

Retracción por secado en morteros de cemento con filler calcáreo y escoria granulada de alto horno

Drying shrinkage of mortars with limestone filler and blast-furnace slag

M. F. CARRASCO, V. L. BONAVETTI, E. F. IRASSAR

Departamento de Ingeniería Civil-Facultad de Ingeniería-Universidad Nacional del Centro

Fecha de recepción: 12-XII-02
Fecha de aceptación: 20-III-03

ARGENTINA

RESUMEN

Durante los años 90 el uso de cementos fabricados con clínker portland y dos adiciones suplementarias (cementos ternarios o compuestos) se ha incrementado en forma considerable. En la práctica, es cada vez más común el empleo de estos cementos conteniendo combinaciones de ceniza volante y humo de sílice, escoria y humo de sílice o escoria y filler calcáreo. En la actualidad existen numerosos estudios sobre la influencia de los cementos compuestos en las características en estado fresco y las propiedades mecánicas de morteros y hormigones, pero las deformaciones que estos materiales sufren debido a la retracción por secado no son tan conocidas. El análisis de la retracción por secado resulta un tema relevante, pues este parámetro determina la posibilidad de fisuración, y consecuentemente el deterioro de las propiedades mecánicas y durables de las estructuras.

En el presente trabajo se estudia la influencia que tiene la inclusión de contenidos variables de filler calcáreo y/o escoria granulada de alto horno al cemento portland sobre la retracción por secado de los morteros elaborados con ellos. Adicionalmente se ha analizado la resistencia a flexión y el contenido de agua no evaporable. Los resultados obtenidos indican que la inclusión en forma conjunta o separada de estas adiciones incrementa la retracción inicial del mortero. Aun así, los morteros con filler calcáreo presentan una menor tendencia a la fisuración que los cementos con escoria o filler y escoria.

SUMMARY

During the 1990's the use of cements made with portland clinker and two mineral admixtures, called ternary or blended cements, has grown considerably. Nowadays, cements containing several combinations of fly ash and silica fume, blast-furnace slag and silica fume or blast-furnace slag and limestone filler are commonly used. There are numerous works on the influence of blended cements on the fresh state and mechanical properties of mortar and concrete, but their deformations due to drying shrinkage are not so well described. Analysis of drying shrinkage is relevant because this property influences the possibility of cracking occurrence and, hence, the deterioration of mechanical and durable properties of concrete structures.

This paper evaluates the influence on the drying shrinkage of mortars of variable contents of limestone filler and/or blast-furnace slag in portland cement. Additionally, flexion strength and non evaporable water content were evaluated. Test results show that the inclusion of these mineral admixtures, joint or separately, increments drying shrinkage of mortars at early ages. Despite this fact, mortars made with limestone filler cement are less susceptible to cracking than mortars made with cements incorporating blast-furnace slag or both admixtures.

PALABRAS CLAVE: cemento portland sin adición, filler calcáreo, escoria granulada de alto horno, retracción por secado, retracción restringida.

KEYWORDS: portland cement, limestone filler, blast-furnace slag, drying shrinkage, restrained shrinkage.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón es un material que presenta inestabilidad volumétrica cuando cambia la humedad relativa del medio ambiente. Estas variaciones dimensionales, que afectan a la estructura en su conjunto, dependen en forma directa de las deformaciones originadas como resultado del movimiento del agua en la pasta de cemento endurecida.

Cuando el hormigón se expone a un ambiente con una humedad relativa inferior al 100%, en primera instancia se pierde el agua libre contenida en los poros capilares grandes. Este proceso induce un gradiente de humedad en la pasta de modo que, con el tiempo las moléculas de agua adsorbida en la superficie del silicato de calcio hidratado (CSH) se transfieren hacia los poros capilares vacíos y luego al exterior de la masa del hormigón y, como consecuencia, la pasta de cemento se contrae. Sin embargo, la reducción de volumen que experimenta la pasta no es equivalente al volumen de agua perdida, pues existen restricciones que se oponen a la deformación de la estructura del CSH y la pérdida del agua libre no causa una retracción volumétrica significativa de la pasta (1), mientras que con la pérdida del agua adsorbida en el CSH se produce la mayor retracción por secado (2).

En las estructuras, debido a que las deformaciones provocadas por la retracción se producen en presencia de restricciones (externas e internas), se inducen tensiones en el hormigón, que cuando exceden la resistencia a tracción del material provocan su fisuración. La presencia de fisuras atenta contra la resistencia y la durabilidad del hormigón facilitando su deterioro físico y químico.

La retracción por secado del hormigón se encuentra directamente relacionada con la pérdida de agua, en consecuencia todos los factores que afectan a la velocidad de secado, tales como la temperatura, la humedad relativa, el viento y la geometría del elemento estructural afectan a esta propiedad.

Adicionalmente, factores inherentes al material también modifican la magnitud y velocidad de la retracción. Esta propiedad se incrementa con el aumento en el contenido de pasta en el hormigón, el incremento de la relación agua/cemento y el mayor grado de hidratación del cemento. Los cambios en la finura y composición del cemento, y la utilización de aditivos también pueden producir modificaciones en la retracción por secado del hormigón (2).

La incorporación de adiciones minerales finamente divididas modifica el proceso de hidratación del cemento y más específicamente el volumen de CSH y la porosidad de la pasta de cemento endurecida. Las adiciones en general, aceleran el proceso de hidratación del clinker portland debido al efecto filler produciendo

1. INTRODUCTION

Concrete presents volumetric instability when the relative humidity of the environment changes. These dimensional variations, affecting the structure as a whole, depend directly on the deformations originated in the hardened cement paste as a result of water movement.

When concrete is exposed to an environment with relative humidity below 100%, first it loses free water contained in large capillary pores. This process induces humidity gradients in the cement paste, so the water molecules adsorbed on calcium silicate hydrate (CSH) are transferred to empty capillary pores, then outside the concrete and hence, cement paste shrinks. However, the reduction of volume in cement paste is not equivalent to the volume of water loss, because there exist restrictions opposed to the deformation of CSH structure and the loss of free water does not cause a significant volumetric deformation in the paste (1), while the loss of adsorbed water on CSH produce the highest drying shrinkage (2).

In concrete structures, deformations caused by shrinkage develop in the presence of restraints (both internal and external) inducing stresses in concrete that, when exceed the tensile strength of this material, produce its cracking. The presence of cracks in concrete affects its strength and durability facilitating its degradation, both physical and chemical.

Drying shrinkage of concrete is directly related with loss of water and hence, factors affecting drying rate as temperature, relative humidity, wind and the geometry of structural members will also affect this property.

Additionally, some material characteristics affect the magnitude and rate of drying shrinkage. This property increases with cement paste content in concrete, water to cement ratio and the progress of hydration of cement. Changes in fineness and composition of cement and the use of chemical admixtures can also lead to modifications in the drying shrinkage of concrete (2).

The incorporation of finely divided mineral additions modifies the hydration process of cement and, specifically, the volume of CSH and the porosity of the hardened paste. Mineral additions accelerate the hydration of portland clinker due to a filler effect producing a large volume

mayor volumen de CSH en las primeras edades (3-4). Mientras que, las adiciones hidráulicamente activas (cementantes y/o puzolánicas) aumentan el volumen de CSH a edades tardías (5). En consecuencia, la retracción por secado de un cemento con adiciones debería ser función de la resultante del volumen de CSH que genera cada uno de los componentes.

Por último, si bien los cementos compuestos se encuentran normalizados en diferentes países (EN 197, NMX C-414-0; EB 2138, IRAM 50000) y se conocen los valores de reemplazo necesarios para obtener un comportamiento mecánico óptimo, no están establecidos los contenidos que aseguren, simultáneamente, una menor sensibilidad a la fisuración. Por lo tanto, la evaluación de la influencia que ejercen estos cementos sobre el desarrollo de las deformaciones de retracción por secado resulta relevante.

En este trabajo se estudia el efecto de la incorporación al cemento de escoria granulada de alto horno (0 a 22%) y/o filler calcáreo (0 a 22%) sobre la retracción por secado de morteros. Complementariamente, se evalúan la resistencia a flexión y la cantidad de agua no evaporable con el fin de analizar las modificaciones que producen estas adiciones sobre la resistencia y el proceso de hidratación.

2. PARTE EXPERIMENTAL

Cemento Para la realización de los ensayos se utilizó un cemento portland sin adiciones (CPN, IRAM 50000), con una composición mineralógica de 59% de C_3S , 18% de C_2S , 5% de C_3A y 10% de C_4AF . Su categoría resistente era CP40 ($f'c > 40$ MPa a 28 días ensayados sobre prismas de morteros ISO-RILEM) y su finura Blaine era de 297 m^2/kg . Las características de su distribución granulométrica eran: un parámetro posición (x') de 26,93 μm y un parámetro de homogeneidad (n) de 0,92.

Adiciones Como adiciones se utilizaron filler calcáreo y escoria granulada de alto horno. El filler calcáreo (F), estaba constituido por un 87% de $CaCO_3$ bajo la forma de calcita y su principal impureza fue cuarzo, el cual fue molido a una finura Blaine de 522 m^2/kg (x' : 28,56, n : 0,57). La escoria granulada de alto horno (E) presentó un módulo químico $((C+M+A)/S)$ de 1,73 y un índice de actividad de 78 y 111% a 7 y 28 días respectivamente, que permitió clasificarla como de alta actividad (EN 196). Su finura Blaine era 438 m^2/kg (x' : 17,26, n : 1,05).

Cementos compuestos estudiados Los cementos con adiciones (binarios y ternarios) se obtuvieron por reemplazos variables de cemento CPN por filler calcáreo y escoria granulada de alto horno en peso. Para seleccionar los reemplazos a estudiar y con el fin de evaluar al cemento con adiciones como un sistema de

of CSH at early ages (3-4). Active mineral additions (cementing and/or pozzolanic) increase the CSH volume at later ages (5). Consequently, drying shrinkage of blended cement would depend on the resulting volume of CSH as generated from each one of its components.

Blended cements are standardized in different countries, (i.e. EN 197, NMX C-414-0, EB 2138, IRAM 50000) and the replacement levels needed to achieve the optimum mechanical behavior are well known, but mineral additions contents ensuring simultaneously the minimum sensibility to shrinkage restrained cracking are not established yet. So, study of the influence of admixtures on the development of drying shrinkage is relevant.

In the present work, the effect of addition of blast-furnace slag (0 a 22%) and/or limestone filler (0 a 22%) on drying shrinkage of mortars is evaluated. Complementary, flexural strength and non evaporable water content are evaluated in order to analyze the modifications on strength and hydration process produced by these mineral additions.

2. EXPERIMENTAL

Cement To perform tests a normal portland cement without mineral additions was used (CPN, IRAM 50000). Its mineralogical composition was 59% of C_3S , 18% of C_2S , 5% of C_3A and 10% of C_4AF . It was classified as CP40 ($f'c > 40$ MPa at 28 days determined on ISO-RILEM mortar prisms) and its Blaine fineness was 297 m^2/kg . Particle size distribution was characterized by the position parameter (x') of 26.93 μm and the homogeneity parameter (n) of 0.92.

Additions Supplementary materials used were limestone filler and blast-furnace slag. Limestone filler (F) contained 87% of $CaCO_3$ in calcite form and quartz as the main impurity and was ground to a Blaine fineness of 522 m^2/kg (x' : 28.56, n : 0.57). Blast-furnace slag (E) presented a chemical modulus $((C+M+A)/S)$ of 1.73 and an activity index of 78 and 111% at 7 and 28 days respectively, indicating a very active slag according with standard EN-196. Its Blaine fineness was 438 m^2/kg (x' : 17.26, n : 1.05).

Blended cements analyzed Blended cements (binary and ternary) were obtained for variable replacements (by weight) of portland cement (CPN) by limestone filler and blast-furnace slag. In order to choose the studied percentages and to evaluate the cement and additions as a system of interconnected variables, the

variables interrelacionadas, se adoptó un diseño de experimentos *central compuesto centrado* (6). Este sistema permitió definir cementos binarios y ternarios (Figura 1) evaluando la retracción por secado mediante el análisis de superficies de respuesta. La función obtenida por este método, fue rotada y trasladada a partir de los ejes primitivos x'' e y'' según los ejes ortogonales x e y de manera de definir la variación en el contenido de filler y escoria en forma independiente (7). Adicionalmente, se estudió el mortero elaborado con cemento CPN, el cual fue empleado como mortero patrón.

Proporciones de las mezclas Los morteros se prepararon manteniendo una relación agregado (arena silícea, IRAM 1633):material cementante de 2,75. La fluidez de los morteros se mantuvo en $110 \pm 5\%$ (IRAM 1570) y la relación agua/material cementante (a/mc) resultante se muestra en la Tabla 1.

Retracción por secado La retracción por secado de los morteros se midió en probetas prismáticas de 25x25x285 mm (IRAM 1651-II). El curado de las muestras se realizó 24 horas en los moldes y luego de desmoldadas, se sumergieron 6 días en agua saturada con cal a 20 ± 2 °C. Transcurrido este período, se estacionaron en cámara seca a 20 ± 2 °C y una humedad relativa de $50 \pm 5\%$. Las determinaciones se realizaron cada dos días hasta cumplir los 28 días de secado y, posteriormente, con una frecuencia semanal hasta alcanzar la estabilización de las lecturas.

Retracción restringida Para evaluar la susceptibilidad del mortero a la fisuración por efecto de la retracción restringida, se emplearon probetas anulares (8-12) cuyas dimensiones se muestran en la Figura 2. Los anillos fueron sometidos al mismo tipo de curado que las probetas elaboradas para la evaluación de la retracción por secado.

Sobre estas muestras se determinó el tiempo de la aparición de la fisura y el ancho de las mismas mediante un microscopio autoiluminado de 20 X equipado con una retícula que permitió efectuar mediciones con una precisión de 0,1 mm, las observaciones se realizaron con la misma frecuencia que para las determinaciones de retracción por secado.

Resistencia a flexión La resistencia de los morteros se determinó sobre probetas prismáticas de 25x25x70 mm, con una luz entre apoyos de 62.5 mm y carga centrada. Las mismas fueron sometidas al mismo procedimiento de curado que las probetas de retracción por secado. Las edades de ensayo fueron 0, 2, 4, 6, 10, 14, 21, 28, 35, 49, 77 y 161 días de secado.

Grado de hidratación La cantidad de agua no evaporable (w_p) a la edad de 7 días se determinó de acuerdo al procedimiento propuesto por Powers (13).

experimental plan consisted on a central composite design (6). This design allowed the definition of binary and ternary blended cements (Figure 1) and the evaluation of drying shrinkage by means of isoresponse curves. It was necessary to rotate and transfer the function obtained from the primitive axis x'' and y'' to represent isoresponse curves in accordance with a pair of orthogonal axis defining admixtures contents separately (x and y). Additionally, mortar made with portland cement (CPN) was evaluated and taken as a control sample.

Samples preparation Mortars were prepared maintaining sand (siliceous sand IRAM 1633) to cementitious material ratio of 2.75. Results of flow test were $110 \pm 5\%$ in all cases (IRAM 1570) and the water to cementitious material ratio (w/cm) resulting is shown in Table 1.

Drying shrinkage Drying shrinkage of mortars was determined in prismatic specimens of 25x25x285 mm (IRAM 1651-II). After casting, moulds were maintained in laboratory environment for 24 hours, then specimens were demoulded and immersed in lime saturated water at 20 ± 2 °C for 6 days. After this time, specimens were stored in a drying chamber with 20 ± 2 °C and $50 \pm 5\%$ relative humidity. Tests were performed every two days until 28 days of drying and then weekly until the stabilization of deformations.

Restrained shrinkage In order to evaluate sensibility of mortars to cracking caused by restrained shrinkage, ring-type specimens were used (8-12) and their dimensions are shown in Figure 2. Ring-type specimens were cured in the same way as drying shrinkage specimens.

In these specimens there were determined the time of appearance of cracks and their width using a special microscope of 20 X equipped with a scale to make measurements with a precision of 0.1 mm. The frequency of these determinations was the same as for drying shrinkage test.

Flexural strength Strength of mortars was determined on prismatic specimens of 25x25x70 mm, with a span length of 62.5 mm and centered load. Specimens were cured in the same way as drying shrinkage specimens. Test ages were 0, 2, 4, 6, 10, 14, 21, 28, 35, 49, 77 and 161 days of drying.

Degree of hydration The quantity of non evaporable water (w_p) at 7 days was determined according with the method proposed by Powers (13).

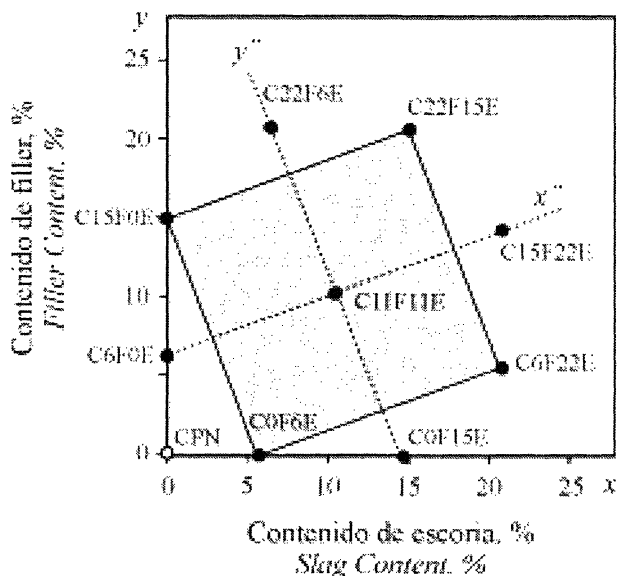


Figura 1.- Dominio de los cementos con adiciones estudiados.
Figure 1.- Domain of blended cements studied.

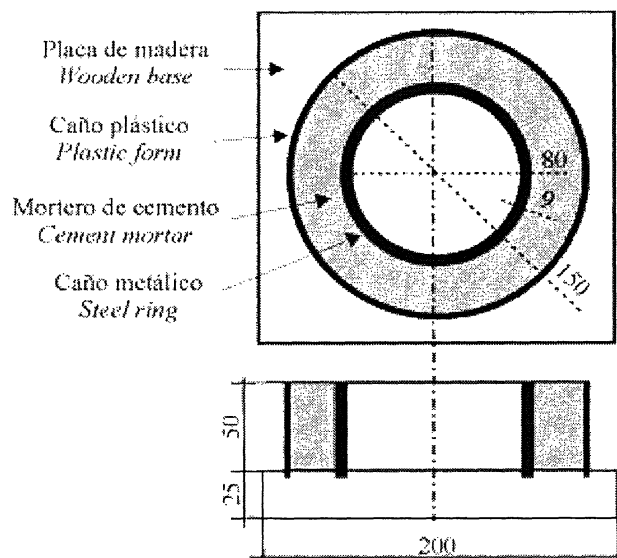


Figura 2.- Esquema de las probetas anulares empleadas (las dimensiones se muestran en mm).
Figure 2.- Configuration of ring-type specimens (dimensions indicated in mm).

TABLA 1/TABLE 1
Propiedades de los morteros estudiados
Properties of mortars studied

Mortero Mortar	Relación a/c w/c ratio	Inicio del secado/Drying time		Retracción a 217 días, $\mu\text{m/m}$ Shrinkage to 217 days, $\mu\text{m/m}$	Fisuración/Cracking	
		α , %	Relación a/c efectiva Effective w/c ratio		Edad, días Age, days	Ancho, mm Width, mm
CPN	0.45	63	0.45	954	63	0.2
C0F6E	0.45	72	0.48	950	63	0.2
C0F15E	0.45	80	0.53	957	43	0.3
C6F0E	0.45	70	0.48	943	---	---
C15F0E	0.45	72	0.53	921	---	---
C11F11E	0.46	88	0.59	1003	84	0.2
C6F22E	0.46	86	0.59	1003	26	0.3
C15F22E	0.47	83	0.75	1090	12	0.3
C22F15E	0.47	74	0.75	1011	---	---
C22F6E	0.46	77	0.59	871	---	---

El grado de hidratación (α) se calculó como $\alpha = w_w/0,193$, donde 0,193 es la cantidad de agua no evaporable que requiere el cemento empleado para lograr una hidratación total. Este valor se utilizó como estimador del progreso de la reacción de hidratación del cemento portland y para su cálculo se asumió que el filler calcáreo es hidráulicamente inactivo y que la escoria no ha comenzado a reaccionar a los 7 días de curado húmedo.

Degree of hydration (α) was calculated as $\alpha = w_w/0.193$, where 0.193 is the quantity of non evaporable water required by portland cement used to achieve complete hydration. This value was used as an estimator of hydration process of cement assuming that limestone filler is a non-active admixture and blast-furnace slag did not react at 7 days of water curing.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 3 muestra el desarrollo de la retracción por secado de los morteros elaborados con CPN, C15F0E, C0F15E, C22F6E, C6F22E y C22F15E. En la misma puede observarse que los morteros (binarios y ternarios) que contienen más de 15% de filler presentan una retracción final hasta 9% menores que el mortero patrón, en tanto que en los morteros con más de 15% de escoria la retracción resulta similar al mortero con CPN. Por su parte el mortero C22F15E registra una retracción final 6 % mayor que el patrón.

Las retracciones que se producen a las edades de 2, 28, 56 y 217 días de secado se analizaron por medio de las curvas de isorrespuesta que se muestran en la Figura 4. La selección de estas edades se debe a que, a 2 días, se producen las mayores retracciones en los morteros con los cementos adicionados, a 28 días se ha registrado entre el 50 y el 70% de la retracción final produciéndose un cambio en la velocidad del proceso, a 56 días una parte importante de la escoria incorporada ha reaccionado y, finalmente, a 217 días se produce la estabilización de la mayor parte de los valores de retracción registrados por los morteros. Los valores de retracción obtenidos a partir de la estimación del modelo anterior no difirieron en más del 5% con respecto a los resultados experimentales.

A 2 días (Figura 4a), el punto estacionario correspondiente a la máxima retracción está dado para reemplazos de 11% de filler y 10% de escoria. También puede observarse que, el comportamiento de los cementos binarios depende del tipo de adición incorporada, pues los cementos con 3 a 18% de escoria presentan una retracción similar (se encuentran dentro de la misma zona de isorrespuesta), en tanto que los contenidos de filler entre 6 y 17% presentan una retracción mayor que el resto de los cementos con filler. Por último, la mayoría de los morteros elaborados con los cementos binarios y ternarios estudiados registraron mayor retracción que el mortero patrón (191 $\mu\text{m}/\text{m}$).

A partir de los 2 días, la forma de las curvas de isorrespuesta cambia significativamente. A 28 días (Figura 4b), la máxima diferencia determinada entre la retracción registrada para el dominio de adiciones estudiado es de 26%. Una retracción menor a la registrada por el mortero patrón (708 $\mu\text{m}/\text{m}$) pueden obtenerse con hasta 22% de filler y 17% de escoria, y 15% de filler y 22% de escoria.

A 56 días (Figura 4c), las zonas correspondientes a retracciones menores a la obtenida por el mortero patrón (786 $\mu\text{m}/\text{m}$) se reducen. Adicionalmente a partir de esta edad y hacia los 217 días (Figura 4d) la forma de las curvas de isorrespuestas comienza a ser más dependiente del contenido de escoria que del reemplazo de filler en los cementos ternarios. Aun así, todos los

3. RESULTS AND DISCUSSION

Figure 3 shows the development of drying shrinkage of mortars made with CPN, C15F0E, C0F15E, C22F6E, C6F22E and C22F15E. It can be observed that mortars (binary and ternary) containing more than 15% of limestone filler present a final shrinkage up to 9% lower than that of the control, while for mortars containing more than 15% of blast-furnace slag shrinkage results similar to the corresponding value of control. For mortar C22F15E, final shrinkage results 6 % higher than that of the control.

Shrinkage produced at 2, 28, 56 and 217 days of drying were analyzed by means of isoresponse curves shown in Figure 4. These ages were selected because at 2 days the highest shrinkage were produced for mortars prepared using blended cements, at 28 days it is registered between 50 and 70% of final shrinkage and comes up a change in the process rate, at 56 days an important proportion of blast-furnace slag has already reacted and, finally at 217 days, almost all mortars reached the stabilization of shrinkage. Values obtained from estimations made using the above-described model and experimental results showed differences lower than 5%.

At 2 days (Figure 4a), stationary point corresponding to the highest shrinkage value is located at 11% of limestone filler and 10% of blast-furnace slag. It can be observed also, that the behavior of blended cements depends on the type of admixture present, because cement with 3 to 18% of blast-furnace slag shown similar shrinkage values (they are located in the same isoresponse zone), while limestone filler contents between 6 to 17% presents higher shrinkage than other limestone filler cements. Mortars prepared using the binary and ternary blended cements studied generally registered higher shrinkage than the corresponding to the control mortar (191 $\mu\text{m}/\text{m}$).

After 2 days, the contour of isoresponse curves changed significantly. At 28 days (Figure 4b), the maximum difference between shrinkage values in the domain studied is 26%. Lower shrinkage than that of the control mortar (708 $\mu\text{m}/\text{m}$) can be obtained with up to 22% of limestone filler and 17% of blast-furnace slag and up to 15% limestone filler and 22% of blast-furnace slag.

At 56 days (Figure 4c), zones corresponding to shrinkage values lower than that of the control (786 $\mu\text{m}/\text{m}$) are reduced. Additionally, since this age and up to 217 days (Figure 4d) the contour of isoresponse curves begins to be more dependent on the blast-furnace slag content than on limestone filler for ternary blended cements. Despite of this, binary

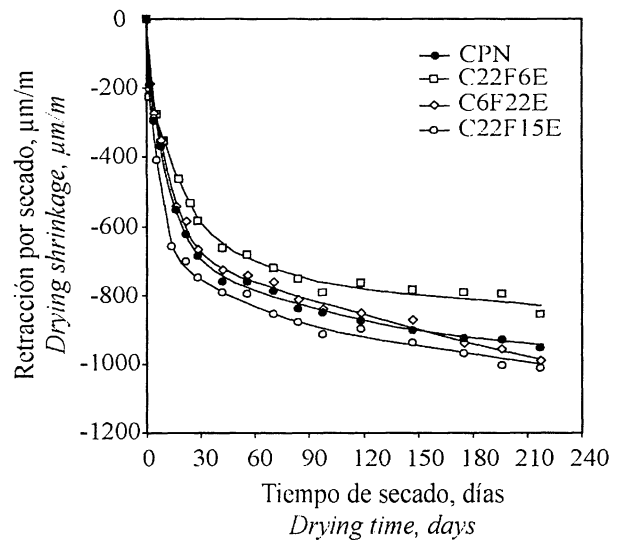
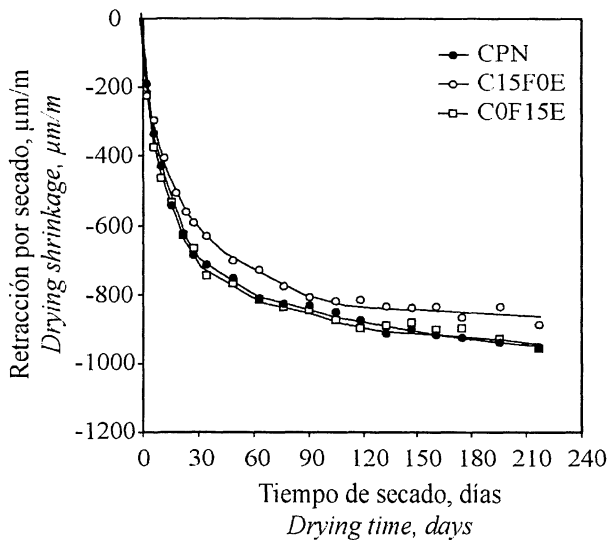


Figura 3.- Retracción por secado en función del tiempo. a) Cementos binarios y b) Cementos ternarios.
 Figure 3.- Drying shrinkage vs. drying time. a) Binary blended cements and b) Ternary blended cements.

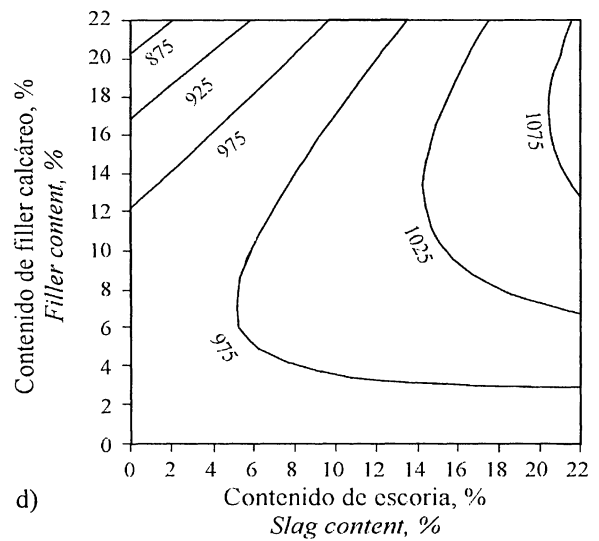
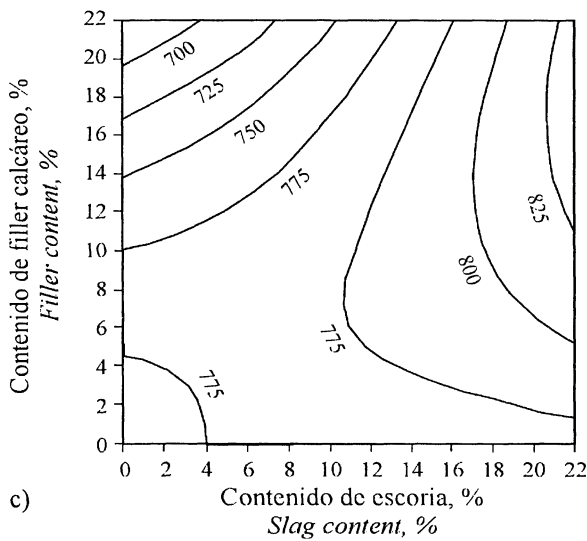
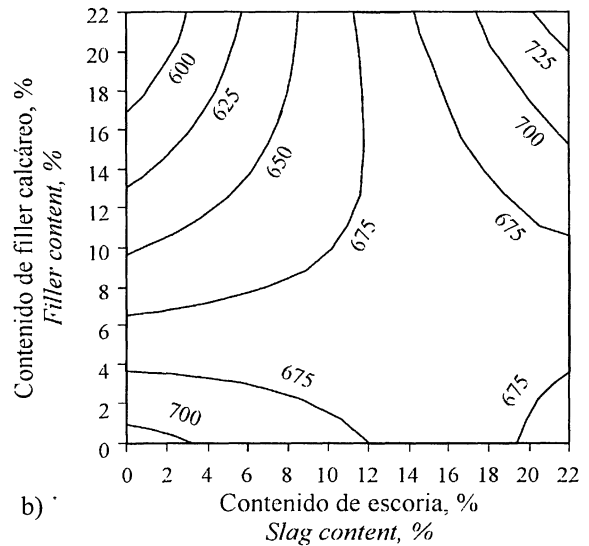
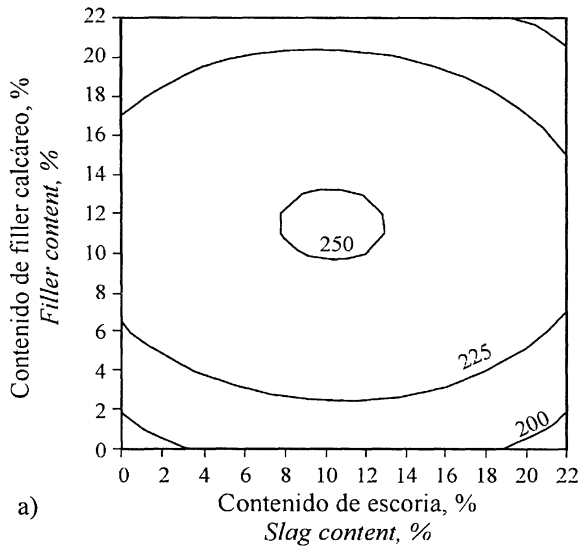


Figura 4.- Curvas de isorespuestas de la retracción por secado de los morteros analizados. a) 2 días. b) 28 días. c) 56 días y d) 217 días.
 Figure 4.- Isoresponse curves for drying shrinkage of mortars analyzed. a) 2 days. b) 28 days. c) 56 days and d) 217 days.

cementos binarios con escoria y los cementos con hasta 12% de filler calcáreo presentan una retracción similar a la del mortero patrón (952 $\mu\text{m}/\text{m}$).

El comportamiento registrado por los morteros frente a la retracción por secado puede ser explicado a partir de varios efectos que se ponen en juego cuando se emplean cementos con adiciones minerales. Por una parte, el aumento en la retracción inicial de los morteros con adiciones se debe al efecto filler, pues la incorporación al cemento de materiales finos provoca un incremento en la velocidad de reacción del clinker portland (3-4) que aumenta el grado de hidratación y produce un mayor volumen CSH en los morteros con filler y/o escoria que en el mortero patrón. En la Tabla 1 se muestra el grado de hidratación estimado para los morteros al inicio del secado (7 días, edad de finalización del curado húmedo), en la misma se puede observar que los morteros con adiciones presentan un grado de hidratación 1,11 a 1,40 veces mayor que el mortero con CPN y, en consecuencia, estos morteros tienen un mayor volumen de CSH. Como la pérdida del agua contenida en los poros del CSH produce mayor deformación que el desplazamiento del agua contenida en los poros capilares, la retracción en las primeras edades de los morteros con adiciones es de esperar que aumente (14-16).

Adicionalmente, la dilución produce dos efectos contrapuestos: el aumento de la relación a/c efectiva y el incremento en la restricción de la retracción. La relación a/c efectiva, definida como la relación entre el contenido de agua y el material potencialmente reactivo para producir CSH, aumenta por la presencia de las adiciones. El filler calcáreo es una adición hidráulicamente inactiva, y la reacción de la escoria de acuerdo al tamaño de sus partículas es de esperar que se produzca luego de los 7 días (17). Bajo estas consideraciones, al inicio del secado la relación a/c efectiva de los morteros con adiciones (Tabla 1) es 1,06 a 1,67 veces mayor que para el mortero con CPN. El incremento de este parámetro produce una mayor deformabilidad y permeabilidad de los morteros (17) y en consecuencia la retracción a dos días de secado aumenta en los morteros binarios y ternarios.

Por otra parte, Powers (17) ha sugerido que, los granos de cemento no hidratados pueden considerarse como parte de los agregados cuando se evalúan los parámetros que modifican la retracción y, a esta edad, el filler calcáreo y la escoria pueden disminuir la retracción por el efecto de la restricción. En resumen y de acuerdo a los resultados obtenidos, el efecto filler sumado al aumento de la relación a/c efectiva prevalece sobre el efecto de restricción y en consecuencia la retracción por secado inicial de los morteros con adiciones se incrementa.

A edades más avanzadas el efecto filler deja de ser relevante y el efecto de dilución y la reacción de la

cements containing slag and cements with up to 12% limestone filler presents similar shrinkage values compared with control mortar (952 $\mu\text{m}/\text{m}$).

This behavior of mortars can be explained from several effects that are present when blended cements are used. First, the initial increase in shrinkage of mortars made with blended cements is attributed to the filler effect, because the addition of finely divided mineral admixtures to cement produces an increased rate of hydration of portland clinker (3-4) causing an enhancement in degree of hydration and a larger volume of CSH in mortar with filler and/or slag than in the control mortar. Table 1 shows degree of hydration estimated for mortars at the beginning of drying (7 days, end of water curing), and it can be noted that mortars incorporating additions presented a degree of hydration, 1.11 to 1.40 times higher than that of the control and hence, these mortars have a larger volume of CSH. As loss of water from CSH pores causes higher deformation than loss of water from capillary pores, it is to-be-expected higher shrinkage in mortar incorporating additions at early ages (14-16).

Additionally, dilution produces two opposed effects: the augment of effective water to cement ratio and the increase of restraints imposed to shrinkage. Effective water to cement ratio, defined as the ratio between water content and potential cementing materials, increases due to the presence of additions because limestone filler is a non active addition and the reaction of blast-furnace slag initiates after 7 days (17). Taking into account these facts, at the beginning of drying the effective water to cement ratio in mortars made with blended cements (Table 1) is 1.06 to 1.67 times higher than for control mortar. The increase of this parameter causes a greater deformability and permeability of mortars (17) and consequently, shrinkage at 2 days of drying grows for binary and ternary mortars.

On the other hand, Powers (17) suggested that non hydrated cement grains can be considered as aggregates when factors affecting shrinkage are evaluated and, at 2 days, limestone filler and blast-furnace slag can reduce shrinkage due to a restrictive effect. In summary and according to the results obtained herein, filler effect and the increase of effective water to cement ratio predominate over restrictive effect and hence, initial drying shrinkage of mortars increases.

At later ages, filler effect is less important and dilution effect and blast-furnace slag reaction

escoria se tornan más importantes. Luego de 10 días de secado, la retracción disminuye a medida que aumenta el contenido de filler calcáreo en el mortero. El volumen de CSH, en este caso, es función únicamente del contenido de clinker del cemento binario, en consecuencia la disminución de la retracción puede atribuirse a un efecto de restricción provocado por las partículas de filler.

Por otra parte, el cemento CPN y los cementos con escoria son más sensibles a la interrupción temprana del curado húmedo que los cementos con filler calcáreo (18). Sin embargo, debido a que los morteros se encuentran en un ambiente con una humedad relativa de 50%, aún conservan suficiente humedad en su interior para continuar con el proceso de hidratación, pues estas reacciones no se detienen hasta que la humedad en los poros del gel desciende por debajo del 80% (19-20). En los cementos binarios con escoria la retracción final resulta comparable a la registrada por el mortero patrón debido a que con el avance de la hidratación, la escoria reacciona produciendo CSH con características similares a los generados por la reacción de los silicatos de calcio del clinker portland (21).

El comportamiento de esta propiedad en los cementos ternarios es función de la competencia de los siguientes efectos: la retracción por secado inicial estará gobernada por el efecto filler y la relación a/c efectiva, en tanto que la retracción final será función del efecto de restricción y de la reacción de la escoria. Consecuentemente, los cementos ternarios con bajo contenido de escoria presentaron una retracción final menor, en tanto que los que contienen un alto contenido de escoria registraron una retracción más elevada.

A pesar de lo anterior, las retracciones registradas por los morteros con adiciones a los 217 días se encuentran entre 0,91 y 1,14 veces la retracción obtenida por el mortero patrón (Tabla 1). Para valores tan similares de retracción no es sencillo estimar la sensibilidad a la fisuración por retracción que los mismos presentarán, pues la fisuración por retracción restringida es un proceso muy complejo y no sólo depende del valor y de la velocidad de desarrollo de la retracción por secado, sino también de la resistencia a tracción del material, de la relajación de tensiones y del grado de restricción impuesto a las deformaciones (22).

Las fisuras en los morteros con CPN y C0F6E se produjeron a los 63 días de secado, mientras que cuando se incorporó 15% de escoria ésta se detectó a los 43 días. En los morteros elaborados con cementos con más de 11 % de escoria y contenidos de filler calcáreo variable, las fisuras se produjeron a 84, 26 y 12 días de secado. En todos los casos el ancho de las fisuras a 217 días de secado fue entre 0,2 y 0,3 mm (Tabla 1).

predominate. After 10 days of drying, shrinkage decrease for increasing limestone filler addition in mortars. The CSH volume results a function of clinker content in binary cements, consequently the reduction in shrinkage can be attributed to a restrictive effect caused by limestone filler particles.

Portland cement and cements containing blast-furnace slag are more sensible to an early interruption of curing than limestone filler cements (18). However, mortars stored in an environment with a relative humidity of 50% keep enough humidity in their mass allowing the prosecution of hydration because this reaction do not stop until humidity falls down below 80 % in gel pores (19-20). In binary blended cements containing blast-furnace slag final shrinkage is comparable to control because, as hydration continues, blast-furnace slag reacts producing CSH, similar to that generated from hydration of calcium silicates of portland clinker (21).

Development of shrinkage in ternary blended cements is a result of the competition of the following effects: initial shrinkage is governed by filler effect and the effective water to cement ratio, while final shrinkage is related to restrictive effect and hydration of blast-furnace slag. Consequently, ternary blended cement with low contents of blast-furnace slag presented a lower shrinkage deformation, while cements with high slag content showed higher shrinkage values.

However, at 217 days, shrinkage of mortars containing additions is 0.91 to 1.14 times that of the control mortar (Table 1). When results of shrinkage are so uniform it is not easy to estimate cracking sensibility caused by shrinkage, because restrained shrinkage cracking is a very complex process that depends not only on the rate and magnitude of drying shrinkage but also on the tensile strength, stress relaxation and restriction imposed to deformations (22).

Cracks in mortars made with CPN and C0F6E appeared at 63 days of drying, while for mortars incorporating 15% of blast-furnace slag cracks were detected at 43 days. In mortars containing more than 11% blast-furnace slag and variable contents of limestone filler; cracks appeared at 84, 26 and 12 days of drying. In all cases cracks width varied between 0.2 and 0.3 mm at 217 days (Table 1).

En contrapartida, los morteros con C6F0E, C15F0E y cementos ternarios con 22% de filler calcáreo y contenidos de escoria variable hasta los 217 días no evidenciaron fisuración alguna a pesar de experimentar un aumento en la velocidad de desarrollo de la retracción durante los primeros días de secado (Tabla 1).

La Figura 5 muestra la resistencia a flexión en función de la edad de secado de algunos de los morteros binarios y ternarios estudiados. En ella se observa que a 2 días se produce una caída de la resistencia, esta reducción puede atribuirse al efecto del secado que, al no ser uniforme en toda la sección de la probeta, genera gradientes de deformación según los cuales el núcleo restringe la retracción de la superficie y, como consecuencia, se producen tensiones internas, que sumadas a la carga del ensayo disminuyen la resistencia a flexión del material (23).

A partir de los 10 días, debido al avance de la hidratación del cemento y de la escoria la resistencia comienza a incrementarse hasta alcanzar su valor máximo para edades comprendidas entre los 35 y 50 días. Posteriormente, se registra una nueva disminución de la resistencia, generada ahora por la presencia de microfisuras ocasionadas por la retracción por secado (1). De acuerdo a Kanna *et al.* (24), la densidad de fisuras superficiales aumenta con la presencia de escoria debido al deterioro ocasionado por el secado en la estructura del mortero, en consecuencia la caída de resistencia de estos morteros puede ser más pronunciada.

Por otra parte, el mortero de control se fisuró cuando registró una retracción de 800 $\mu\text{m/m}$ y una resistencia a flexión de 8,9 MPa (Figura 5a). El mortero C0F15E presentó a la edad de fisuración (43 días) una retracción 13% mayor que el mortero C15F0E (Figura 3a) y además una resistencia a flexión 8% menor (Figura 5a), la conjunción de estos parámetros aumenta la sensibilidad a la fisuración por retracción restringida de este mortero. En el mismo sentido se puede observar que el mortero C6F22E presenta una retracción mayor (14%, Figura 3b) que el mortero C22F6E y una resistencia a flexión menor (9%, Figura 5b) debido a una mayor relación a/c efectiva, produciéndose a los 26 días de secado la fisuración por retracción restringida. Comportamientos similares se han registrado para el resto de los morteros estudiados.

Para finalizar, los resultados obtenidos en morteros no deben ser directamente extrapolados a hormigones, pues la presencia del árido grueso cambia el grado de restricción interna del hormigón y, además, las características de la zona de interface pueden modificar la retracción por secado y la posibilidad de fisuración de este material.

On contrary, mortars C6F0E, C15F0E and ternary blended cements with 22% limestone filler and variable contents of blast-furnace slag did not show cracks even though they experimented an acceleration of shrinkage during the first days of drying. (Table 1).

Figure 5 shows the evolution of flexural strength as a function of drying time for some of the binary and ternary blended cements studied. At 2 days, it is observed a declination of strength that can be attributed to the non-uniform drying across specimens thickness generating strain gradients (nucleus restraints shrinkage of outside surface of specimens) and as a consequence, producing internal stresses that added to test load decreases flexural strength of this material (23).

*After 10 days, due to the progress of hydration of cement and blast-furnace slag, flexural strength increments until it reaches its maximum value at ages between 35 and 50 days. Afterward, strength shows another reduction generated by the presence of microcracks caused by drying shrinkage (1). According to Kanna *et al.* (24), surface crack density increases with the presence of blast-furnace slag because drying produces damages in mortar structure, and this can lead to a sharper reduction in strength.*

On other hand, control mortar cracked for a shrinkage value of 800 $\mu\text{m/m}$ and a flexural strength of 8.9 MPa (Figure 5a). C0F15E mortar shows at the age of cracking (43 days) a shrinkage value 13% higher than for C15F0E mortar (Figure 3a) and a flexural strength 8% lower (Figure 5a), the association of these parameters increases the sensibility of cracking due to restrained shrinkage for this mortar. In the same way, it can be observed that C6F22E mortar shows higher shrinkage values (14%, Figure 3b) than for C22F6E mortar and lower flexural strength (9%, Figure 5b) caused by a larger effective water to cement ratio, leading to crack formation at 26 days of drying. Similar behavior was registered for the other mortars analyzed.

Finally, it must be noted that results obtained herein for mortar should not be directly extrapolated for concrete, because the presence of coarse aggregate change internal restraints inside concrete mass and transition zone characteristics can modified drying shrinkage and cracking sensibility of this material.

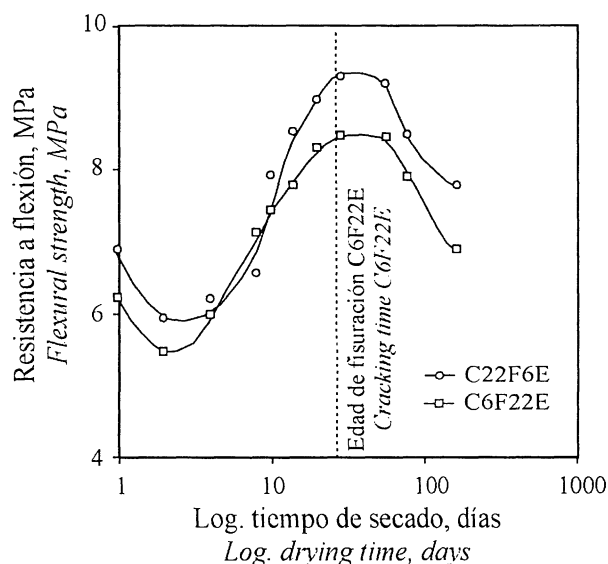
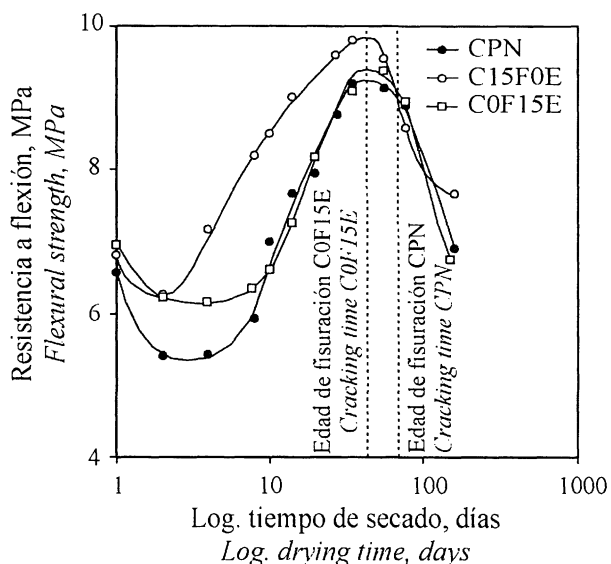


Figura 5.- Resistencia a flexión en función del tiempo de secado. a) Cementos binarios y b) Cementos ternarios.

Figure 5.- Flexural strength vs. drying time. a) Binary blended cements and b) Ternary blended cements.

4. CONCLUSIONES

Para el sistema cemento portland, filler calcáreo y escoria granulada de alto horno conteniendo hasta 22% de filler y hasta 22% de escoria se puede arribar a las siguientes conclusiones:

El empleo de adiciones en forma conjunta o aislada incrementa la retracción inicial del mortero debido fundamentalmente al efecto filler y al aumento de la relación a/c efectiva.

La retracción final será función de la cantidad y del tipo de adiciones incorporado al cemento. En este sentido, los cementos binarios con filler calcáreo registran una disminución de esta propiedad, en tanto que los cementos binarios con escoria presentan una retracción similar al mortero con CPN.

La retracción por secado final de los cementos ternarios es función del efecto de restricción y la reacción de la escoria. Consecuentemente, los cementos ternarios con bajo contenido de escoria presentan retracciones finales menores, en tanto que los que contengan alto contenido de escoria registran retracciones más elevadas que el mortero patrón.

Los cementos binarios con escoria y ternarios con más de 11% de escoria y contenido de filler variable presentan una mayor sensibilidad a la fisuración por retracción restringida que el cemento con filler calcáreo, dada por el aumento en la retracción por secado y la disminución de la resistencia a flexión.

4. CONCLUSIONS

For the system portland cement-limestone filler-blast-furnace slag containing up to 22 % limestone filler and 22% blast-furnace slag the following conclusions can be drawn:

The use of mineral additions, jointly or separately, increases the initial shrinkage of mortar due to filler effect and the increase of effective water to cement ratio.

Final drying shrinkage is a function of quantity and type of addition incorporated to cement. Limestone filler cements show a reduction of this parameter, while binary cements incorporating blast-furnace slag, have shrinkage values similar to the corresponding to portland cement mortar.

Final drying shrinkage of ternary blended cements is a function of restrictive effect and hydration of blast-furnace slag. Consequently, ternary blended cement with low contents of blast-furnace slag presented lower final drying shrinkage deformations, while cements with high slag content showed higher shrinkage values than control.

Binary cements incorporating blast-furnace slag and ternary blended cements with more than 11% of slag and variable limestone filler content present higher sensibility to restrained shrinkage cracking than limestone filler cements, due to an increase in drying shrinkage and a reduction in flexural strength.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo recibido por parte de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la U.N.C.P.B.A. para el desarrollo de esta investigación.

ACKNOWLEDGMENTS

Authors would like to thank the support received from Secretaría de Ciencia y Técnica de la U.N.C.P.B.A.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) A. Neville, J. Brooks. Concrete Technology. p. 239, 194. Logman Scientific and Technical, Gran Bretaña, 1990.
- (2) I. Soroka. Portland cement paste and concrete. p. 124, 248. The Mc Millian Press Ltd., Londres, 1979.
- (3) V.L. Bonavetti. Cementos con Filler Calcáreo-Mecanismo de Interacción y su Influencia sobre las Propiedades Resistentes. Tesis de Magister en Tecnología y Construcciones de Hormigón. p. 270. 1998.
- (4) C. Zhang, A. Wang, M. Tang, X: Liu. The filling role of pozzolanic material. Cement and Concrete Research. Vol. 26, N° 5 (1996), pp. 943-947.
- (5) S. Mindess & J. Young. Concrete. Prentice. Hall, inc. Englewood, Cliffs. p. 194-197. New Jersey. 1981.
- (6) D. C. Montgomery, G. C. Runger. Probabilidad y Estadística aplicadas a la Ingeniería, p. 787. Mc Graw Hill, México, 1996.
- (7) M. Spiegel, L. Abellanas. Fórmulas y tablas de matemática aplicada. p. 41. Mc Graw Hill. España, 1988.
- (8) S. Shah, W. J. Weiss, W. Yang. Shrinkage cracking-Can it be prevented? Concrete International 4 (20), 1998, pp. 51-55.
- (9) S. Shah, C. Ouyang, S. Marikunte, W. Yang, E. Becq-Giraudon, A method to predict shrinkage cracking of concrete, ACI Materials Journal 95 (4), 1998, pp. 339-346.
- (10) R. Swamy, H. Stravrides, La influencia del refuerzo con fibras en la contracción restringida y la fisuración. Hormigón, 1982, pp. 51-62.
- (11) K. Wiegink, S. Marikunte, S. Shah, Shrinkage cracking of high-strength concrete, ACI Materials Journal 93 (5), 1996, 409-415.
- (12) D. A. Whiting, R.J. Detwiler, E.S. Lagergren, Cracking tendency and drying shrinkage of silica fume concrete for bridge deck applications, ACI Materials Journal 97 (1), 2000, pp. 71-77.
- (13) T. C. Powers: The non evaporable water content of hardened portland cement paste. ASTM Bulletin, 158, 1949, pp. 68-75.
- (14) V. L. Bonavetti, V. Rahhal: Morteros de cemento portland con adición de filler calizo. Hormigón (30), 1997, pp. 37-48.
- (15) L. D. Adams, R. M. Racc: Effect of limestone additions upon drying shrinkage of portland cement mortar, Carbonate additions to cement. ASTM STP 1064. pp. 41-50P, Klieger and R. D. Hooton Eds, American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 1990.
- (16) J. Ding, Z. Li: Effects of metakaolin and silica fume on properties of concrete, ACI Materials Journal. 99 (4), 2002, pp. 393-398.
- (17) P. K. Metha, P.J.M. Monteiro. Concrete. Structure, Properties, and Materials. Second Edition. p. 279, 96, 93. Prentice-Hall, INC. Englewood, Cliffs. New Jersey. 1993.
- (18) G. Menéndez, V.L. Bonavetti, E.F. Irassar: Efecto del curado en la evolución de las propiedades de hormigones con cementos compuestos. Proc. 14ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina del Hormigón. Olavarría, Argentina. Tomo I, 2001, pp. 55-62.
- (19) P.C. Aitcin, A.M. Neville, P. Acker. Intergrated view of shrinkage deformation. Concrete International. 19, N°, 9, 1997, pp. 35-41.
- (20) C. Hua, P. Acker, A. Ehrlicher. Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste. Cement and Concrete research. 25 (7), 1995, pp. 1457-1468.
- (21) ACI 225R-85: Guide to the Selection and use of Hydraulic Cements. ACI Manual of Concrete Practice. Part 1. Materials and General Properties of Concrete. 225R-7, 1991.
- (22) S. Shah, W. J. Weiss, W. Yang: Shrinkage cracking - Can it be prevented? Concrete International. 20 (4), 1998, pp. 51-55.
- (23) Y. M. Lim, H. Wu, V. C. Li: Development of flexural composite properties and dry shrinkage behavior of high-performance fiber reinforced cementitious composites at early ages. ACI Materials Journal. 96 (1), 1999, pp. 20-26.
- (24) V. Kanna, R. Olson, H. Jennings: Effect of shrinkage and moisture content on the physical characteristics of blended cement mortars. Cement and Concrete Research. 28 (10), 1998, pp. 1467-1477.

* * *