

Influencia de los aditivos reductores de retracción sobre la retracción plástica

The influence of shrinkage reducing admixtures on plastic shrinkage

J. MORA*, A. AGUADO**, R. GETTU**

* Universidad Autónoma de Chihuahua

** E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Barcelona. UPC

ESPAÑA/MÉXICO

Fecha de recepción: 19-II-02
Fecha de aceptación: 17-III-03

RESUMEN

Los aditivos reductores de retracción (SRAs) se plantean, hoy en día, como una alternativa viable para reducir la fisuración por retracción plástica. El objetivo del presente artículo es conocer mejor y predecir el comportamiento a primeras edades de la retracción plástica en elementos estructurales coaccionados, a los que se les ha añadido diversos aditivos reductores de retracción (tres tipos diferentes). Esta influencia se analiza a través de las siguientes propiedades: presión capilar, evaporación, evolución de temperaturas, evolución de fisuración, y deformaciones verticales de asentamiento. Los ensayos para estudiar la fisuración y las deformaciones se han realizado sobre diferentes configuraciones (prisma restringido con estrangulamiento y panel restringido), en un túnel de viento, con temperaturas y velocidades de viento controladas. Las conclusiones obtenidas señalan la viabilidad del empleo de este tipo de aditivos y la bondad de los métodos experimentales utilizados.

SUMMARY

Shrinkage reducing admixtures (SRAs) are viable alternatives for reducing plastic shrinkage cracking in concrete. The objective of the present paper is to study early age plastic shrinkage in restrained concrete elements, where three different SRAs have been used. The influence of the admixture is analyzed through the following measurements: capillary pressure, evaporation, temperature evolution, crack evolution and settlement. The tests for studying the cracking and deformation were made on two different configurations (i.e., restrained prisms with reduced cross-section and restrained panel), in a wind tunnel, with controlled wind temperature and velocity. The conclusions obtained indicate the viability of the use of this type of admixture and the usefulness of the test methods.

PALABRAS CLAVE: aditivos reductores de retracción, retracción plástica, fisuración a tempranas edades.

KEYWORDS: shrinkage reducing admixture, plastic shrinkage, early age cracking.

1. INTRODUCCIÓN

La fisuración por retracción plástica en el hormigón suele venir asociada, por un lado, a unas condiciones ambientales extremas (altas temperaturas, bajas humedades y alta velocidad del viento) y, por otro lado,

1. INTRODUCTION

Cracking due to plastic shrinkage in concrete is typically associated with extreme environmental conditions (high temperature, low humidity and high wind speeds), as well as specific characteristics, such

a unas características específicas, tanto de la composición del hormigón, como de la disposición de la armadura.

Esta fisuración actúa sobre la superficie expuesta del hormigón recién colocado provocando un secado rápido antes de que este sea capaz de alcanzar valores de la resistencia que puedan absorber las tensiones internas que se generan. Estas fisuras se forman, en general, sin ningún patrón definido, si bien pueden reflejar retículas de armaduras, cuando éstas estén próximas a la superficie.

Las fisuras resultantes suelen ser de no gran importancia estructural aunque sí de significación en las relaciones contractuales establecidas durante la construcción, pudiendo representar una fuente de discordia entre los agentes que intervienen. Las características geométricas de las mismas son variables, así la longitud se sitúa entre centímetros a metros; la profundidad, entre milímetros a centímetros; mientras que la anchura se sitúa entre de 0,1 a 3 mm (1).

Aparte de su efecto estético y contractual, las fisuras permiten la entrada de difusión de humedad y oxígeno capaces de corroer la armadura y, a su vez, promover la degradación estructural, disminuyendo, así, la vida de la misma. Las estructuras con relaciones altas de área superficial/espesor (losas en pavimentos, tableros de puentes, canales de irrigación, túneles, elementos paneles prefabricados, etc.) son el tipo de estructura que resulta más susceptible a sufrir este tipo de fisuración.

En aras a reducir estas fisuras se puede actuar tanto internamente en el material (aumentando la respuesta del material) como en las condiciones externas (disminuyendo las sollicitaciones). Estas últimas suelen plantearse mediante agua, líquidos de curado o sistemas alternativos, si bien la dinámica de la ejecución de la obra, hacen que esta vía no sea la idónea, ya que la aplicación del mismo incidiría en la ejecución de otros tajos.

Así pues, la solución usual es incidir sobre el material, para lo que es frecuente utilizar agentes reductores de retracción o bien fibras plásticas de bajo módulo de deformación (2-5). Hay que recordar, que este problema aumenta con los hormigones de alta resistencia ya que son aún más propensos a este tipo de fisuras que los hormigones resistencia normal (con contenidos moderados de cemento, etc.). La microestructura que resulta de estos primeros es más compacta, consiguiendo mayores presiones de poro o capilares, los cuales generan más contracción.

as the composition of the concrete or the arrangement of the reinforcement.

Such cracking occurs on the exposed surface of recently-poured concrete, causing it to dry quickly and before it is strong enough to absorb the internal stresses that are generated. These cracks typically form without any defined pattern, although they can form according to the meshing of reinforcement when it is close to the surface.

Though the resulting cracks are typically of little structural importance, they are of significance to the contractual relationships established during the construction and capable of causing discord between the two parties involved. The geometric characteristics of these cracks vary: they can be centimetres or even metres long, their depth ranges from millimetres to centimetres and their width is typically between 0.1 and 3 mm (1).

Apart from their aesthetic and contractual importance, cracks allow both humidity and oxygen to permeate the concrete, which can corrode the reinforcement and simultaneously promote the degradation of structure, thus cutting short the life of the structure. Structures with high surface area/thickness ratios (e.g., slabs in pavement, bridge decks, irrigation canals, tunnels and prefabricated panel elements, etc.) are the types of structures that are most susceptible to this type of cracking.

In order to reduce these cracks, one can either act on the material internally (by increasing the response of the material) or externally (by decreasing the actions causing the cracking stress). Typical approaches include using water, liquid curing-compounds or alternative systems, or even modifying the construction process itself. However, this approach is not ideal, as its application influences other tasks.

Thus, the usual solution is to modify the material, which is frequently done by using shrinkage reducing admixtures (SRAs) or low modulus polymeric fibres (2-5). One must recall that this problem is more pronounced in high-strength concretes, as they have a greater tendency towards this type of cracking than normal-strength concretes (with moderate cement contents, etc.). The resulting microstructure is more compact, which causes higher capillary or pore pressure that in turn generates more shrinkage.

Por otro lado, la cuantificación experimental de la potencial fisuración por retracción plástica no es un tema sencillo, por lo que de los diversos métodos que existen no tienen una aceptación universal. Los ensayos de laboratorio utilizan, con frecuencia, por razones obvias, probetas de pequeño tamaño (6), aunque en otras ocasiones se han realizado de mayor tamaño (7). En ellas se plantean restricciones según los ejes de las probetas o bien en la superficie inferior de las mismas. Para ello se han utilizado paneles restringidos, cuadrados o rectangulares (4-6), o losas cuadradas o circulares, con coacciones conseguidas mediante un tubo interior que de lugar a una fisuración radial (3, 8).

Los objetivos que se persiguen en el presente artículo son, por un lado, aportar dos métodos experimentales (prisma restringido con entalla y panel restringido sin entalla) para medir la evolución de la retracción por asentamiento plástico con el tiempo y, por otro lado, analizar la influencia de los aditivos reductores de retracción (SRA: shrinkage reducing admixture) en la retracción plástica. Una información más completa del tema puede verse en (9).

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Detalles experimentales

Prisma restringido El prisma restringido, tal como se muestra en la Figura 1 está conformado por un molde metálico de $600 \times 150 \times 150$ mm adaptado para formalizar las coacciones en los extremos mediante unos pequeños pernos de acero de 50 mm de longitud por 5 mm de diámetro, con unas anillas de anclaje, entre tuercas, de 9 mm diámetro. El fondo del molde está cubierto por una lamina de nylon de 8 mm de espesor, con objeto de reducir el rozamiento y adhesión entre el hormigón y el molde metálico. En la sección central de la probeta se estrangula la sección mediante una entalla de 50 mm de base y 106 mm de altura. Con el fin de medir los desplazamientos horizontales, se dispone de un transductor en puente tal como puede verse en la Figura 1. El mismo se fija al hormigón fresco mediante dos placas delgadas de aluminio de 100×10 mm. La distancia entre los extremos que constituyen la galga de medida es de 100 mm. Este sistema de medida es ligero y solo ejerce una presión de 0,25 kPa sobre la superficie de hormigón.

Panel restringido Para este ensayo, los paneles cuadrados se han utilizado con frecuencia. En los mismos se ha adoptado el propuesto por Yokoyama et al. (10), representado en la Figura 1.b. El mismo está formado por un molde metálico de dimensiones interiores $100 \times 800 \times 800$ mm. Como en el caso anterior, para reducir el rozamiento y adhesión entre el hormigón y el molde, se ha dispuesto de una lamina de

The experimental quantification of the cracking potential by plastic shrinkage is not a simple matter, and none of the various methods available today enjoys universal acceptance. For obvious reasons, laboratory tests frequently use small-sized test specimens (6), although there have been tests performed using larger elements (7). For these tests, restraints were placed along the axes or on the underside of the test pieces. These were manufactured from square or rectangular panels (4-6), or square or circular slabs constrained using an interior tube that gives rise to radial cracking (3, 8).

The objectives of this article are two-fold. Firstly, we aim to develop two experimental methods (a restrained prism with a reduced central cross-section and a restrained panel of uniform section) for measuring the evolution of shrinkage due to plastic settling over time. Secondly, we aim to analyse the influence of shrinkage reducing admixtures (SRAs) on plastic shrinkage. Further information can be found in (9).

EXPERIMENTAL PROCEDURE

2.1. Experimental details

Restrained prism *The restrained prism, as is shown in Figure 1, was cast in a $600 \times 150 \times 150$ mm metal mould adapted to provide direct constraint to the edges by using small steel bolts 50 mm in length by 5 mm in diameter with 9 mm nuts. The bottom of the mould was covered with an 8 mm thick nylon sheet in order to reduce friction and adhesion between the concrete and the mould. In the central section of the test piece the section is constrained by a wedge that is 50 mm along its base and 106 mm high. To measure horizontal displacement, a transducer was placed on the surface of the concrete above the wedge, as can be seen in Figure 1. This was fixed to the wet concrete using two slender, 100×10 mm aluminium plates, with a gage length of 100 mm. This measurement system is light and exerts a pressure of merely 0.25 kPa on the surface of the concrete.*

Restrained panel *The panel used here is an adaptation of proposal by Yokoyama et al. (10), represented in Figure 1.b, and consists of a specimen cast in a metal mould with interior dimensions of $100 \times 800 \times 800$ mm. As in the earlier case, a 3-mm-thick polymethylmethacrylate (PMMA) sheet was used to reduce friction and adhesion between the concrete and*

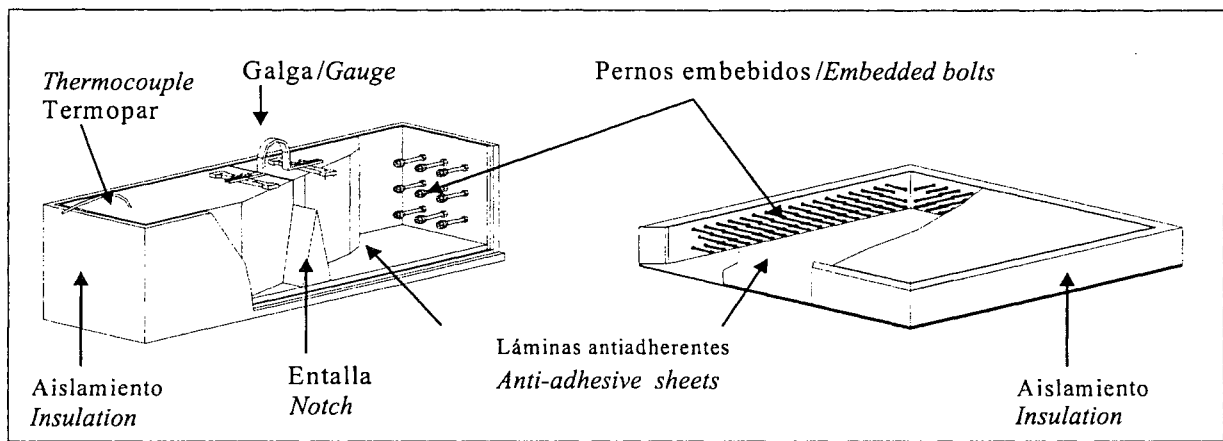


Figura 1.- a) Prisma restringido con estrangulamiento, b) Panel restringido.

Figure 1.- a) Restrained prism with wedge, b) Restrained panel.

polimetilmetacrilato, de 3 mm de espesor. La restricción en los extremos se obtiene mediante 3 filas de pernos de 65 mm de longitud, los dispuestos en las filas superior e inferior y, de 85 mm de longitud, los dispuestos en las filas central. La cabeza de cada perno estaba formada por dos tuercas. En esta configuración era de esperar, como así sucedió, que las fisuras pudiesen tener una configuración en dos dimensiones.

Otras medidas y ensayos La evaporación del agua se determinó midiendo la pérdida de peso de los elementos, con una balanza de precisión de 0,01 g. La superficie de exposición de cada uno de los paneles era de 400 cm². Asimismo, se registró la temperatura interna del hormigón para lo que se disponía de un termopar embebido 36 mm en la masa de los elementos (ver Figura 1). Estos termopares estaban conectados a un sistema de adquisición de datos, midiendo cada minuto.

Configuración del ensayo La Figura 2 muestra la configuración global del ensayo de las probetas

the mould. The edges were restrained by using 3 rows of bolts, 65 mm long on the upper and lower rows, and 85 mm in the central row. The head of each bolt was made up of two nuts. As expected, this configuration caused multiple cracking.

Other measurements and tests The rate of evaporation of water was determined by measuring the drop in weight of a sample using a 0.01 g precision scale. The exposed surface area of each of the samples was 400 cm². The internal temperature of the concrete was measured using a thermocouple embedded at a depth of 36 mm in the prism (see Figure 1). These thermocouples were connected to a data-acquisition system that took readings every minute.

Configuration of the test Figure 2 shows the overall test configuration, as previously described, inside a

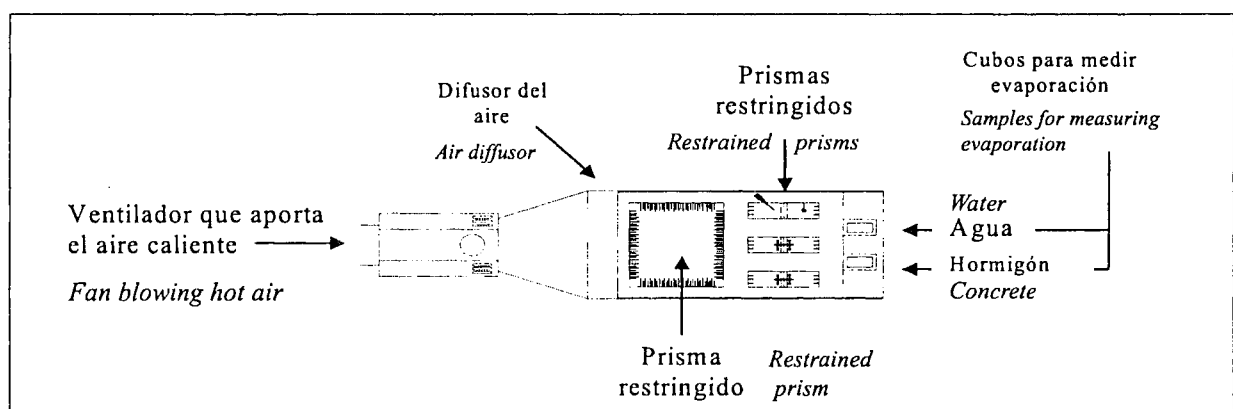


Figura 2.- Configuración en planta del túnel de ensayo.

Figure 2.- Configuration of the test tunnel.

anteriormente descritas dentro del túnel de viento. Éste está constituido por paredes de madera y cielo transparente de polimetilmetacrilato. Las dimensiones de la sección transversal eran 1.000×100 mm. En la parte inicial del túnel se situaba un ventilador que aportaba aire caliente a razón de 3.125 m³/h en un rango de temperatura de 20 a 40 °C, con una velocidad de salida de alrededor de 40 km/h. Ambas variables se midieron de continuo durante el ensayo. Asimismo, las medidas de desplazamientos se realizaron cada minuto con un sistema de adquisición de datos Hewlett-Packard 3.432, conectado a un PC. La humedad, al final del túnel, se midió con un higrómetro digital.

Los valores medios de los parámetros ambientales fueron 44,6 °C, 24,7% y 39,5 km/h para la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, con coeficientes de variación de 0,08, 0,11 y 0,05, respectivamente. Las probetas se mantuvieron en el túnel de ensayo durante al menos 240 minutos. Las paredes metálicas de los moldes de los prismas y paneles estaban aislados con porexpan.

2.2. Materiales utilizados

Para la serie de ensayos que se presentan en este trabajo, el hormigón de 35 MPa de resistencia característica a 28 días. Los componentes fueron: cemento tipo CEM I 52.5R, agua, dos tipos de arenas, una gravilla (5-12 mm) y una grava (12-20 mm), dos tipos de superplastificantes y tres tipos de aditivos reductores de la retracción. En la Tabla 1 se muestran las características de los áridos (todos ellos de machaqueo) y los aditivos.

En la Tabla 2 se presentan las dosificaciones, por m³, empleadas para cada uno de los hormigones, los cuales responden a la nomenclatura dada por la inicial del superplastificante, seguida de una O cuando no tiene aditivo reductor de la retracción y de la letra representativa de este cuando sí lo lleva. En la dosificación los áridos se consideraron saturados con superficie seca. Todos los hormigones responden a una relación a/c de 0,45.

La amasadora utilizada era de eje vertical de una capacidad de 250 litros. La secuencia de amasado fue: cemento, arenas y áridos gruesos amasados durante 1 minuto; con posterioridad se añadía el agua, manteniendo otro minuto de amasado y, a continuación, el aditivo superplastificante, amasando durante otro minuto, para finalmente, verte el aditivo reductor de la retracción y mantener tres minutos más el amasado. Los moldes se llenaron de dentro hacia fuera. La compactación de los mismos fue mediante vibración, fratasándose con posterioridad. Inmediatamente después, los elementos se dispusieron en el túnel de

wind tunnel. The wind tunnel was made up of wooden walls and a transparent polymethylmethacrylate top. Its cross-section dimensions were 1000×100 mm. A fan was situated at one end of the tunnel to blow hot air at approximately 40 km/h. Both temperature and wind velocity were monitored continuously throughout the test. The humidity at the end of the tunnel was measured with a digital hygrometer.

The average values of the environmental parameters were 44.6 °C, 24.7% and 39.5 km/h for the temperature, relative humidity and wind speed, with coefficients of variation of 0.08, 0.11 and 0.05, respectively. The specimens were kept in the test tunnel for at least 240 minutes. The metal walls of the moulds of the prisms and panels were insulated with expanded polystyrene.

2.2. Materials used

For the series of tests presented in this paper, the concrete had a characteristic strength of 35 MPa at 28 days. Its components were the following: type CEM I 52.5R cement, water, two types of sand, fine gravel (5-12 mm), gravel (12-20 mm), two types of superplasticisers and three types of shrinkage reducing admixtures. Table 1 details the characteristics of the aggregates (all of them were crushed limestone) and the admixtures.

Table 2 shows the mix used per m³ for each of the concretes, which are denoted as following: firstly, the notation of the superplasticiser, followed by an O if no shrinkage reducing admixture was added or by a letter indicating its notation if it had been. In the mix, the aggregates were considered to be in a saturated surface-dry condition. All of the concretes had a water-cement ratio (w/c) of 0.45.

The mixer used had a vertical axis and a 250-litre capacity. The mixing sequence was as follows: firstly, the cement and aggregates were mixed together for one minute after which the water was added, and mixed for another minute. Next, the superplasticiser was added and the mixture mixed again for one minute. Finally, the shrinkage reducing admixture was poured in and the mixed for another three minutes. The specimens were cast from the centre outwards and compacted first using surface vibration and the surfaces were finished later with a trowel. Immediately afterwards, the elements were placed in the test tunnel, and testing was begun. The

TABLA 1/TABLE 1
Características de los materiales componentes
Characteristics of the component materials

Material <i>Material</i>	Peso específico (t/m ³) <i>Specific weight (t/m³)</i>	Coefficiente de absorción (en %) <i>Absorption coefficient (in %)</i>	Módulo de finura <i>Fineness modulus</i>	% finos pasan tamiz 200 <i>% grains passing through 200 sieve</i>
Arena/Sand (0-2 mm)	2,6	4,4	2,9	0,2
Arena/Sand (0-2 mm)	2,7	2,9	3,3	0,5
Gravilla/Gravel (5-12 mm)	2,7	0,7	--	0,2
Grava/Gravel (12-20 mm)	2,5	0,6	--	0,0
Aditivos/Admixtures	Identificación <i>Identification</i>	Componente <i>Component</i>	Densidad <i>Density gt/cm³</i>	Material activo <i>Active material %</i>
Superplastificante <i>Superplasticiser</i>	D	Basado en melaminas <i>Melamine-based</i>	1,2	44,4
	G	Basado en policarboxilatos <i>Polycarboxylate-based</i>	1,1	21,6
Aditivos reductores de la retracción <i>Shrinkage reducing admixtures</i>	E	Basado en propylen glycol <i>Polypropylene glycol-based</i>	0,9	100,0
	S	Basado en propylen glycol <i>Polypropylene glycol-based</i>	0,9	76,0
	R	Basado en ceras <i>Wax-based</i>	0,9	39,8

TABLA 2/TABLE 2
Dosificación de los hormigones
Concrete mixes

Hormigón <i>Concrete</i>	Cemento <i>Cement kg</i>	Agua <i>Water l</i>	Superplastificante <i>Superplasticiser l</i>	Arena <i>Sand 0-2 mm kg</i>	Arena <i>Sand 0-5 mm kg</i>	Gravilla <i>Gravel 5-12 mm kg</i>	Grava <i>Gravel 12-20 mm kg</i>	Aditivo reductor <i>Shrinkage reducing admixture l</i>
G-O	325	182,6	2,1	250	740	200	725	--
D-O		182,2	3,2					--
G-E		178,4	1,9					5,4
G-R		179,6	2,1					5,6
G-S		182,6	1,9					7,5

ensayo iniciándose los mismos. El tiempo transcurrido desde el principio no superaba los 50 minutos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Características mecánicas y de trabajabilidad de los hormigones

Para la caracterización de los hormigones empleados, se realizaron diferentes ensayos, tanto en masa fresca como sobre hormigón endurecido. Estos ensayos

time elapsed from the beginning of the process was no more than 50 minutes.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Mechanical and workability characteristics of concretes

In order to characterise these concretes, various tests were performed both before and after setting. The tests used were that of the slump with the Abrams cone,

fueron: cono de Abrams, densidad, tiempo de fraguado y resistencia a compresión. Los resultados obtenidos se sitúan en el rango esperado tanto en lo que hace referencia al cono (valores entre 180 y 225 mm) como de la densidad (entre 2.380 y 2.400 kg/m³). Los tiempos de fraguado mostraban un retardo de los hormigones G-O, G-E, G-S (del entorno del doble de tiempo) con respecto a los obtenidos para los hormigones D-O y G-R. La resistencia a compresión se situó en el entorno de los 43 MPa, con coeficientes de variación, en cada serie, menores al 5% (9).

3.2. Velocidad de evaporación

En la Figura 3 se presentan los resultados de la evaporación acumulada por m². En la misma puede verse que la velocidad de evaporación decrece con el tiempo, buscando una asíntota al final del ensayo. Durante la primera hora la velocidad de evaporación del agua es 1,4 kg/m², valor este superior al especificado por la norma ACI 305R-99 (11), de 1 kg/m²/h para evitar la aparición de fisuras por retracción plástica.

En la citada figura puede observarse, asimismo, que el hormigón patrón con superplastificante en base melamina (CD-O) conduce a un elevado porcentaje de evaporación durante el ensayo, mientras que en el otro hormigón de referencia realizado con un aditivo en base a policarboxilatos (CG-O), la evaporación es menor. Por su parte, los hormigones realizados con los 3 aditivos reductores de la retracción, conducen a resultados similares, sí bien algo menores en el caso del realizado en base a ceras. (CG-R). Ello puede responder a que estos aditivos, decrecen la tensión superficial del agua de

density and compressive strength. The results fell within the expected range for the slump (showing values between 180 and 225 mm) and the density (between 2380 and 2400 kg/m³). The setting times of the cement showed a delay in the cases of G-O, G-E and G-S (in this case as much as double the setting time of D-O and G-R). The compression strength of the concretes was approximately 43 MPa, with coefficients of variation for each series under 5% (9).

3.2. Evaporation rate

Figure 3 shows the results as the accumulated evaporation per m². One can also see here that the evaporation rate decreases over time, reaching an asymptote at the end of the test. During the first hour the evaporation rate of water was 1.4 kg m², which is higher than that specified by the ACI 305R-99 guidelines (11) of 1 kg/m²/h to prevent the appearance of cracking due to plastic shrinkage.

This figure shows that reference concrete with a melamine-based superplasticiser (CD-O) exhibits a high rate of evaporation during the test, while in the other reference concrete, which had a polycarboxylate-based additive (CG-O), the evaporation is lower. Concretes cast with the three shrinkage reducing admixtures led to similar, or even somewhat lower, evaporation rates as was the case with the wax-based admixture (CG-R). This could be because these admixtures decrease the surface tension of the water of the mixture (12), which in turn could lead to a decrease

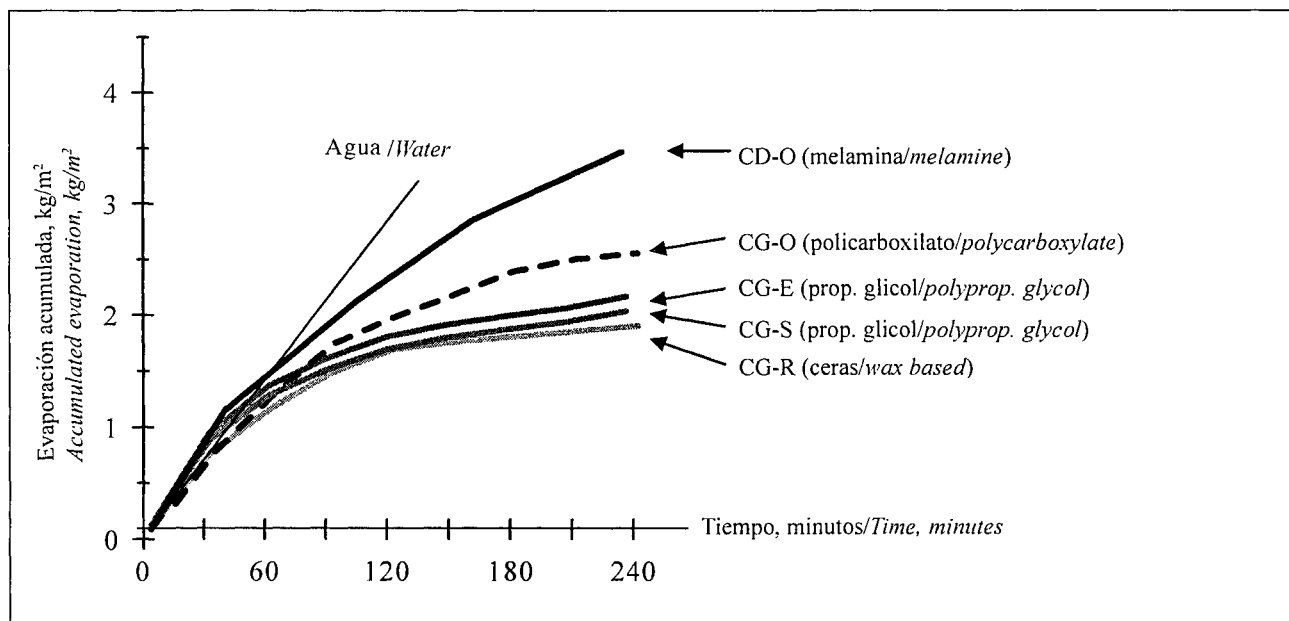


Figura 3.- Evaporación acumulada en función del tiempo.

Figure 3.- Accumulated evaporation over time.

amasado (12), lo cual podría conducir a menores fuerzas capilares y, consecuentemente, a una velocidad más lenta de transporte de agua hacia la superficie, por lo que los resultados al final del ensayo, son algo menores.

3.3. Resultados de los prismas restringidos

Los resultados de los desplazamientos horizontales en estos prismas se muestran en la Figura 4. cada una de ellas es la media de los 3 prismas utilizados en cada ensayo. En ella puede apreciarse que dentro de los hormigones patrones el realizado con superplastificante en base melamina (CD-O), conduce al final del ensayo a unas deformaciones significativamente mayores al otro hormigón patrón (CG-O). Los resultados de este último se sitúan dentro del rango de los hormigones en los que se emplearon aditivos reductores de retracción (CG-S) (CG-E) (CG-R).

Por otro lado, el comportamiento de los hormigones con aditivos reductores de la retracción muestran una ligera expansión (más acentuada en el caso del CG-R) en los primeros minutos del ensayo (inferior a 30 minutos). Las primeras fisuras aparecen entre los 70 y 90 minutos desde el inicio del ensayo, lo que suele tener una buena correlación con el cambio de pendiente de la velocidad de evaporación presentada en la Figura 3. Asimismo, la variación máxima de deformaciones hasta ese momento se sitúa en los 100 mm/m. Las variaciones de desplazamientos desde la fisuración hasta el final del ensayo son menores excepto en el caso del hormigón patrón (CD-O). Los

in capillary forces, and consequently to slower diffusion of water towards the surface.

3.3. Results of the restrained prisms

The resulting horizontal displacements in these prisms are shown in Figure 4. Each figure is the average of the three prisms utilised in each test. The figure shows that out of the reference concretes, the one cast with a melamine-based superplasticiser (CD-O) caused significantly larger deformations by the end of the test than the other reference concrete (CG-O). The results for the latter fell within the same range of results as the concretes with shrinkage reducing admixtures (CG-S, CG-E and CG-R).

The concretes with shrinkage reducing admixtures showed a slight expansion (more accentuated in the case of CG-R) in the first minutes of the test (during the first 30 minutes). The first cracks appear between 70 and 90 minutes after the beginning of the test, and seem to show a good correlation with the change in slope of the evaporation rate shown in Figure 3. The maximum variation in deformation up until that moment is approximately 100 mm/m. The variations in displacement from cracking up to the end of the test are lower except for in the case of the reference concrete (CD-O). Crack widths at the end of the test

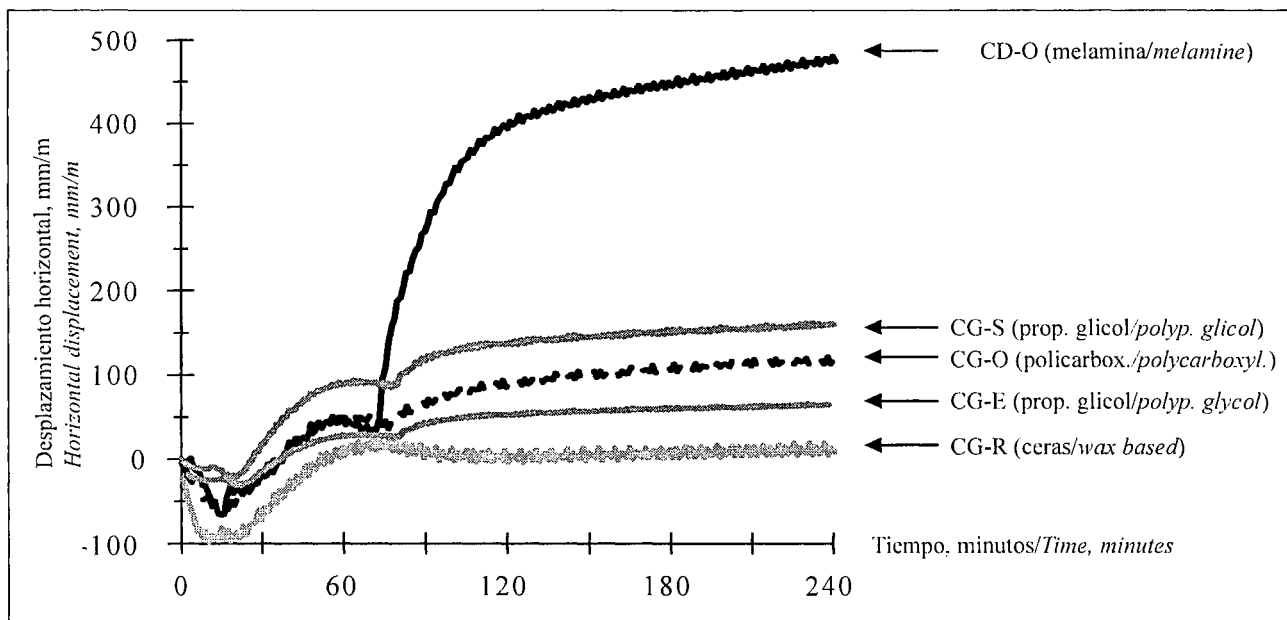


Figura 4.- Desplazamientos horizontales en función del tiempo en los prismas restringidos..

Figure 4.- Horizontal displacements over time in the restrained prisms.

anchos de fisuras al final del ensayo se situaban por debajo de 0,08 mm en todas las familias de hormigones ensayadas, excepto el CD-O cuyo ancho de fisura era de 0,44 mm.

3.4. Resultados de los paneles restringidos

De los hormigones presentados en este artículo sólo el panel correspondiente al CD-O presentó una fisuración enramada como se muestra en la Figura 5, con anchos medios de fisuras de 0,66 mm. Los resultados reflejan, por un lado, la bondad de los aditivos reductores de la retracción en la función de evitar la fisuración por retracción plástica, confirmando los resultados mostrados anteriormente y, por otro lado, la bondad del ensayo propuesto de prisma restringido para simular las condiciones reales.

3.5. Otros resultados

Los incrementos de temperatura del hormigón, medidos en el interior de los prismas, reflejan un comportamiento similar en todos los hormigones, produciéndose un incremento máximo de la temperatura de 20 °C en el CG-S y un valor mínimo de 14 °C en el CD-O. Algo similar se puede decir de los resultados correspondientes a la presión capilar medida en los prismas, la cual decrece con el tiempo, hasta la aparición de la fisura, para recuperarse y mantenerse constante durante el resto del ensayo (9). En este ensayo, nuevamente el CD-O muestra un comportamiento diferenciado a los demás.

Otra variable medida fueron los desplazamientos verticales, los cuales mantenían una pendiente decreciente constante, para cambiar la misma de forma significativa y pasar a ser ligeramente creciente hasta el final del ensayo. El cambio de pendiente se sitúa en el entorno de tiempo próximo a la aparición de la primera fisura en el ensayo de prisma restringido. Ello puede reflejar una primera etapa de evaporación de agua libre superficial para, a medida que se desarrolla el ensayo,

were less than 0.08 mm in all of the families of concrete tested, except for in CD-O, whose crack width was 0.44 mm.

3.4. Results of the restrained panels

Of the concretes presented in this paper, only the panel corresponding to CD-O showed crack branching, as can be seen in Figure 5, with an average crack width of 0.66 mm. These results reflect both the utility of shrinkage reducing admixtures in preventing cracking due to plastic shrinkage -confirming the results shown above- and the utility of the proposed restrained prism test for simulating real conditions.

3.5. Other results

The increases in temperature of the concrete, measured inside the prisms, reflect a similar behaviour in all the prisms, producing a maximum temperature increase of 20 °C in CG-S and a minimum value of 14 °C in CD-O. Similarly, it can be stated that the capillary pressure measured in the prisms decreased over time until the appearance of cracking, later recovering and remaining constant for the remainder of the test (9). In this test, CD-O again showed a different behaviour from the rest.

Another variable measured was vertical displacement, which exhibited a constantly decreasing slope yet underwent a significant change towards the end and began to increase slightly up until the end of the test. The change in the slope occurred soon after the appearance of the first crack in the restrained prism test. This could reflect the primary stages of free surface water evaporation, followed by the increase in the stiffness of the concrete, which leads to cracking.

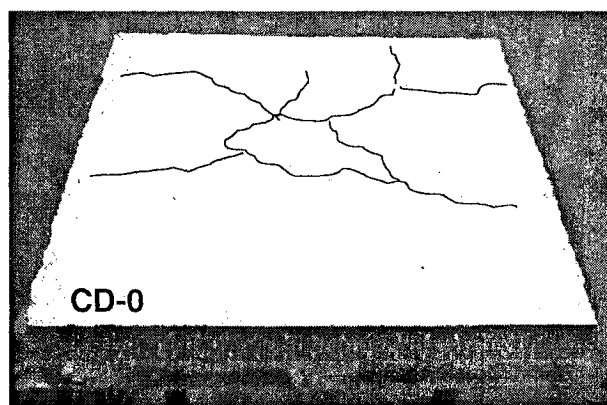


Figura 5.- Fisuración en panel restringido CD-O
Figure 5.- Cracking in restrained panel CD-O

cambia la rigidez del hormigón y de lugar a la aparición de la fisuración. Por otro lado, ello hace que los desplazamientos verticales tiendan a estabilizarse, manteniéndose constantes o ligeramente crecientes. Ese cambio de tendencia es consecuencia directa del cambio de estado, pasando del comportamiento de un líquido a un sólido.

4. CONCLUSIONES

El ensayo de prisma restringido con entalla es un buen procedimiento para la caracterización de los efectos de la retracción plástica del hormigón. El comportamiento tipo de los hormigones reflejan 4 fases en la respuesta: una primera fase durmiente seguida de un incremento de los desplazamientos hasta la iniciación de la fisura, una tercera fase donde la fisura crece, para llegar a una cuarta fase de estabilización. En este ensayo, para la caracterización del hormigón se pueden utilizar como parámetros principales el tiempo de inicio de la fisura y el ancho de la fisura al final del ensayo.

El ensayo de los paneles restringidos sirve de forma más cualitativa para la caracterización de los hormigones, si bien es interesante cara a reflejar las situaciones que se puedan producir en la realidad sobre elementos principalmente de gran superficie.

De los hormigones presentados en este artículo, cabe señalar el buen comportamiento de los aditivos reductores de la retracción empleados en su fabricación para reducir o evitar la retracción por asentamiento plástico. El hormigón patrón sin este tipo de aditivos (CD-O) daba lugar a unas deformaciones significativas, reflejadas en importante fisuras en los distintos ensayos, tanto en ancho como en número de las mismas.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Ravina, D. and Shalon, R., 'Plastic shrinkage cracking', ACI J. (1968) 282-292.
- (2) Padron, I. and Zollo, R. F., 'Effect of synthetic fibers on volume stability and cracking of portland cement and mortar', ACI Mat. J. 87 (4) (1990) 327-332.
- (3) Nanni, A., Ludwig, D.A. and McGills, M.T., 'Plastic shrinkage cracking of restrained fiber-reinforced concrete', Transp. Res. Rec. (1382) (1991) 69-72.
- (4) Balaguru, P., 'Contribution of fibers to crack reduction of cement composites during the initial and final setting period', ACI Mat. J. 91 (3) (1994) 280-288.
- (5) Berke, N.S. and Pallaire, M.P., 'The effect of low addition rated of polypropylene fibers on plastic shrinkage cracking and mechanical properties of concrete', ACI SP-142, ACI, Ed. J.I. Daniel and S.P. Shah (1994) 19-42.
- (6) Soroushian, P. and Ravanbakhsh, S., 'Control of plastic shrinkage cracking with specialty cellulose fibers', ACI Mat. J. 95 (4) (1998) 429-435.
- (7) San Juan, M.A., and Moragues, A., 'Model for predicting plastic shrinkage of polypropylene reinforced mortars', J. Mat. Sci. (29) (1994) 2821-2825.
- (8) Vandewalle, L. «Influence of polypropylene fibre reinforcement on the restrained shrinkage and cracking of concrete», Fourth CANMET/ACI Intl. Conf. on Durability of Concrete, Sydney, Australia (1997).
- (9) Mora, J. "Study of restrained shrinkage cracking in conventional and high performance concrete" Tesis doctoral E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. U.P.C. (2002)
- (10) Yokoyama, K., Hiraishi, S., Kasai, Y. and Kishitani, K., 'Experimental study on shrinkage and cracking of flowing concrete at early ages', JCA Proc. of Cem. & Concr. 50 (1996) 588-593.
- (11) ACI 305R-96. "Hot weather concreting", Man. of Concr. Pract. Part 2, ACI. (1996).
- (12) Nmai, Ch. K., Tomita, R., Hondo, F. and Buffenbarger, J., 'Shrinkage-reducing admixtures', Concr. Intl. 20 (4) (1998).

* * *

though the vertical displacement is constant or increases slightly. This change in tendency is a direct consequence of the change in state, passing from the characteristic behaviour of a liquid to that of a solid.

4. CONCLUSIONS

The restrained prism test with a wedge is a good procedure for characterising the effects of plastic shrinkage in concrete. The typical behaviour of concretes reflect four phases in the response: a primary, dormant phase followed by a phase of increasing displacements until the initiation of cracking, a third phase in which the crack grows, and finally a fourth stage of stabilisation. In this test, the crack initiation time and the ultimate crack width can be used as the main parameters for characterising the concrete.

Testing the restrained panels serves as a more qualitative way of characterising concretes, and is of interest in simulating situations that could come to affect elements with large surfaces.

Of the concretes presented in this article, the positive effect of the shrinkage reducing admixtures was evident, either reducing or preventing shrinkage that would have been caused by plastic settling. The reference concrete without any such admixture (CD-O) exhibits significantly higher cracking, in terms of number of cracks and crack widths, which results in larger cracked areas on the surface.