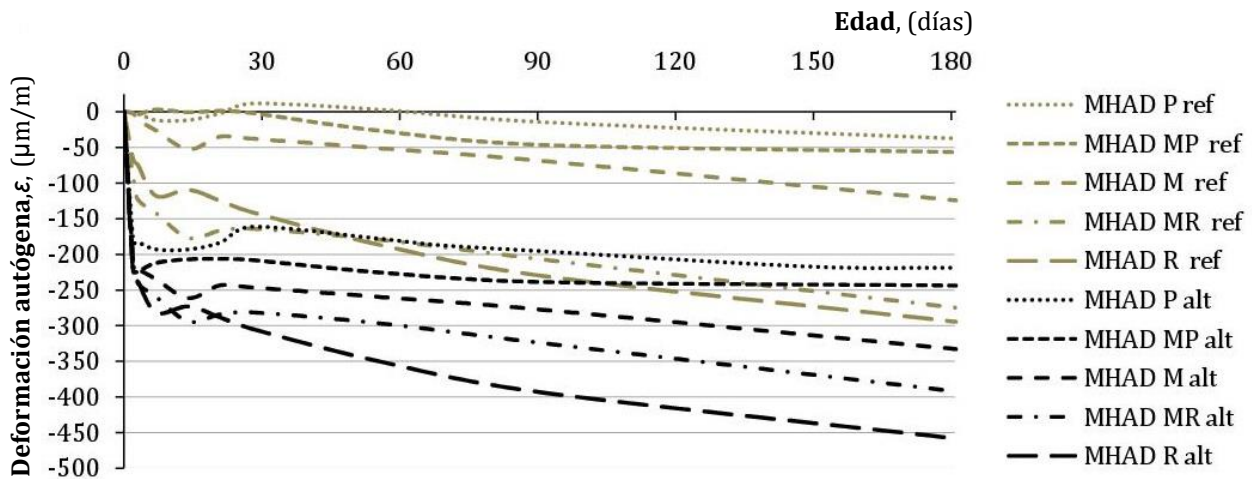


Figura 4.5 - Deformación autógena de los MHAD en función del tiempo considerando tiempo final de fraguado según método de referencia (Norma ISO 9597) y método alternativo (Anexo A de la Norma ISO 9597)

Según se concluía en el apartado 4.1.2 respecto a los resultados de deformación autógena de los MHAD determinados con tiempo final de fraguado por el método alternativo existen dos grupos que presentan diferencias estadísticamente significativas. Por un lado se encuentran las muestras de MHAD pobre (P alt), media pobre (MP alt) y por otro lado, las muestras de MHAD media (M alt), media rica (MR alt) y rica (R alt).

En resumen, analizando las diez muestras se identifican cinco grupos. El primero formado por las muestras de MHAD pobre (P ref) y media pobre (MP ref), el segundo integrado sólo por la muestra de MHAD media (M ref), el tercero formado por las muestras de MHAD media rica (MR ref), rica (R ref), el cuarto integrado por las muestras pobre (P alt) y media pobre (MP alt) y el último integrado por las muestras de MHAD media (M alt), media rica (MR alt) y rica (R alt).

En este caso, lo que nos interesa es verificar si existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores de deformación autógena de muestras del mismo tipo obtenidos con el método de referencia y con el método alternativo. De acuerdo a los grupos identificados según el párrafo anterior, se puede concluir que para cada tipo de muestra, los valores de deformación autógena obtenidos con un método y otro presentan diferencias estadísticamente significativas.

Como era de esperar, los valores de deformación autógena obtenidos según el método de referencia, por ser calculados con valores de tiempo final de fraguado mayores, son menores respecto a los obtenidos según el método alternativo y esta diferencia es estadísticamente significativa. Por ello, se entiende conveniente profundizar en el estudio del "tiempo cero" de la deformación autógena, lo cual se indica y fundamenta en el capítulo 5.

4.1.4 Deformación autógena de pastas de MHAD con tiempo final de fraguado según método alternativo (Anexo A de la Norma ISO 9597)

De acuerdo a lo explicado en el Capítulo 3, las pastas se elaboraron a partir de las dosificaciones de referencia (ver Tabla 3.9), sin la inclusión de árido.

Los valores de escurrimiento de las pastas no se determinaron debido a que en todos los casos superaron el valor límite de 28 cm de los MHAD de referencia.

Para las dosificaciones pobre (P) y media pobre (MP) no fue posible determinar el tiempo final de fraguado debido a que la pasta se escurría del molde impidiendo realizar las mediciones requeridas por el procedimiento de ensayo, ver Figura 4.6 (izq.)

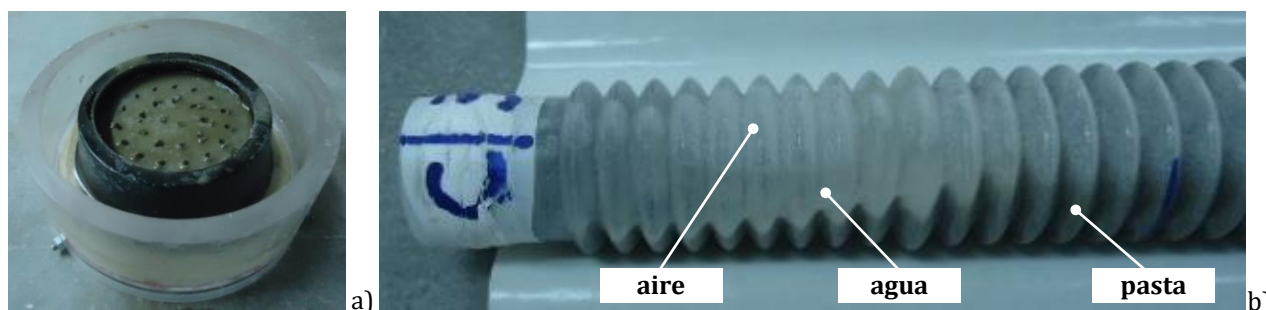


Figura 4.6 - a) Molde para la determinación de tiempo de fraguado de la pasta media pobre (MP) y b) probeta de deformación autógena de la pasta de MHAD media (M)

En el caso de la dosificación media (M), si bien se pudo determinar el tiempo final de fraguado, no fue posible realizar las mediciones de deformación autógena. En el interior de cada uno de los tubos se generaron burbujas de aire y el agua subió a la superficie separándose de la pasta, ver Figura 4.6 (der.)

El exceso de agua puede haber ocurrido ya que al tratarse de una pasta, no se incorporó agregados y se utilizó en el mezclado demasiado líquido en relación a los materiales sólidos. Lo cual también podría explicar lo que ocurrió con la determinación de los tiempos finales de fraguado de la pasta pobre (P) y media pobre (MP).

En la evaluación de la deformación autógena de la pasta de dosificación media (M), la cantidad de agua y de aire que quedaron atrapados en el tubo de plástico fueron de tal magnitud que permanecieron al no haber intercambio con el ambiente y tampoco ser reabsorbidos por la pasta. No hubo un contacto firme entre la pasta y el molde, por lo tanto se descartaron los resultados relacionados a esta muestra.

Para eliminar o al menos minimizar este efecto, según se mencionaba en el apartado 2.4, Lura (2003) propone rotar los tubos, por lo que se plantea en futuras investigaciones implementar esta mejora en el procedimiento de ensayo.

También se debe tener en cuenta que para posibilitar la medición de deformación autógena a edad temprana se recurrió a inclinar los dilatómetros. Esto acentuó el hecho de que el agua y el aire se desplazaran hacia el extremo superior del molde afectando de manera significativa el sector en el extremo superior de la probeta.

En la Tabla 4.7 y en la Figura 4.7 se presentan los resultados de deformación autógena de las pastas de los MHAD para las dosificaciones media rica (MR) y rica (R) en comparación con los de los MHAD correspondientes. Las deformaciones fueron registradas hasta los 181 días considerando su inicio a partir de los tiempos finales de fraguado determinados según el método alternativo de la Norma ISO 9597.

Tabla 4.7 – Deformación autógena de las pastas de los MHAD estudiados, calculada según tiempo final de fraguado determinado por método alternativo, a diferentes edades

Deformación autógena ($\mu\text{m}/\text{m}$)									
MHAD	Edad (días)								
	2	3	7	14	21	28	56	91	181
MR	-210	-240	-260	-294	-284	-281	-297	-324	-392
R	-230	-238	-282	-273	-289	-305	-351	-394	-458
pastas									
MR	21	9	-59	-138	-133	-94	-94	-150	-213
R	10	-17	-64	-191	-284	-261	-324	-351	-436

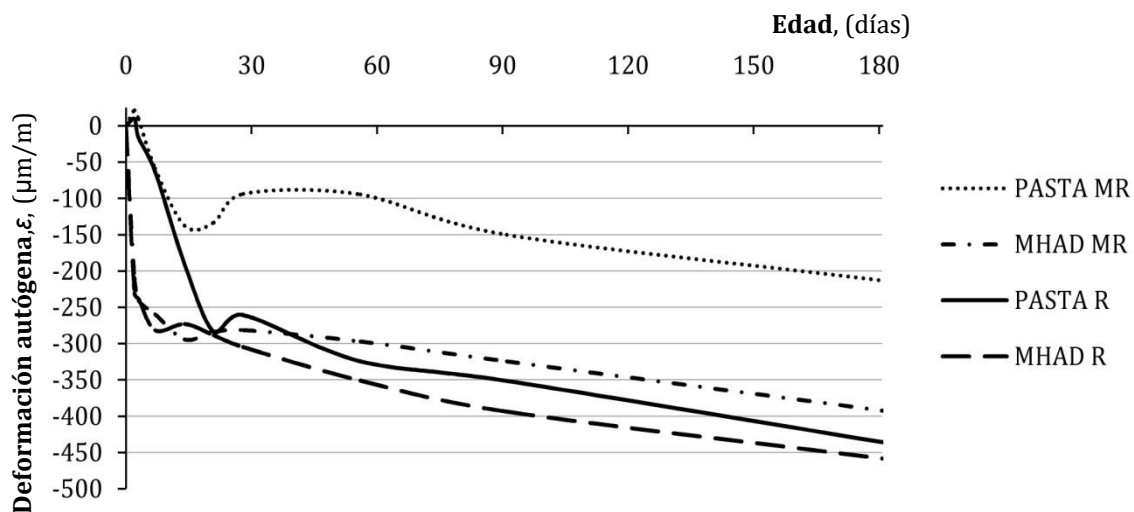


Figura 4.7- Deformación autógena de las pastas de los MHAD estudiados en función del tiempo considerando tiempo final de fraguado según método alternativo

A continuación, en la Figura 4.8 se indican los tiempos finales de fraguado para las pastas estudiadas en comparación con los de los MHAD correspondientes determinados según el método alternativo.

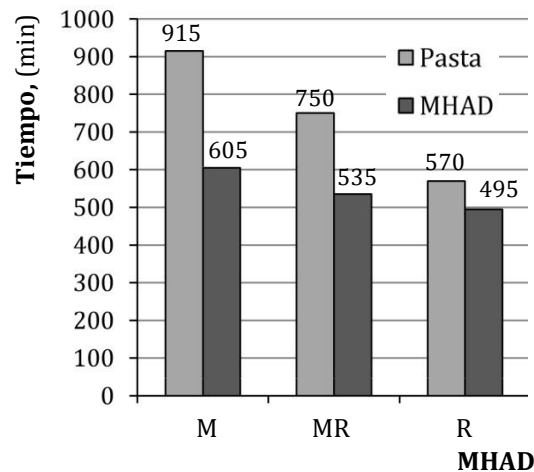


Figura 4.8 - Tiempo final de fraguado de las pastas en comparación con los MHAD correspondientes, determinados según método alternativo (Anexo A de la Norma ISO 9597)

En la Tabla 4.8 se indican valores que representan la variación de la deformación autógena en las pastas de los MHAD media rica (pasta MR) y rica (pasta M) a las edades de 2, 28 y 181 días. Para ello se consideraron los valores de deformación autógena de los MHAD correspondientes de referencia (valor =1).

Tabla 4.8 – Comparación de los valores de deformación autógena de las pastas de los MHAD rica (R) y media rica (MR), respecto a los de los MHAD rica (R) y media rica (MR) a los 2, 28 y 181 días

	Edad (días)		
	2	28	181
MHAD MR	1	1	1
pasta MR	0,10	0,33	0,54
MHAD R	1	1	1
pasta R	0,04	0,86	0,95

En los dos casos (pasta MR y pasta R) los valores de deformación autógena son menores respecto a los valores de deformación autógena de los MHAD correspondientes (MR y R). La pasta media rica (pasta MR) presenta un valor 90%, 67% y 46% menor en relación al valor del MHAD media rica (MR), a los 2, 28 y 181 días respectivamente. La pasta rica (pasta R) presenta un valor 96%, 14% y 5% menor en relación al valor del MHAD rica (R), a los 2, 28 y 181 días respectivamente.

Comprobar que los resultados de deformación autógena de las pastas son menores respecto a los de los MHAD parece contradecir los estudios de Igarashi et al. (1999) según Holt (2001). En esos estudios, según lo mencionado en el apartado 2.5.4, se afirma que colocar más agregado en la mezcla baja la cantidad de retracción autógena. Sin embargo, desconocemos otros detalles de esa investigación tales como si en esas muestras además de modificar la cantidad de agregado se modificó la cantidad de agua de las muestra analizadas.

En el presente trabajo como ya fue mencionado en los párrafos anteriores, el escurrimiento de las pastas fue superior al de los MHAD y se advirtió que las pastas presentaban demasiado líquido en relación a los materiales sólidos. Esta podría ser la causa de que los valores de retracción autógena de los MHAD estudiados sean mayores respecto a los de las pastas correspondientes.

Se realiza un Test U de Mann-Whitney para las dos muestras de pastas y se obtienen los valores: $U=197,0$ y $p=0,041$. Entonces, se puede afirmar que existen diferencias estadísticamente significativas entre los resultados de la pasta del MHAD media rica (pasta MR) y la pasta del MHAD rica (R).

Luego, se realiza un Test de Kruskal-Wallis con los resultados de la pasta rica (pasta R) y los MHAD media rica (MR) y rica (R) que presenta los siguientes valores: $H=4,344$ y $p=0,114$. Se puede afirmar que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los resultados de estas tres muestras.

Por último, se puede afirmar que existen diferencias estadísticamente significativas entre los resultados de la pasta media rica (pasta MR) y el MHAD media rica (MR) debido a que el Test U de Mann-Whitney presenta los valores: $U=73,0$ y $p=6,86 \times 10^{-6}$.

En conclusión, existen diferencias estadísticamente significativas entre la pasta del MHAD media rica (pasta MR) y el MHAD media rica (MR) y no hay diferencias estadísticamente significativas entre la pasta del MHAD rica (pasta R) y el MHAD rica (R). Esto se puede adjudicar a que en la pasta del MHAD media rica (pasta MR) queda agua en exceso y por lo tanto no se desarrolla tanto la retracción autógena como en la pasta del MHAD rica (R).

4.1.5 Deformación autógena de MHAD con CCA con tiempo final de fraguado según método de referencia (Norma ISO 9597)

A continuación, en la Tabla 4.9 y en la Figura 4.9 se presentan los resultados de deformación autógena para los MHAD en los que se sustituyó parte del cemento por CCA junto con los del MHAD (R) que se consideró de referencia.

Tabla 4.9 – Deformación autógena de los MHAD con CCA, calculada según método de referencia, a diferentes edades

Deformación autógena ($\mu\text{m}/\text{m}$)									
MHAD	Edad (días)								
	2	3	7	14	21	28	56	91	181
CAAH	-32	-39	-79	-97	-104	-106	-72	-152	-227
CCAR1	-17	-28	-33	-94	-103	-108	-85	-172	-263
CCAR2	-11	-14	-74	-90	-96	-101	-99	-168	-250
MHAD R	-67	-74	-118	-109	-125	-141	-187	-230	-295

Las deformaciones fueron registradas hasta los 181 días considerando su inicio a partir de los tiempos finales de fraguado determinados según el método de referencia de la Norma ISO 9597, ver Figura 4.9.

Para las muestras que incorporan CCA los valores medios de retracción autógena son menores en comparación con la retracción autógena del MHAD de referencia sin ceniza. Esta disminución puede ser adjudicada a que se ha aumentado la cantidad de finos debido a que la sustitución de cemento por ceniza se hizo en peso y no en volumen.

Asimismo, corresponde señalar que en estas muestras que contienen CCA se constata un cambio en la consistencia. Al incrementar la cantidad de finos y mantener la cantidad de agua constante se obtiene un menor escurrimiento en la mesa de sacudidas.

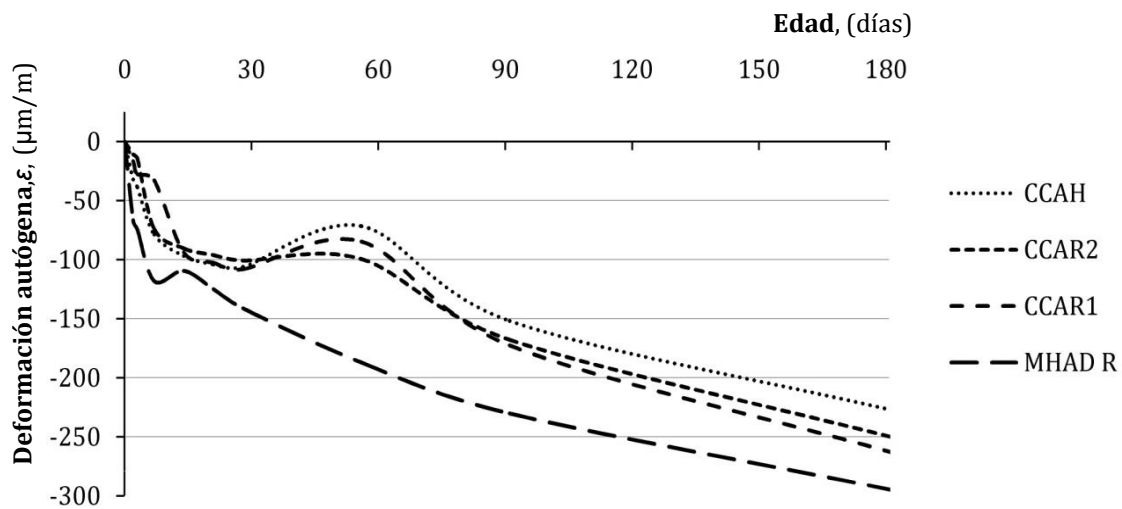


Figura 4.9 - Deformación autógena de los MHAD con CCA y del MHAD de referencia en función del tiempo considerando tiempo final de fraguado según método de referencia

En el gráfico de la Figura 4.10 se indican los tiempos finales de fraguado para las muestras de MHAD que incorporan CCA.

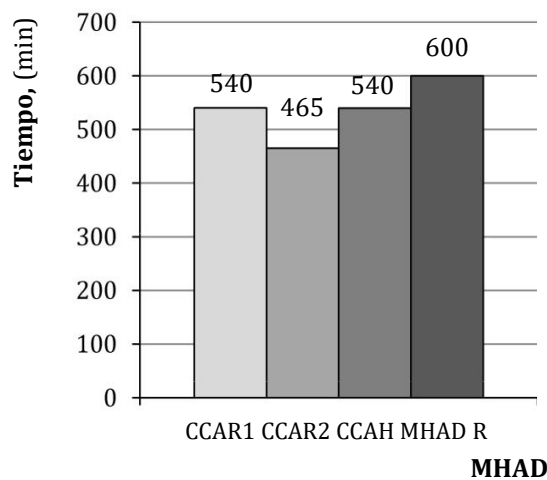


Figura 4.10 - Tiempo final de fraguado de los MHAD con CCA y MHAD rica (R) de referencia según método de referencia (Norma ISO 9597)

Se puede observar que la CCA disminuye el tiempo final de fraguado de los MHAD en relación al MHAD de referencia sin ceniza. El tiempo final de fraguado es un 10% menor para las muestras CCAR1 y CCAH y un 23% menor para la muestra CCAR2 en comparación con el del MHAD de referencia. Esto incide en la deformación autógena ya que como se mencionó anteriormente, la misma se calcula a partir del tiempo final de fraguado (tiempo cero).

En la Tabla 4.10 se indican valores que representan la variación de la deformación autógena en los MHAD con CCA a las edades de 2, 28 y 181 días. Para ello se consideraron los valores de deformación autógena del MHAD rica (R) como referencia (valor =1).

Tabla 4.10 – Comparación de los valores de deformación autógena de los MHAD con CCA, respecto a los del MHAD rica (R) a los 2, 28 y 181 días

MHAD	Edad (días)		
	2	28	181
CAAH	0,48	0,76	0,78
CCAR1	0,25	0,76	0,89
CCAR2	0,16	0,72	0,85
R	1,00	1,00	1,00

Como se puede ver en la Tabla 4.10, a la edad de 2 días se visualizan los mayores desvíos respecto al MHAD rica (R), a saber, valores un 52%, 75% y 84% menores para los MHAD CCAH, CCAR1 y CCAR2 respectivamente. A los 28 días los desvíos se encuentran dentro del rango entre 24% y 28% y a los 181 días entre 11% y 22%.

Se realiza un Test de Kruskal-Wallis con los resultados de los MHAD con CCA que presenta los siguientes valores: $H=0,246$ y $p=0,884$. Se puede afirmar que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los resultados de las tres muestras.

A continuación, se realiza otro Test de Kruskal-Wallis con los resultados de los MHAD con CCA junto con los de la muestra de referencia MHAD rica (R). Se obtienen los valores: $H=8,913$ y $p=0,030$. Entonces, se puede afirmar que existen diferencias estadísticamente significativas entre los resultados de las muestras analizadas.

Por lo tanto se concluye que hay diferencias estadísticamente significativas entre las muestras correspondientes a los MHAD con CCA y el MHAD rica (R) de referencia.

4.2 DEFORMACIÓN POR SECADO

4.2.1 Deformación por secado de los MHAD

A continuación, en la Tabla 4.11 y en la Figura 4.11 se presentan los resultados de deformación por secado de los MHAD estudiados. Las deformaciones fueron registradas hasta los 181 días.

Se puede observar un comportamiento opuesto al registrado en deformación autógena, ya que hay aumento de deformación por secado a medida que disminuye el contenido de cemento y aumenta la proporción árido/cemento y la relación agua/cemento en la mezcla. Este comportamiento puede ser explicado porque se forma una estructura más densa, que obstruye la evaporación, y además hay menor cantidad de agua disponible para evaporar.

Tabla 4.11 – Deformación por secado de los MHAD a diferentes edades

Deformación por secado ε , (%)										C.V. 181 días (%)
MHAD	Edad (días)									
	2	3	7	14	21	28	56	91	181	
P	-0,013	-0,024	-0,043	-0,056	-0,066	-0,070	-0,078	-0,081	-0,084	13
MP	-0,014	-0,020	-0,036	-0,050	-0,060	-0,064	-0,073	-0,078	-0,081	3
M	-0,008	-0,016	-0,034	-0,049	-0,057	-0,062	-0,068	-0,070	-0,073	6
MR	-0,002	-0,003	-0,011	-0,024	-0,036	-0,042	-0,053	-0,059	-0,063	8
R	-0,005	-0,009	-0,021	-0,038	-0,046	-0,049	-0,052	-0,055	-0,060	6

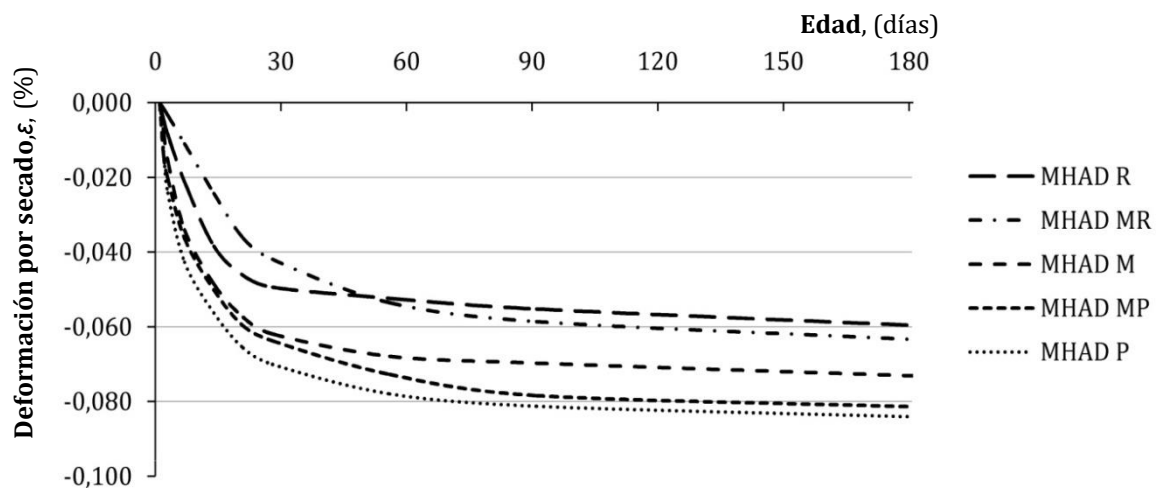


Figura 4.11 – Deformación por secado de los MHAD en función del tiempo

Se realiza un Test de Kruskal-Wallis considerando los resultados de las cinco muestras y se obtienen los siguientes valores: $H=5,673$ y $p=0,225$. Por consiguiente, se puede afirmar que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las cinco muestras analizadas.

4.2.2 Deformación por secado de pastas de los MHAD

En la Tabla 4.12 y en la Figura 4.12 se presentan los resultados de deformación por secado de las pastas de los MHAD estudiados. Las deformaciones fueron registradas hasta los 181 días.

A partir de los 45 días se puede observar un comportamiento similar al registrado en deformación por secado de los MHAD, ya que hay aumento de deformación por secado a

medida que disminuye la proporción de cemento y aumenta la proporción árido/cemento y la relación agua/cemento en la mezcla. Al igual que para los MHAD, este comportamiento puede ser explicado porque se forma una estructura más densa, que obstruye la evaporación, y además hay menor cantidad de agua disponible para evaporar.

Tabla 4.12 – Deformación por secado de las pastas de los MHAD a diferentes edades

Deformación por secado ε , (%)										C.V. 181 días (%)
MHAD	Edad (días)									
	2	3	7	14	21	28	56	91	181	
P	-0,023	-0,029	-0,094	-0,167	-0,201	-0,218	-0,254	-0,281	-0,336	1
MP	-0,028	-0,027	-0,072	-0,135	-0,163	-0,180	-0,218	-0,240	-0,280	3
M	-0,004	-0,008	-0,015	-0,061	-0,112	-0,134	-0,206	-0,223	-0,242	1
MR	-0,001	-0,003	-0,010	-0,053	-0,098	-0,120	-0,190	-0,212	-0,224	2
R	-0,011	-0,022	-0,053	-0,095	-0,130	-0,148	-0,175	-0,199	-0,206	8

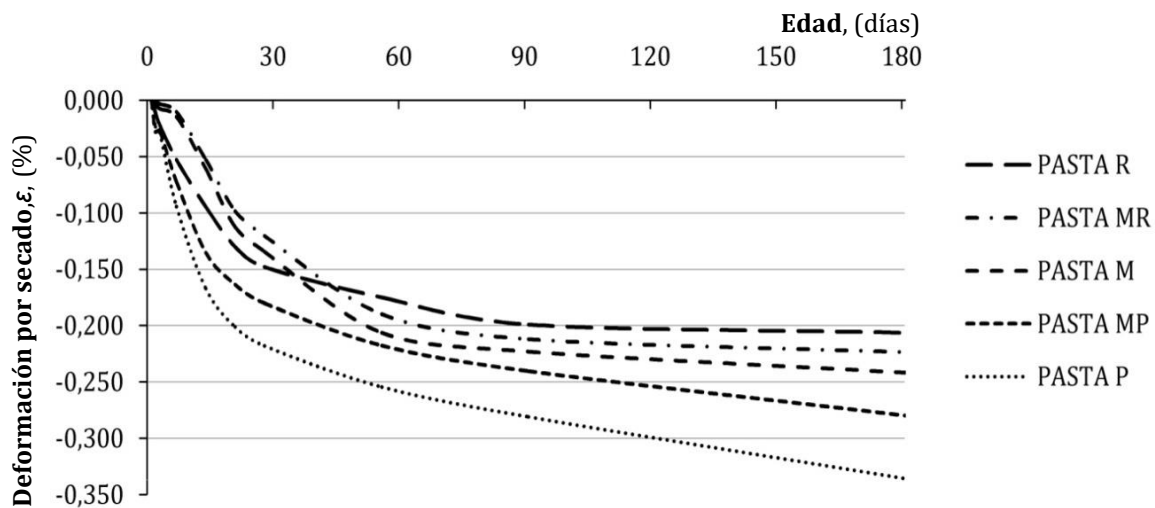


Figura 4.12 – Deformación por secado de las pastas de los MHAD en función del tiempo

Se realiza un Test de Kruskal-Wallis considerando los resultados de las cinco muestras y se obtienen los siguientes valores: $H=3,228$ y $p=0,520$. Por consiguiente, se puede afirmar que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las cinco muestras analizadas.

4.2.3 Comparación de la deformación por secado de los MHAD y las pastas correspondientes

En la Figura 4.13 se grafican los resultados de deformación por secado de los MHAD en comparación con los de las pastas correspondientes.

Como se mencionaba en el apartado 4.2.1, respecto a la deformación por secado, no existen diferencias estadísticamente significativas entre las muestras de MHAD.

Asimismo, de acuerdo a lo expuesto en el apartado 4.2.2, tampoco existen diferencias estadísticamente significativas entre las muestras de pastas de los MHAD.

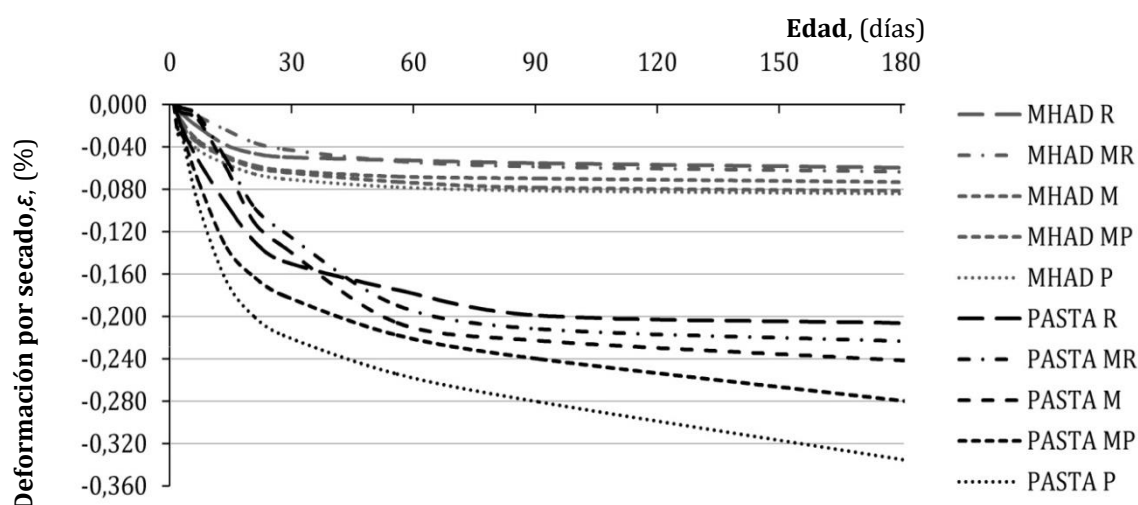


Figura 4.13 – Deformación por secado de los MHAD y de las pastas de los MHAD en función del tiempo

Sin embargo, se realiza un Test de Kruskal-Wallis considerando las cinco muestras de MHAD y las cinco pastas correspondientes y se obtienen los siguientes valores: $H=23,143$ y $p=0,006$. Por consiguiente, se puede afirmar que existen diferencias estadísticamente significativas entre los resultados de las muestras de los MHAD en comparación con los de sus pastas.

En este caso, a diferencia de lo señalado en el apartado 4.1.4 para deformación autógena, se comprueba que la presencia de agregado en la muestra genera una restricción al desarrollo de deformación por secado.

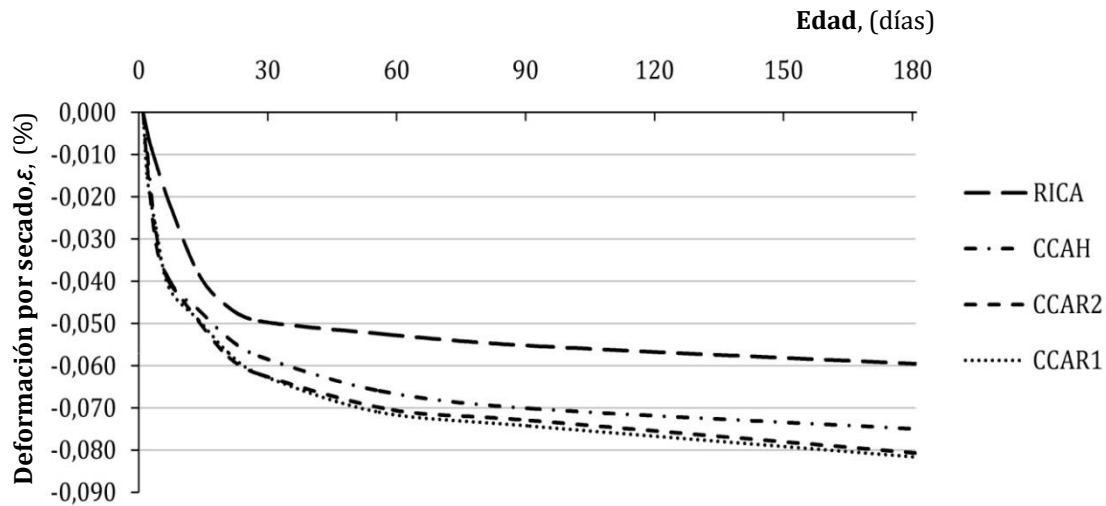
4.2.4 Deformación por secado de MHAD con CCA

En la Tabla 4.13 se presentan los valores de deformación por secado de los MHAD en los que se sustituyó parte del cemento por CCA junto con los del MHAD (R) que se consideró de referencia. Como se explicó en el apartado 4.2.4, se eligió la dosificación rica (R) como MHAD de referencia ya que es la que contiene mayor cantidad de cemento y la que alcanza mayores valores de deformación autógena. Las deformaciones fueron registradas hasta los 181 días.

En la Figura 4.14 se muestra como la incorporación de CCA no afecta de manera significativa la deformación por secado en comparación con la deformación autógena del MHAD de referencia sin ceniza. Se puede observar que las curvas de deformación de los MHAD con cenizas presentan un comportamiento similar entre sí, apenas por debajo de la curva de deformación del MHAD de referencia.

Tabla 4.13 – Deformación por secado de los MHAD con CCA a diferentes edades

Deformación por secado ε , (%)										C.V.
MHAD	Edad (días)									181 días
	2	3	7	14	21	28	56	91	181	
CCAH	-0,010	-0,028	-0,040	-0,047	-0,054	-0,058	-0,066	-0,070	-0,075	9
CCAR2	-0,013	-0,031	-0,039	-0,050	-0,058	-0,062	-0,070	-0,073	-0,081	6
CCAR1	-0,016	-0,027	-0,041	-0,049	-0,057	-0,062	-0,071	-0,074	-0,082	11
R	-0,005	-0,009	-0,021	-0,038	-0,046	-0,049	-0,052	-0,055	-0,060	6

**Figura 4.14** – Deformación por secado de los MHAD con CCA y de MHAD de referencia en función del tiempo

Se realiza un Test de Kruskal-Wallis considerando la muestra de referencia y las tres muestras de MHAD con CCA y se obtienen los valores: $H=9,689$ y $p=0,021$. Entonces, se puede afirmar que existen diferencias estadísticamente significativas entre los resultados de las muestras analizadas.

Luego, se realiza un Test de Kruskal-Wallis considerando las tres muestras de MHAD con CCA y se obtienen los valores: $H=0,434$ y $p=0,805$. Entonces, se puede afirmar que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los resultados de estas tres muestras.

4.3 FLEXIÓN Y COMPRESIÓN

4.3.1 Flexión y compresión de los MHAD

Los resultados obtenidos de resistencia a flexión y a compresión a 28 días de los MHAD se muestran en la Tabla 4.14 y la Figura 4.15. Se puede ver que los valores de resistencia a flexión y compresión son mayores a medida que aumenta el contenido de cemento y

disminuye la proporción árido/cemento y la relación agua/cemento. El gráfico muestra una diferencia marcada entre las resistencias a flexión de las dosificaciones con alto contenido de cemento respecto a las de bajo contenido. Mientras que la resistencia a compresión muestra valores que aumentan proporcionalmente al aumento del contenido de cemento.

Además, los coeficientes de variación de la resistencia a flexión son inversamente proporcionales al contenido de cemento. Respecto a los coeficientes de variación de resistencia a compresión se destaca que se obtienen valores bajos, menores de 3,3 %.

Tabla 4.14 - Resultados de resistencia a flexión y a compresión de los MHAD a 28 días

MHAD	Resistencia a flexión, R_f (MPa)				C.V. (%)	Resistencia a compresión, R_c (MPa)							C.V. (%)
	R_{f1}	R_{f2}	R_{f3}	R_f		R_{c1}	R_{c2}	R_{c3}	R_{c4}	R_{c5}	R_{c6}	R_c	
P	5,2	4,9	6,1	5,4	11,5	29,2	30,0	28,7	27,6	29,5	27,8	28,8	3,3
MP	6,6	5,6	5,4	5,9	10,6	42,8	41,7	41,2	43,9	44,0	42,5	42,7	2,6
M	6,6	6,3	5,9	6,3	5,7	55,2	52,6	55,0	53,0	52,8	52,3	53,5	2,4
MR	8,2	8,9	9,1	8,8	5,6	67,5	69,6	64,3	64,5	66,3	65,3	66,2	3,1
R	11,0	11,3	10,8	11,0	2,1	86,4	85,0	78,9	84,9	82,9	81,9	83,3	3,2

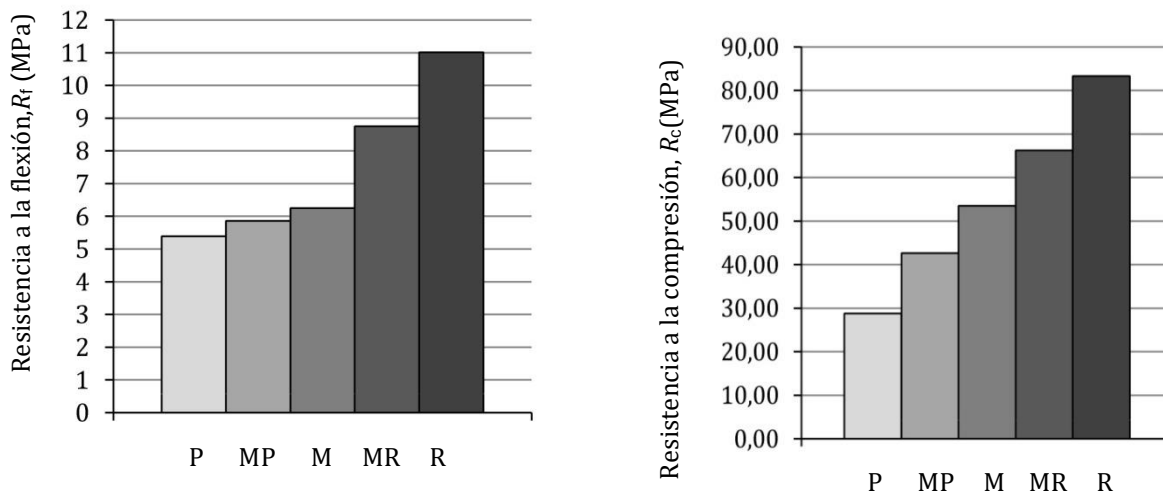


Figura 4.15 – Resistencia a flexión y a compresión de los MHAD a 28 días

Se realiza un Test U de Mann-Whitney considerando las dos primeras muestras y se obtienen los valores: $U=2,000$ y $p=0,275$. Por lo tanto, se puede afirmar que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las dos primeras muestras.

Luego, se realiza el test para las muestras MP y M y se obtienen los valores: $U=2,500$ y $p=0,376$. Entonces, se puede afirmar que no existen diferencias estadísticamente significativas entre la segunda y tercera muestra. Y como no existían tampoco entre las dos primeras, se puede afirmar que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las tres primeras muestras.

Sin embargo, entre la tercer y la cuarta muestra, al igual que entre la cuarta y la quinta muestra existen diferencias estadísticamente significativas. En ambos casos, el Test U de Mann-Whitney arroja los siguientes valores: $U=0,000$ y $p=0,050$.

Se realiza un Test U de Mann-Whitney considerando las cinco muestras y se obtienen los valores: $U=27,871$ y $p=1,32 \times 10^{-5}$. Por lo tanto, se puede afirmar que existen diferencias estadísticamente significativas entre las muestras analizadas. Si se analizan de a dos, dos muestras consecutivas (P y MP, MP y M, M y MR y MR y R) se obtienen los valores $U=0,000$ y $p=0,04$. Por lo tanto, se puede afirmar que cada una de las muestras presenta diferencias estadísticamente significativas respecto a las otras.

4.3.2 Flexión y compresión de las pastas de los MHAD

Los resultados obtenidos de resistencia a flexión y a compresión a 28 días de las pastas de los MHAD se muestran en la Tabla 4.15 y la Figura 4.16. Se puede observar que los valores de resistencia a flexión y compresión son mayores a medida que aumenta el contenido de cemento y disminuye la proporción árido/cemento y la relación agua/cemento.

Tabla 4.15 - Resistencia a flexión y a compresión de las pastas de los MHAD a 28 días

MHAD	Resistencia a flexión, R_f (MPa)				C.V. (%)	Resistencia a compresión, R_c (MPa)							C.V. (%)
	R_{f1}	R_{f2}	R_{f3}	R_f		R_{c1}	R_{c2}	R_{c3}	R_{c4}	R_{c5}	R_{c6}	R_c	
P	7,0	7,0	7,5	7,2	3,8	25,6	24,3	24,4	24,9	23,7	24,3	24,5	2,7
MP	8,0	7,0	7,5	7,5	6,3	34,5	36,6	35,4	36,7	34,4	37,1	35,8	3,3
M	9,1	8,4	8,4	8,7	4,7	48,9	48,8	50,1	50,5	51,0	51,0	50,0	6,9
MR	9,8	9,4	10,3	9,8	4,8	63,5	66,8	69,7	70,7	69,4	72,3	68,7	1,8
R	12,0	12,0	12,4	12,1	2,2	83,3	85,8	83,3	84,6	83,3	90,2	85,1	3,2

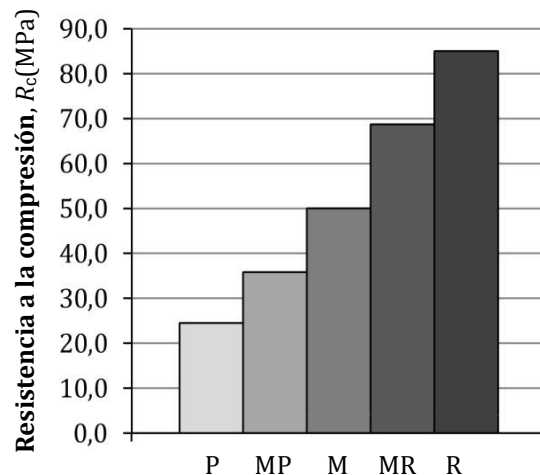
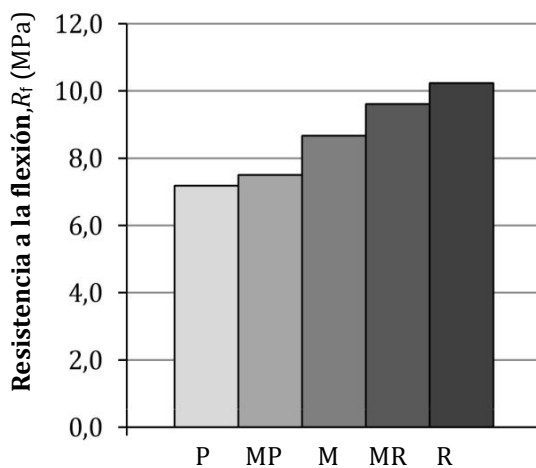


Figura 4.16 – Resistencia a flexión y a compresión de las pastas de los MHAD a 28 días

Se realiza un Test U de Mann-Whitney considerando las cinco muestras y se obtienen los valores: $U=13,122$ y $p=0,011$. Por lo tanto, se puede afirmar que existen diferencias estadísticamente significativas entre las muestras analizadas.

Si se analizan la primera muestra y la segunda con un Test U de Mann-Whitney se obtienen los siguientes valores: $U=2,500$ y $p=0,346$. Entonces se puede afirmar que entre la muestra de pasta P y de pasta MP no existen diferencias estadísticamente significativas. Si se analizan las siguientes muestras, de a dos, considerando dos muestras consecutivas (MP y M, M y MR y MR y R) se obtienen los valores $U=0,000$ y $p=0,046$. Por lo tanto, se puede afirmar que cada una de las tres últimas muestras presenta diferencias estadísticamente significativas respecto a las restantes.

Se realiza un Test U de Mann-Whitney considerando las cinco muestras y se obtienen los valores: $U=27,908$ y $p=1,30 \times 10^{-5}$. Por lo tanto, se puede afirmar que existen diferencias estadísticamente significativas entre las muestras analizadas. Si se analizan de a dos, dos muestras consecutivas (es decir, P y MP, MP y M, M y MR y MR y R) se obtienen los valores $U=0,000$ y $p=0,04$. Por lo tanto, se puede afirmar que cada una de las muestras presenta diferencias estadísticamente significativas respecto a las restantes muestras.

4.3.3 Flexión y compresión de los MHAD con CCA

Los resultados obtenidos de resistencia a flexión y a compresión a 28 días de los MHAD con CCA se muestran en la Tabla 4.16 y en la Figura 4.17. Se puede ver que las resistencias mecánicas de los MHAD con CCA son inferiores a las del MHAD de referencia sin ceniza.

Tabla 4.16 - Resultados de Resistencia a flexión y a compresión de los MHAD con CCA a 28 días y del MHAD rica (R) de referencia

MHAD	Resistencia a flexión, R_f (MPa)				C.V. (%)	Resistencia a compresión, R_c (MPa)							C.V. (%)
	R_{f1}	R_{f2}	R_{f3}	R_f		R_{c1}	R_{c2}	R_{c3}	R_{c4}	R_{c5}	R_{c6}	R_c	
CCAR1	10,3	11,0	11,3	10,9	4,5	74,8	79,1	81,2	77,9	81,4	81,7	79,4	3,3
CCAR2	9,1	9,4	9,4	9,3	1,5	76,9	79,4	75,3	78,2	79,1	77,0	77,7	2,0
CCARH	10,1	9,1	7,7	9,0	13,1	77,4	74,6	76,0	76,4	74,1	76,3	75,8	1,6
R	11,0	11,3	10,8	11,0	2,1	86,4	85,0	78,9	84,9	82,9	81,9	83,3	3,2

En el caso de resistencia a flexión, los MHAD CCAR1, CCAR2 y CCARH presentan respectivamente valores un 1%, un 15%, y un 18% menores respecto al MHAD rica (R). En el caso de resistencia a compresión, los MHAD CCAR1, CCAR2 y CCARH presentan respectivamente valores un 5%, un 7%, y un 9% menores respecto al MHAD rica (R).

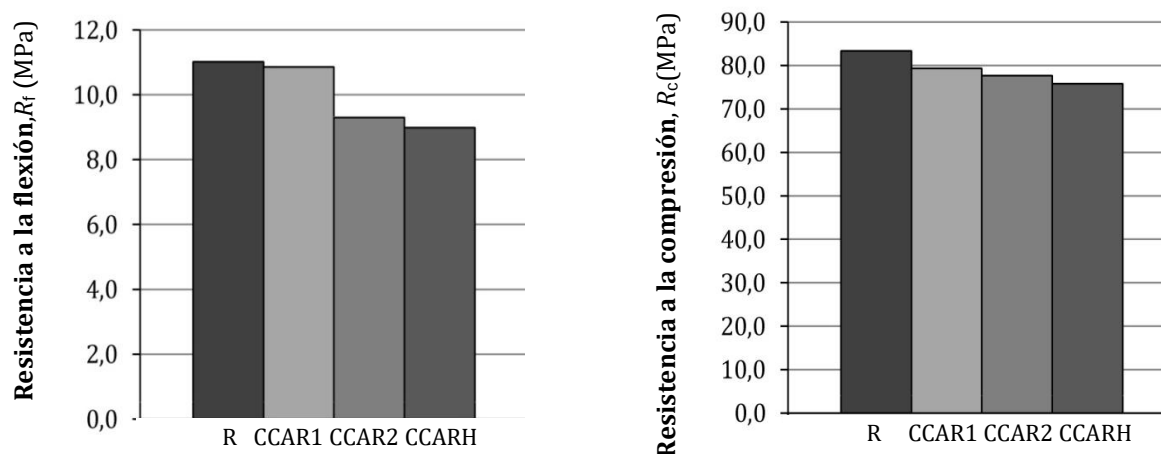


Figura 4.17 – Resistencia a flexión y a compresión de los MHAD con CCA a 28 días y del MHAD RICA (R) de referencia

Se realiza un Test de Kruskal-Wallis considerando las tres muestras de MHAD con CCA y el MHAD rica (R) y se obtienen los valores: $H=8,491$ y $p=0,037$. Por lo tanto, se puede afirmar que existen diferencias estadísticamente significativas entre las muestras analizadas.

Si se considera la muestra CCAR1 y el MHAD R, a partir de un Test U de Mann-Whitney se obtienen los valores $U=4,000$ y $p=0,822$. Por lo tanto, se puede afirmar que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las dos muestras.

Sin embargo, si ahora se considera la muestra CCAR2 y el MHAD R, a partir de un Test U de Mann-Whitney se obtienen los valores $U=0,000$ y $p=0,046$. Por lo tanto, se puede afirmar que existen diferencias estadísticamente significativas entre las dos muestras.

Por último, el Test U de Mann-Whitney para la muestra CCARH y el MHAD R arroja los siguientes valores: $U=0,000$ y $p=0,050$. Entonces, se puede afirmar que existen diferencias estadísticamente significativas entre las dos muestras analizadas.

Se realiza un Test de Kruskal-Wallis considerando las tres muestras de MHAD con CCA y el MHAD rica (R) y se obtienen los valores: $H=14,768$ y $p=0,002$. Por lo tanto, se puede afirmar que existen diferencias estadísticamente significativas entre las muestras analizadas.

Si se considera la muestra CCAR1 y el MHAD rica (R), a partir de un Test U de Mann-Whitney se obtienen los valores $U=4,000$ y $p=0,025$. Por lo tanto, se puede afirmar que existen diferencias estadísticamente significativas entre las dos muestras.

Si ahora se considera la muestra CCAR2 y el MHAD rica (R), a partir de un Test U de Mann-Whitney se obtienen los valores $U=2,000$ y $p=0,010$. Por lo tanto, se puede afirmar que existen diferencias estadísticamente significativas entre las dos muestras.

Por último, el Test U de Mann-Whitney para la muestra CCARH y el MHAD rica (R) arroja los siguientes valores: $U=0,000$ y $p=0,004$. Entonces, se puede afirmar que existen diferencias estadísticamente significativas entre las dos muestras analizadas.

Capítulo 5

Conclusiones y sugerencias

En este capítulo se presentan las conclusiones finales de este trabajo de investigación y a continuación se plantean las sugerencias para futuras investigaciones.

5.1 CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos a largo plazo muestran que a medida que se aumenta el contenido de cemento y se disminuye la proporción árido/cemento y la relación agua/cemento, se obtienen MHAD con mayor resistencia a compresión y a flexión pero también con valores más altos de retracción autógena.

- El método utilizado para la determinación del tiempo final de fraguado incide en los valores de deformación autógena obtenidos. Si se utiliza el método de referencia para la determinación del tiempo final de fraguado establecido en la Norma ISO 9597, para los MHAD estudiados se obtienen valores menores respecto a los que resultan a partir del método alternativo establecido en el Anexo A de la misma norma.

Se debe recordar que el método de referencia difiere respecto del método alternativo en que la muestra se mantiene sumergida en agua durante la determinación del tiempo final de fraguado. Esa disponibilidad de agua en exceso puede ser la causa del aumento del tiempo final de fraguado en las muestras de MHAD estudiadas. En consecuencia, se produce una reducción en los valores de retracción autógena cuando son calculados considerando como tiempo 0 los tiempos finales de fraguado obtenidos con el método de referencia.

Asimismo, el aumento en los tiempos finales de fraguado obtenidos con el método de referencia respecto a los obtenidos con el método alternativo no es igual en las diferentes muestras de MHAD. Esto provoca que varíen las muestras que presentan diferencias estadísticamente significativas entre sí.

Cuando se comparan los valores de deformación autógena a partir de los tiempos finales de fraguado con el método de referencia se distinguen tres grupos que presentan diferencias estadísticamente significativas. Por un lado se encuentran los MHAD pobre (P) y media pobre (MP), luego el MHAD media (M) y finalmente los MHAD media rica (MR) y rica (R).

Sin embargo, cuando se comparan los valores de deformación autógena a partir de los

tiempos finales de fraguado con el método alternativo se distinguen dos grupos que presentan diferencias estadísticamente significativas. Por un lado se encuentran los MHAD pobre (P) y media pobre (MP) y por otro lado los MHAD media (M), media rica (MR) y rica (R).

En particular, considerando los tiempos finales de fraguado según el método de referencia, se destaca que los MHAD media rica (MR) y rica (R) alcanzan valores de retracción autógena mayores a 100 μm en los primeros 7 días. Estos valores son similares a los de MHAD media (M) a los 181 días y del orden del doble de los de MHAD pobre (P) y media pobre (MP) a los 181 días. Pero si se consideran los tiempos finales de fraguado según el método alternativo todas las muestras de MHAD presentan a edad temprana valores de retracción autógena del orden de las 100 μm y al segundo día valores por encima de las 180 μm .

En definitiva, como se mencionó antes, los resultados de deformación autógena que se obtienen están condicionados por el método utilizado para la determinación del tiempo final de fraguado ya que ambos métodos proporcionan resultados con diferencias estadísticamente significativas.

- Al estudiar las pastas de los MHAD se evidencian algunos inconvenientes relacionados a los métodos de ensayo. Probablemente la causa de estos problemas fue el exceso de agua en la matriz, ya que al no incorporar agregado se utilizó demasiado líquido en relación a los materiales sólidos.

Por un lado, todas las pastas son fluidas, con valores de escurrimiento por encima de los 28 cm de diámetro. Esto hace que no sea posible determinar el tiempo final de fraguado en los MHAD pobre (P) y media pobre (MP), ni siquiera con el método alternativo, debido a que la pasta se escurre del molde impidiendo que se puedan realizar las mediciones.

Por otro lado, en el MHAD media (M) no se pudo determinar la deformación autógena debido a que en el interior de cada uno de los tubos se generaron burbujas de aire y el agua subió a la superficie separándose de la pasta. Corresponde recordar que, a los efectos de realizar las mediciones de deformación autógena a edad temprana, se colocaron los dilatómetros inclinados.

En conclusión, se entiende que es necesario profundizar el análisis sobre estos aspectos para conocer si responden a limitaciones de los métodos de ensayo o si es posible solucionar estos inconvenientes posibilitando la realización de las mediciones correspondientes.

Por ejemplo, para el primer caso, se podría implementar alguna forma de sellado del molde de fraguado que impida que la muestra se escurra. Para el caso de deformación autógena se podría implementar un sistema que mantenga las probetas en movimiento (rotación) durante los períodos entre mediciones con el propósito de impedir que el agua suba a la superficie.

- Respecto a las pastas de los MHAD media rica (pasta MR) y rica (pasta R) se concluye que la primera presenta diferencias estadísticamente significativas respecto al MHAD media rica (MR) mientras que la segunda no respecto al MHAD rica (R). Como se mencionaba en el capítulo anterior, esto se puede adjudicar a que en la pasta del MHAD media rica (pasta MR)

queda agua en exceso y por lo tanto no se desarrolla tanto la retracción autógena como en la pasta del MHAD rica (pasta R).

- En contraposición con las pastas de los MHAD, al incorporar CCA como sustitución de parte del cemento portland en el MHAD rica (R), se incrementa la cantidad de finos y se mantiene la cantidad de agua constante lo que resulta en muestras con menor escurrimiento. Se aumenta la cantidad de finos debido a que la sustitución de cemento por ceniza se hizo en peso y no en volumen.

- Los MHAD con CCA presentan tiempos finales de fraguado menores respecto al del MHAD rica (R) de referencia. Sin embargo, también presentan valores de deformación autógena menores respecto al MHAD rica (R). En relación a la deformación autógena no presentan diferencias estadísticamente significativas entre sí, pero si respecto al MHAD rica (R) de referencia.

- En una primera instancia, al evaluar la deformación por secado de los MHAD se puede observar que aumenta al disminuir el contenido de cemento y al aumentar la proporción árido/cemento y la relación agua/cemento. Sin embargo, se concluye que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los MHAD estudiados y tampoco entre las pastas correspondientes pero sí entre un grupo y otro. Las pastas de los MHAD presentan valores de retracción por secado mayores a los de los MHAD.

- Por otro lado, no existen diferencias estadísticamente significativas entre los resultados de retracción por secado de los MHAD con CCA entre sí, ni respecto al MHAD rica (R) de referencia.

- En relación a la resistencia a flexión y a compresión de los MHAD y de las pastas correspondientes, se observa que los valores aumentan a medida que aumenta el contenido de cemento y disminuye la proporción árido/cemento y la relación agua/cemento.

- Respecto a la resistencia a flexión de los MHAD se distinguen dos grupos que presentan diferencias estadísticamente significativas. Por un lado se encuentran los MHAD pobre (P), media pobre (MP) y media (M) y por otro lado los MHAD media rica (MR) y rica (R). Respecto a la resistencia a compresión de los MHAD existen diferencias estadísticamente significativas entre los cinco MHAD estudiados.

- Si consideramos la resistencia a flexión de las pastas de los MHAD no existen diferencias estadísticamente significativas entre los MHAD pobre (P) y media pobre (MP) y sí existen entre los MHAD media (M), media rica (MR) y rica (R). Respecto a la resistencia a compresión de las pastas de los MHAD existen diferencias estadísticamente significativas entre las cinco muestras estudiadas.

- En cuanto a resistencia a flexión de los MHAD con CCA se puede concluir que para el caso de CCAR1 no existen diferencias estadísticamente significativas respecto al MHAD rica (R) de referencia. Sin embargo para el caso de los MHAD con CCAR2 y CCARH sí existen diferencias estadísticamente significativas. En cambio si consideramos la resistencia a compresión de los

MHAD con CCA se puede afirmar que no existen diferencias estadísticamente significativas respecto al MHAD rica (R) de referencia en ninguno de los tres casos estudiados.

- En síntesis, a pesar que el tiempo final de fraguado de los MHAD con CCA disminuye respecto al del MHAD de referencia, se puede afirmar, en relación a la deformación autógena, que estos MHAD y el MHAD rica (R) de referencia presentan comportamientos similares entre sí. Asimismo, la incorporación de CCA no afecta la deformación por secado, ni la resistencia a compresión a los 28 días, y sólo en algunos casos (MHAD con CCAR2 y MHAD con CCARH) disminuye levemente la resistencia a flexión a los 28 días. Sin embargo, se reduce el escurrimiento de la mezcla ya que se obtienen mezclas más secas respecto al MHAD de referencia, con tiempos finales de fraguado menores respecto al del MHAD de referencia. En definitiva, se afecta la característica de autocompactabilidad.

- En resumen, los diferentes MHAD estudiados presentan diferencias en relación a la deformación autógena dividiéndose al menos en dos grupos con un valor límite entre ambos que se encuentra en el rango entre relación agua/cemento mayor a 0,42 y menor de 0,36. Como se mencionó anteriormente, los valores difieren según el método utilizado para la determinación del tiempo final de fraguado considerado como tiempo 0 para el cálculo de la deformación autógena. Respecto a la deformación por secado los diferentes MHAD presentan un comportamiento similar entre sí. Para el caso de las resistencias mecánicas, en la resistencia a flexión se distinguen dos grupos que se diferencian con un valor límite similar al señalado para deformación autógena. Sin embargo, la resistencia a compresión de los MHAD es mayor a medida que aumenta el contenido de cemento y se disminuye la proporción árido/cemento y la relación agua/cemento.

- Se pueden utilizar MHAD con valores de retracción autógena bajos aplicando técnicas adecuadas de curado que permitan controlar la retracción por secado. En estos casos, el desarrollo de retracción autógena se supone que ayuda a la durabilidad porque baja la permeabilidad y se favorece la generación de una estructura de poros más fina. En MHAD con gran desarrollo de retracción autógena se corre el riesgo de afectar al resistencia y durabilidad de las estructuras.

5.2 SUGERENCIAS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

- Para futuras investigaciones, se entiende que podría ser una mejora a implementar en el procedimiento de ensayo para la determinación de la deformación autógena rotar los tubos en los periodos entre mediciones según las investigaciones de Lura, 2003 y las recomendaciones de Mohr y Hood, 2010. Esto con el propósito de evitar que el agua suba a la superficie dentro de la probeta durante el fraguado y sea luego reabsorbida por la mezcla.

- También se propone revisar si corresponde efectivamente considerar el tiempo final de fraguado como “tiempo cero” de deformación autógena de acuerdo con lo que establece la Norma ASTM C 1698:2009, teniendo en cuenta que otros investigadores han determinado el “tiempo cero” para la medición de la deformación autógena de otras maneras según lo señalado al final del apartado 2.4 del Capítulo 2.

- Por otro lado, se propone investigar a futuro cuál es la dosificación óptima que permita incorporar CCA sin perder las características de autocompactabilidad del MHAD.
- En el presente trabajo como ya fue mencionado en los párrafos anteriores, el escurrimiento de las pastas fue superior al de los MHAD y se advirtió que las pastas presentaban demasiado líquido en relación a los materiales sólidos. Esta podría ser la causa de que los valores de retracción autógena de los MHAD estudiados sean mayores respecto a los de las pastas correspondientes. Podría ser objeto de futuras investigaciones, profundizar en el análisis de la incidencia de cada uno de los materiales componentes, entre ellos el agregado, en los resultados de deformación autógena.

Referencias bibliográficas

- AENOR, UNE-EN 1015-3:2000/A1:2005/A2:2007, Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas). Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid, España.
- AENOR, UNE 83831:2010 EX, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería endurecidos. Determinación de la estabilidad dimensional de los morteros para albañilería endurecidos. Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid, España.
- Aİtcin, P. C. (2003). The durability characteristics of high performance concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 25(4-5 SPEC), 409–420. [http://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00081-1](http://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00081-1)
- Aİtcin, P.-C., Bentur, A., & Mindess, S. (2008). *Binders for durable and sustainable concrete. Modern Concrete Technology* (Vol. 16). <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Alrifai, a., Aggoun, S., & Cabrillac, R. (2008). Influence of Formulation Parameters on the Autogenous Shrinkage of Self-Compacting Concretes. *8th International Conference on Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures*, 663–666. <http://doi.org/10.1201/9780203882955.ch87>
- Alrifai, A., Aggoun, S., Kadri, E.-H., De Schutter, G., & Noumowe, a. (2011). Influence of aggregate skeleton on shrinkage properties: validation of the model developed by Le Roy for the case of self-compacting concrete. *Materials and Structures*, 44(9), 1593–1607. <http://doi.org/10.1617/s11527-011-9721-1>
- ASTM, ASTM C 191 (2013), Standard test methods for time of setting of hydraulic cement by Vicat needle, ASTM International, Pennsylvania, United States.
- ASTM, ASTM C 1698 (2009), Standard test method for autogenous strain of cement paste and mortar, ASTM International, Pennsylvania, United States.
- Bentz, D. P., & Peltz, M. a. (2008). Reducing thermal and autogenous shrinkage contributions to early-age cracking. *ACI Materials Journal*, 105(4), 414–420. <http://doi.org/10.14359/19904>
- Calavera, J., (2005) Patologías de estructuras de hormigón armado y pretensado, 2ª edición, Tomo 1, INTEMAC, ISBN 84-88764-21-9, INFOPRINT S.A., Madrid, España, 2005.
- Chang-wen, M., Qian, T., Wei, S., & Jia-ping, L. (2007). Water consumption of the early-age paste and the determination of “time-zero” of self-desiccation shrinkage. *Cement and Concrete Research*, 37(11), 1496–1501. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.005>
- Choi, S. Y., Park, J. S., & Jung, W. T. (2011). The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction A Study on the Shrinkage Control of Fiber Reinforced Concrete Pavement. *Procedia Engineering*, 14, 2815–2822. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.354>
- D'Ambrosia, M. (2015). Early-age cracking. Portland Cement Association. Recuperado de <http://www.cement.org/for-concrete-books-learning/concrete-design-production/early-age-cracking>
- EHE- 08, (2008), Instrucción de Hormigón Estructural, ed, Ministerio de Fomento, BOE RD 1247/2008. Madrid, España.
- Esping, O. (2007). *Early age properties of self-compacting concrete. Environmental Engineering*.

- Fontana, P., Pirskawetz, S., Weise, F., & Meng, B. (2007). Detection of early-age cracking due to restrained autogenous shrinkage. *Advances in Construction Materials 2007*, 490–496. http://doi.org/10.1007/978-3-540-72448-3_49
- Gagné, R., Aouad, I., Shen, J., & Poulin, C. (1999). Development of a new experimental technique for the study of the autogenous shrinkage of cement paste. *Materials and Structures*, 32(9), 635–642. <http://doi.org/10.1007/BF02481701>
- Gao, X., Kawashima, S., Liu, X., & Shah, S. P. (2012). Influence of clays on the shrinkage and cracking tendency of SCC. *Cement and Concrete Composites*, 34(4), 478–485. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.002>
- Giani, R., Navarrete, B., & Bustos, J. (2008). La retracción autógena y su relación con la tendencia a la fisuración a temprana edad en pavimentos de hormigón. *Revista de La Construcción*, 7(2), 62–71.
- Hai, Y., & Zhu, Y. (2009). Mesocosmic study on autogenous shrinkage of concrete with consideration of effects of temperature and humidity. *Water Science and Engineering*, 2(4), 85–94. <http://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2009.04.008>
- Hansen P.F., Jensen O.M. (1989), Self-desiccation shrinkage in low porosity cement-silica mortar, *Nord Concr Res* 8 (1989) 89–102.
- Hansen P.F., Jensen O.M. (1995a) Autogenous relative humidity change in silica fume-modified cement paste. *Advances in Cement Research* 7 (25) 33–38
- Hansen P.F., Jensen O.M. (1995b) A dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening Portland cement paste. *Material and Structures* 28 (181) 406–409
- Hansen P.F., Jensen O.M. (1996) Autogenous deformation and change of the relative humidity in silica fume-modified cement paste. *ACI Mater J* 93(6) 539–543
- Holt, E. E. (2001). Early age autogenous shrinkage of concrete. *VTT Publications*, (446), 2–184.
- Holt, E. (2005). Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages. *Cement and Concrete Research*, 35(3), 464–472. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.009>
- Holt, E., & Leivo, M. (2004). Cracking risks associated with early age shrinkage. *Cement and Concrete Composites*, 26(5), 521–530. [http://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00068-4](http://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00068-4)
- ISO, ISO 9597(2008), Cements. Test methods. Determination of setting time and soundness. International Standardization Organization (ISO), Second edition 2008-11-15, ICS 91.100.10, 1–11, Geneva, Switzerland.
- Jensen O. M. (1995), Thermodynamic limitation of self-desiccation, *Cement and Concrete Research* 25 (1) 157–164
- Jensen O.M. (1996), Dilatometer - further development, Department of Structural Engineering and Materials, Technical University of Denmark. Report, 1–8.
- Jensen, O. M., & Hansen, P. F. (1999). Influence of temperature on autogenous deformation and relative humidity change in hardening cement paste. *Cement and Concrete Research*, 29(4), 567–575. [http://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00021-6](http://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00021-6)
- Jensen O. M. (2000), Influence of cement composition on autogenous deformation and change in relative humidity, proceeding of the international RILEM work shop « Shrinkage 2000 » Paris, 16–17 October 2000. *RILEM Proceedings. PRO 17*, Cachan (2000) 143–153

- Jensen, O. M., & Hansen, P. F. (2001a). Autogenous deformation and RH-change in perspective. *Cement and Concrete Research*, 31(12), 1859–1865. [http://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00501-4](http://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00501-4)
- Jensen, O. M., & Hansen, P. F. (2001b). Water-entrained cement-based materials –I. Principles and theoretical background, *Cement and Concrete Research* 31 (4) 647–654.
- Jensen, O. M., & Hansen, P. F. (2002). Water-entrained cement-based materials –II. Experimental observations, *Cement and Concrete Research* 32 (6) 973–978.
- Jensen O.M. (2005) Autogenous Phenomena in Cement-Based Materials. Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University ISBN 87-91606-00-4
- Jensen O.M., Østergaard, T. (2003). A thermal comparator sensor for measuring autogenous deformation in hardening Portland cement paste. *Materials and Structures*, 36(264), 661–665. <http://doi.org/10.1617/14062>
- Jiang, C., Yang, Y., Wang, Y., Zhou, Y., & Ma, C. (2014). Autogenous shrinkage of high performance concrete containing mineral admixtures under different curing temperatures. *Construction and Building Materials*, 61, 260–269. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.023>
- Kawashima, S., & Shah, S. P. (2011). Early-age autogenous and drying shrinkage behavior of cellulose fiber-reinforced cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 33(2), 201–208. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.10.018>
- Koh, K., Ryu, G., Kang, S., Park, J., & Kim, S. (2011). Shrinkage properties of ultra-high performance concrete (UHPC). *Advanced Science Letters*, 4(3), 948–952. <http://doi.org/10.1166/asl.2011.1505>
- Lee, Y., Yi, S. T., Kim, M. S., & Kim, J. K. (2006). Evaluation of a basic creep model with respect to autogenous shrinkage. *Cement and Concrete Research*, 36(7), 1268–1278. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.02.011>
- Lura, P. (2003). *Autogenous Deformation and Internal Curing of Concrete*. ISBN 90407-24040. 1-208.
- Lura, P., Jensen, O. M., & Breugel, K. Van. (2003). Autogenous shrinkage in high-performance cement paste : An evaluation of basic mechanisms Modeling of autogenous relative humidity change and autogenous, 33, 223–232.
- Lura, P., & Jensen, O. M. (2005). Volumetric Measurement in Water Bath – an Inappropriate Method to Measure Autogenous Strain of Cement Paste, (2925).
- Lura, P., & Jensen, O. M. (2006). Measuring techniques for autogenous strain of cement paste. *Materials and Structures*, 40(4), 431–440. <http://doi.org/10.1617/s11527-006-9180-2>
- Maia L.M., Nunes S., Figueiras J.A., (2009), Influence of paste content on shrinkage and creep of SCC, *Creep, shrinkage and durability mechanics of concrete and concrete structures*, Tanabe et al.. (eds) 2009, Taylor & Francis Group, London, UK, 675-680, ISBN 978-0-415-48508-1.
- Malhotra, V.M., Mehta, P.K. (1996). Pozzolanic and Cementitious Materials. *Advances in Concrete Technology*, vol. 1, Gordon and Breach Publishers, Canada, ISBN 2-88449-235-6.
- Mehta, P.K. (1994). Highly durable cement products containing siliceous ashes. United States Patent Number 5,346,548. Sep 13, 1994, USA, 15p.
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. Edición 3, Mac Graw Hill Professional, USA, ISBN 978-0-071-46289-1

- Mohr, B. J., & Hood, K. L. (2010). Influence of bleed water reabsorption on cement paste autogenous deformation. *Cement and Concrete Research*, 40(2), 220–225. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.10.014>
- Mounanga, P., Baroghel-Bouny, V., Loukili, A., & Khelidj, A. (2006). Autogenous deformations of cement pastes: Part I. Temperature effects at early age and micro-macro correlations. *Cement and Concrete Research*, 36(1), 110–122. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.019>
- Neville, a. M. (2011). *Properties of Concrete*. ISBN 978 027 37 55 807. 597-602.
- Rilem Technical Reports, (1981), Properties of set concrete at early age. State of the art report, Matériaux et Constructions, TC 42-CEA, ISSN: 0025-5432, vol.14, N°84, 399-450.
- Rilem Technical Reports, (1988), Final Report: Siliceous by-products for use in concrete. *Materials and Structures*, vol. 21, No.121, 69-80, 1988.
- Rodríguez de Sensale, G., Ribeiro, A. B., & Gonçalves, A. (2008). Effects of RHA on autogenous shrinkage of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), 892–897. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.06.014>
- Rodríguez de Sensale, G., Rolfi, R., Romay, C., Ulfe V., Chocca, C., Díaz Arnesto, G. (2012). Micro-hormigón de alto desempeño autocompactante. Ponencia presentada en 3° Congreso Iberoamericano sobre hormigón autocompactante. Avances y oportunidades. 2012, pp. 10, Madrid, España.
- Rodríguez de Sensale, G., Rolfi, R., Romay, C., Ulfe V., Chocca, C. (2012). Micro-hormigón de alto desempeño: materiales y dosificación. Ponencia presentada en 5° Simposio Internacional sobre hormigones especiales. SINCO, 2012, pp. 15 Fortaleza, Brasil.
- Shen, D., Wang, T., Chen, Y., Wang, M., & Jiang, G. (2015). Effect of internal curing with super absorbent polymers on the relative humidity of early-age concrete. *Construction and Building Materials*, 99(1), 246–253. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.042>
- Soliman, a. M., & Nehdi, M. L. (2011). Effect of drying conditions on autogenous shrinkage in ultra-high performance concrete at early-age. *Materials and Structures*, 44(5), 879–899. <http://doi.org/10.1617/s11527-010-9670-0>
- UNIT, UNIT-ISO 679 (2009), Métodos de ensayo de cementos. Determinación de resistencias mecánicas, ISO 679:2009 (MOD), Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT), Adopción UNIT Diciembre 2012, Ed. 2012-12-31.