

Retracción por secado de hormigones con cemento Portland puzolánico y aditivos reductores de retracción

Effectiveness of shrinkage-reducing admixtures on Portland pozzolan cement concrete

C. VIDELA, C. AGUILAR

Pontificia Universidad Católica de Chile

Persona de contacto/*Corresponding author:* cvidela@ing.puc.cl

Fecha de recepción: 16-VI-04

Fecha de aceptación: 28-X-04

CHILE

RESUMEN

La retracción por secado es un fenómeno intrínseco del hormigón que produce tensiones de tracción en elementos restringidos de hormigón. Puesto que todos los elementos presentan algún grado de retracción, se considera a la retracción por secado como una de las principales causas de agrietamiento en proyectos de construcción en hormigón.

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar la efectividad de los aditivos reductores de retracción (SRA) en hormigones fabricados con cemento Portland puzolánico. Las variables principales estudiadas incluyen el asentamiento de cono de Abrams, marca y dosis de aditivo reductor de retracción, y tamaño de especímen de hormigón. Los resultados obtenidos permiten concluir que el uso de cualquiera de los aditivos utilizados en la investigación disminuye significativamente la retracción por secado. Hormigones fabricados con aditivos reductores de retracción presentan en promedio un 43% menos de retracción que hormigones sin aditivo. A medida que aumenta la dosis de aditivo empleada en los hormigones, más eficiente es el comportamiento de los aditivos reductores de retracción.

Los resultados experimentales de retracción fueron comparados con las deformaciones estimadas por los modelos de predicción propuestos por el ACI 209, CEB MC 90, B3, GL 2000, Sakata 1993 y Sakata 2001. Se concluye que ninguno de los modelos de predicción de retracción representa adecuadamente el comportamiento observado de los hormigones fabricados con cemento Portland puzolánico y aditivos reductores de retracción. Sin embargo, el desempeño del modelo Sakata 2001 se considera adecuado dado que presenta un coeficiente de variación ponderado inferior al 30%.

PALABRAS CLAVE: retracción, cemento con adiciones, puzolana, aditivo orgánico, modelización.

1. INTRODUCCIÓN

Las grietas en el hormigón pueden afectar significativamente la durabilidad, serviciabilidad, integridad estructural o la estética de una estructura. Por lo tan-

SUMMARY

Drying shrinkage causes tensile stress in restrained concrete members. Since all structural elements are subject to some degree of restraint, drying shrinkage is regarded to be one of the main causes of concrete cracking.

The purpose of the present study was to evaluate the effectiveness of SRA in reducing drying shrinkage strain in Portland pozzolan cement concrete. The major variables examined included slump, admixture type and dose, and specimen size. The measured results indicate that any of the admixtures used in the study significantly reduced shrinkage. Concrete manufactured with shrinkage reducing admixtures shrank an average of 43% less than concrete without admixtures. As a rule, the higher the dose of admixture, the higher was its shrinkage reduction performance.

The experimental results were compared to the shrinkage strain estimated with the ACI 209, CEB MC 90, B3, GL 2000, Sakata 1993 and Sakata 2001 models. Although none of these models was observed to accurately describe the behaviour of Portland pozzolan cement concrete with shrinkage reducing admixtures, the Sakata 2001 model, with a weighted coefficient of variation of under 30%, may be regarded to be roughly adequate.

KEYWORDS: shrinkage, blended cement, pozzolan, organic admixture, modelization.

1. INTRODUCTION

Cracks in concrete can significantly impair structure durability, serviceability, integrity or appearance. Hence the growing tendency for structural engineers to include

to, los ingenieros estructurales cada vez están considerando con mayor énfasis las deformaciones producidas por retracción en el proceso de diseño. Asimismo, los ingenieros constructores están requiriendo especificaciones asociadas a las deformaciones por retracción, además de las especificaciones de resistencia y trabajabilidad. Por estas razones, investigar con el objeto de predecir la retracción y desarrollar medidas para prevenir o controlar el agrietamiento del hormigón producto de la retracción, es de suma importancia para las etapas de diseño y construcción de proyectos en hormigón.

En los últimos años un nuevo tipo de aditivo, denominado aditivo reductor de retracción (SRA), ha sido introducido en la industria de la construcción con el objeto de reducir la retracción por secado de hormigones. Aunque se han realizado algunas investigaciones para estudiar el comportamiento de estos aditivos en hormigones con cemento Portland (1-3), no existe información respecto del efecto de los SRA en hormigones con cemento Portland puzolánico. Además, los métodos disponibles para estimar la retracción por secado del hormigón no reconocen explícitamente la influencia de ningún aditivo (4-9).

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue cuantificar la reducción de la retracción por secado producto de la utilización de SRA en hormigones fabricados con cemento Portland puzolánico. Fueron considerados hormigones típicamente utilizados en construcción con resistencia cilíndrica a la compresión de 30 MPa. También, la capacidad de predicción de seis modelos de predicción de retracción ha sido evaluada por comparación entre los resultados calculados y los experimentales. Los modelos seleccionados para comparación fueron ACI 209, CEB MC 90, B3, GL 2000, Sakata 1993 y Sakata 2001.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Fue realizado un programa experimental para determinar la influencia de los SRA en las propiedades del hormigón endurecido y de retracción. Este programa consideró un total de 22 hormigones con similar resistencia (Tabla 1). Las variables principales consideraron al asentamiento de cono de Abrams, tipo y dosis de aditivo reductor de retracción, y tamaño de los especímenes de hormigones. Los ensayos fueron realizados en 132 prismas y la retracción libre fue medida hasta los 1.350 días de secado. También se determinó la resistencia a la compresión, a la tracción indirecta por hendimiento y módulo estático de elasticidad.

2.1. Materiales

Fueron realizados ensayos físicos y mecánicos para caracterizar el cemento. De acuerdo a ASTM C 595 (11) y

shrinkage strain issues in the design process and for construction engineers to set concrete shrinkage requirements along with concrete strength and workability specifications. Consequently, research into ways of predicting drying shrinkage and the development of measures to prevent or control shrinkage cracking in concrete is of paramount importance to concrete structure design and construction.

A new family of admixtures, called shrinkage-reducing admixtures (SRAs), has recently been introduced in the construction industry to reduce concrete drying shrinkage. Although several surveys have been conducted on the behaviour of these admixtures with ordinary Portland cement concrete (1-3), no information has yet been published on the effect of SRA on Portland pozzolan cement concrete. Furthermore, the methods available for estimating concrete shrinkage do not explicitly address the effect of admixtures (4-9).

The purpose of the present research was to quantify SRA shrinkage reduction in Portland pozzolan cement concrete. Concrete with a compressive strength of 30 MPa, typically used in building construction, was used for the analyses. The predictive accuracy of six shrinkage models - ACI 209, CEB MC 90, B3, GL 2000, Sakata 1993 and Sakata 2001 - was evaluated by comparing the model results to the experimental data.

2. EXPERIMENTAL PROGRAMME

An experimental programme was conducted to determine the effect of SRA on concrete drying shrinkage as well as on the properties of the hardened concrete. The trials were run on a total of 22 concrete mixtures of similar strength. The analyzed variables analyzed included slump, shrinkage-reducing admixture type and dose, and specimen size. Tests were carried out on 132 prisms and free shrinkage strain and weight loss measurements were taken over a trial period of 1350 days. Compressive strength, splitting strength and static modulus of elasticity were likewise determined. The experimental design is shown in Table 1.

2.1. Materials

Physical and mechanical tests were performed to characterize the cement. The Portland pozzolan cement

CEB (5) el cemento Portland puzolánico utilizado fue clasificado como tipo IP y N, respectivamente (ver Tabla 2).

used in this research was classified as ASTM C 595 (11) type IP and CEM (5) type N (see Table 2)

TABLA 1/*TABLE 1*
Diseño del experimento
Experimental design

Resistencia a la compresión cilíndrica especificada (Nominal concrete compressive strength)	30 MPa																					
Tiempo de curado (Curing time)	7 Días (Days)																					
Granulometría del árido (Aggregate grading)	Entre curvas 2 y 3 de Road Note 4 –TRRL (10) <i>Between curves 2 and 3, Road Note 4 – TRRL (10)</i>																					
Tamaño máximo nominal del árido (Nominal maximum size of aggregate) (mm)	40																					
Tipo de árido (Type of aggregate)	Silicio (Siliceous)																					
Tipo de cemento (Cement type)	Portland puzolánico -30% de Puzolana natural (30% natural pozzolan-Portland cement)																					
Asentamiento de cono (Slump) (mm)	60							120														
Tipo de aditivo (Admixture type)	N	Aditivo reductor de retracción (Shrinkage-reducing admixture)							N	Aditivo reductor de retracción (Shrinkage-reducing admixture)												
Marca de aditivo (Type of admixture)	N	SR 1	SR2	SR 3	SR 4	SR 5		N	SR 1	SR2	SR 3	SR 4	SR 5									
Dosis de aditivo (Admixture dose)	N	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2					
Número de hormigón (Concrete number)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22

D1: dosis baja de aditivo (*small dose of admixture*) - D2: dosis alta de aditivo (*high dose of admixture*) – N: ningún aditivo (*no admixture*)

TABLA 2/*TABLE 2*
Propiedades del cemento
Cement properties

Propiedad (Property)	Propiedades Físicas y Químicas (Physical and chemical properties)	Propiedades mecánicas (Mechanical properties)		Componentes del clinker original (Clinker composition) (%)
Tiempo de fraguado inicial (Initial setting time)	04:00 (HH:MM)	Resistencia a la compresión (Compressive strength)		C ₃ S 38
Tiempo de fraguado final (Final setting time)	05:00 (HH:MM)	7 días (days)	24.6 MPa	C ₂ S 44
Finura (Fineness) (Blaine)	4394 cm ² /g	28 días (days)	34.2 MPa	C ₃ A 10
Peso específico (Specific gravity)	2.90	Resistencia a la tracción por flexión (Flexural strength)		C ₄ AF 8
Consistencia (Consistency)	30.8 (%)	7 días (days)	5.3 MPa	
Contenido de puzolana (Pozzolan content)	28.9 (%)	28 días (days)	7.3 MPa	
Residuo insoluble (Insoluble residue)	27.06 (%)			
Pérdida por calcinación (Loss on ignition)	2.65 (%)			
SO ₃	2.52 (%)			

Las propiedades de los áridos fueron caracterizadas por medio de las normas ASTM, específicamente se obtuvo los resultados de densidad, peso específico, absorción y granulometría. La proporción de los áridos fue realizada por medio de ajustar la granulometría del árido combinado entre las curvas N° 2 y N° 3 propuestas en Road Note N° 4 (10), para hormigones con un tamaño máximo nominal del árido de 40 mm (11).

Cinco marcas de SRA fueron utilizadas en el presente estudio, dos comerciales (SRA 1 y SRA 2), y el resto fueron aditivos experimentales. Estos tipos de aditivos son de baja viscosidad, líquidos solubles en agua y que contienen polipropilenglicol. El mecanismo de estos aditivos es reducir la tensión capilar que se desarrolla dentro de los poros capilares de la pasta de cemento a medida que ésta se seca. Se destaca que las dosis de aditivo utilizadas en la fabricación de los hormigones corresponden a los tercios del rango recomendado por los fabricantes de los aditivos considerados (ver Tabla 3).

2.2. Procedimientos de ensayo

Una serie de ensayos fueron desarrollados en cada mezcla de hormigón. El asentamiento de cono de Abrams, densidad y contenido de aire del hormigón fresco, fueron determinados de acuerdo con ASTM C143 y ASTM C138, respectivamente. También se registraron las temperaturas del hormigón fresco y ambiental.

Los siguientes ensayos fueron realizados en el hormigón endurecido: resistencia a la compresión ASTM C39, módulo de elasticidad C469 y resistencia a la tracción por hendimiento C496; se ensayaron dos cilindros por cada propiedad a las edades de 7, 28 y 90 días. Todas las muestras fueron mantenidas en una cámara de curado estándar ($T=20\pm3$ °C y HR > 90%) hasta la edad de ensayo (ver Tabla 4).

The aggregate was characterised as specified in ASTM standards, conducting tests to find unit weight, specific gravity, absorption and grading. The grading of the combined aggregate was proportioned to lay between curves 2 and 3 proposed in Road Note 4 (10) for concrete with a maximum nominal aggregate size of 40 mm (11).

A total of five -two commercial (SRA 1 and SRA 2) and three experimental- types of SRA were used in this study. All these admixtures are low viscosity, water-soluble liquids containing polypropylenglycol. This type of admixtures reduces the surface tension of the water and therefore the capillary tension developing inside the pores as the cement paste dries. The admixture doses used in the concrete were at the third point limits of the manufactured-recommended dose range (see Table 3).

2.2. Testing procedures

Several ASTM standard tests were conducted on each mixture. The slump, unit weight and air content of the fresh concrete were determined as described in ASTM C143 and ASTM C138, respectively. Both the laboratory and concrete temperatures were also recorded.

The following tests were performed on the hardened concrete: compressive strength to ASTM C39, modulus of elasticity to ASTM C469 and splitting tensile strength to ASTM C496; two cylindrical specimens were used in each trial after 7, 28 and 90 days. All the samples were stored in a standard curing room ($T=20\pm3$ °C and RH > 90%) until tested (see Table 4).

TABLA 3/TABLE 3
Propiedades de los aditivos
Admixture properties

Nomenclatura (<i>Nomenclature</i>)	Tipo de aditivo (<i>Type of admixture</i>)	pH	Dosis de aditivo (<i>Admixture dose</i>) (%) [*]		Densidad (<i>Density</i>) (kg/m ³)
			D1	D2	
SRA 1	Comercial (<i>Commercial</i>)	10 ± 0.5	1.33	1.66	1020
SRA 2	Comercial (<i>Commercial</i>)	11 ± 0.5	1.67	1.83	1000
SRA 3	Experimental (<i>Experimental</i>)	11 ± 0.5	1.33	1.66	952
SRA 4	Experimental (<i>Experimental</i>)	9 ± 0.5	1.33	1.66	1025
SRA 5	Experimental (<i>Experimental</i>)	10 ± 0.5	1.33	1.66	962

* respecto del peso del cemento (*by weight of cement*)

TABLA 4/*TABLE 4*
 Propiedades del hormigón endurecido (MPa)
Properties of the hardened concrete (MPa)

Número de hormigón (Concrete number)	Resistencia a la compresión (Compressive strength)				Resistencia a la tracción por hendimiento (Splitting strength)			Módulo de elasticidad (Modulus of elasticity)		
	Cúbica (Prism)	Cilíndrica (Cylinder)			$f_{ct,7}$	$f_{ct,28}$	$f_{ct,90}$	E_7	E_{28}	E_{90}
		$f_{c,28}$	$f_{cyl,7}$	$f_{cyl,28}$	$f_{cyl,90}$					
1	42.9	28.4	37.4	49.0	2.1	3.2	3.8	22225	28575	31595
2	38.0	25.9	38.5	41.0	2.2	3.3	3.0	22133	27546	29643
3	38.5	25.7	38.9	41.5	2.6	3.4	2.7	22165	26708	28828
4	40.6	25.8	36.3	48.6	1.9	2.9	4.0	23355	29233	31992
5	38.8	24.5	36.1	48.8	2.2	3.0	4.2	22834	27485	31801
6	37.8	27.7	39.2	49.1	2.6	3.9	4.1	23792	28444	30502
7	35.9	22.8	35.6	43.5	1.9	3.1	3.7	24947	28205	30949
8	36.9	24.3	32.3	36.7	1.7	3.1	4.2	22774	25706	29836
9	29.8	20.7	30.5	35.8	1.7	3.0	3.9	22087	25346	27301
10	40.1	27.0	36.3	46.0	2.4	3.1	4.1	23804	26590	30195
11	36.6	22.4	31.2	42.2	2.1	2.9	3.6	22474	26123	29710
12	39.0	25.7	36.1	46.3	2.2	2.9	3.3	22768	27239	29299
13	36.1	23.7	37.8	39.4	2.3	3.0	3.1	22033	26985	27127
14	38.0	24.5	38.8	39.8	2.1	3.3	3.4	22250	25891	27586
15	41.7	22.4	34.9	46.1	1.8	2.6	3.3	19990	27675	30322
16	37.4	21.6	34.1	43.2	2.2	2.8	3.7	19790	26450	28865
17	34.8	25.9	36.7	43.1	2.2	3.4	3.5	21974	26610	29959
18	33.3	23.9	36.4	41.3	2.0	3.3	3.6	20948	27225	29286
19	37.0	24.1	34.5	42.0	2.2	2.8	3.7	22974	25699	28718
20	36.8	26.4	33.5	41.1	2.1	3.0	3.5	21677	25836	27866
21	34.7	22.4	30.2	41.7	2.0	2.8	3.8	20711	24631	27932
22	34.2	21.0	32.8	42.3	2.1	2.9	3.7	22433	23497	27042

El ensayo de retracción por secado se realizó de acuerdo a lo establecido en ASTM. C157 (11) hasta los 1.350 días de secado. Para cada mezcla de hormigón, tres especímenes de 75x75x285 mm y tres de 100x100x500 mm fueron ensayados para analizar la influencia de la razón Volumen / Superficie en la evolución y magnitud de la retracción. Los especímenes fueron curados en una sala estándar durante 1 día e inmersos en agua saturada con cal a 20 °C por los 6 días siguientes. Posteriormente fueron secados a una humedad relativa del 50 ± 4%, y a una temperatura de 23 ± 2 °C. Las deformaciones por retracción libre y la pérdida de peso fueron medidas periódicamente hasta los 1.350 días de secado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los mecanismos por los cuales se desarrolla la retracción por secado son complejos. Neville y otros (12) afirman que existen dos caminos posibles para la acción de los aditivos en la retracción por secado. Uno de ellos consiste en la modificación de las propiedades del agua conte-

Free drying shrinkage strain tests were performed to ASTM C157 (11) over 1350 days. Three 75x75x285-mm and three 100x100x500-mm prism moulds were made from each concrete mixture and then tested to analyse the effect of the volume/surface ratio on shrinkage evolution and magnitude. The specimens were cured in a standard curing room for 1 day and then placed in lime-saturated water at 20 °C for 6 days. Subsequent drying was conducted at a relative humidity of 50 ± 4%, and a temperature of 23 ± 2 °C. Free shrinkage strain and weight loss were measured periodically over a period of 1350 days.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The mechanisms involved in drying shrinkage are complex. Neville et al (12) sustain that admixtures may act on shrinkage in one of two possible ways. One is by changing the properties of the water in the cement paste, e.g. modifying the surface tension of the water, and the

nida en la pasta de cemento, disminuyendo la tensión superficial del agua. Otro camino considera la alteración de la estructura física del gel donde ocurre el movimiento de humedad, es decir, en la interface sólido-líquido. El primer mecanismo fue estudiado en Japón durante la década de los ochenta y tuvo como resultado un nuevo tipo de aditivo, los aditivos reductores de retracción. Estos aditivos reducen la tensión superficial del agua resultando en una reducción de la presión capilar de los poros de la pasta de cemento. Los efectos de estos aditivos en la retracción serán analizados en las secciones siguientes.

3.1. Efecto de los aditivos reductores de retracción en la dosificación de hormigones

La Figura 1 muestra, agrupadas por marca de aditivo, las cantidades promedio de cemento y agua usadas en los hormigones. De la Figura 1 es posible concluir que en promedio los hormigones fabricados con SRA requieren un 8% menos de agua y cemento que los hormigones sin aditivo, al considerar similares asentamientos de cono y resistencia. Como ha sido observado previamente por otros investigadores (2, 3), esto podría ser producto del aumento del flujo del hormigón, el cual es probablemente producto del efecto del aditivo en la reducción de la tensión superficial del agua. Por lo tanto, una menor cantidad de agua y de cemento es requerida para un asentamiento y resistencia dado, cuando los SRA son utilizados.

La menor demanda de agua y cemento en hormigones fabricados con este tipo de aditivo (conteniendo una menor cantidad de pasta de cemento, la cual es el material que sufre retracción), es un factor que contribuye a la disminución de la retracción sumado al efecto del aditivo en la tensión capilar.

other by altering the physical structure of the gel affected by moisture movement, i.e. the solid-liquid interface. Studies of the first mechanism by Japanese scientists in the nineteen eighties led to the development of a new family of admixtures. These new shrinkage-reducing compounds decrease the surface tension of the water to lower the capillary pressure. Their effects on shrinkage strain are analysed in the following sections.

3.1. Effects of shrinkage-reducing admixtures on mix proportioning

The average cement and water content in the concrete mixes to which each type of SRA was added are given in Figure 1. As the figure shows, on average it takes 8% less water and cement to manufacture SRA concrete than concrete of similar slump and strength without admixtures. This may be due to an enhancement in concrete flow due to the reduction in surface tension of the water prompted by the admixture (2, 3). That is to say, smaller amounts of water and cement are required to produce concrete with a given slump and strength when SRAs are included in the mix.

In addition to the effect of the admixture on capillary tension, the lower demand for water and cement in concrete containing such compounds (and therefore less cement paste, which is the material that shrinks) contributes to lessening drying shrinkage.

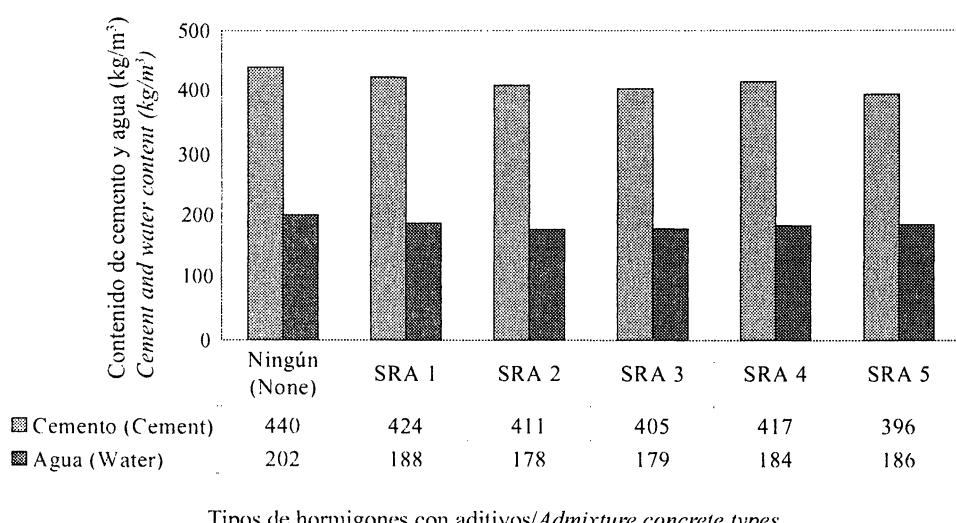


Figura 1.- Contenido promedio de agua y cemento de hormigones separados por marca de SRA.
Figure 1.- Average water and cement in SRA concrete, by type of admixture type of concrete.

3.2. Efecto de los aditivos reductores de retracción en la retracción por secado de hormigones

- Análisis de varianza de los resultados experimentales de retracción

Para determinar el efecto de las variables independientes en la retracción, se realizó un análisis estadístico de varianza con un nivel de confianza del 95%. El análisis (ANOVA) descompone la variabilidad de los resultados experimentales de retracción en los distintos componentes independientes con que contribuyen las diferentes variables consideradas en el diseño de experimentos factorial.

Los resultados del análisis estadístico desarrollado tanto para la evolución como para la magnitud de la retracción por secado son mostrados en la Tabla 5. Los resultados fueron analizados aplicando la técnica de ponderación desarrollada por Bazant y Baweja (6) con el fin de evitar la heterocedasticidad de los datos.

De la Tabla 5 se observa que, con excepción del asentamiento de cono, todas las variables independientes consideradas, es decir, marca y dosis de aditivo, tiempo de secado y razón V/S, son estadísticamente significativas en la magnitud y evolución de la retracción por secado. La razón del por qué el asentamiento de cono no fue significativo, podría ser consecuencia de los diferentes contenidos de agua utilizados en los hormigones para obtener asentamiento de cono similares.

La Tabla 5 también presenta la significancia estadística de las variables agrupadas por marca de aditivo. Aunque los resultados totales muestran que las variables que afecta a la evolución y magnitud de la retracción dependen de la marca de aditivo, este análisis particular muestra diferentes comportamientos dependiendo del aditivo específico considerado. Por lo tanto, cada marca de aditivo será analizada y comparada independientemente considerando hormigones con y sin aditivo.

- Comparación entre valores de retracción por secado de hormigones con SRA y sin aditivo

Las Figuras 2 y 3 muestran la importancia de utilizar SRA para disminuir la retracción por secado de hormigones. Para el período de secado estudiado, los resultados muestran en promedio que hasta una reducción de retracción del 43% puede ser esperada, al comparar los resultados con hormigones sin aditivo y con asentamientos de cono y resistencia similares. Los resultados destacan el gran efecto del aditivo experimental SRA 5; para el período de secado analizado se obtuvo un 43% de reducción promedio respecto de un hormigón patrón sin aditivo, y de un 36% de reducción de retracción al analizar los resultados a los 1.350 días de secado.

3.2. Effects of shrinkage-reducing admixtures on drying shrinkage

- Analysis of variance of experimental results for drying shrinkage

Analysis of variance testing (95% confidence) was conducted to determine the effect of the independent variables on drying shrinkage. This statistical technique (ANOVA) divides the total variance of experimental drying shrinkage data into components assignable to the different variables considered in the factorial experimental design.

The results of the statistical analysis to compute the variation in evolution and magnitude of shrinkage are shown in Table 5. The results were weighted with the Bazant and Baweja (6) technique to avoid heteroscedasticity in the data.

Table 5 shows that with the exception of slump, all the independent variables considered, namely type and dose of admixture, drying time and V/S ratio, are statistically significant with respect to magnitude and time evolution of drying shrinkage time. The explanation for the statistical non-significance of slump might be sought in the different proportions of water that had to be used in the various types of concrete to obtain similar slump values.

Table 5 also contains information on the statistical significance of the variables by type of admixture. Although the combined results show that the variables affecting changes in evolution and magnitude of shrinkage depend on the type of admixture, this more detailed analysis shows that behaviour differs with the specific admixture. Therefore each type was analyzed and compared separately by testing concrete with and without the admixture.

- Comparison of drying shrinkage between SRA and reference concrete

The importance of using SRA to decrease drying shrinkage in concrete is visible in Figures 2 and 3. The average results for the drying times studied show that a reduction of up to 43% can be expected in SRA concrete as compared to admixture-free mixes with similar slump and strength values. Experimental admixture SRA 5 proved to be especially effective in this regard, with an average reduction of 43% for the drying period as a whole and 36% after 1350 days of drying compared to the reference concrete.

TABLA 5/TABLE 5
Significancia estadística de las variables consideradas en el diseño experimental
Statistical significance of the variables considered in the experimental design

Hormigón con aditivo (<i>Admixture concrete</i>)	Propiedades de la retracción por secado (<i>Drying shrinkage properties</i>)	Variables Independientes (<i>Independent variables</i>)			
		Aditivo (<i>Admixture</i>)	Cono (<i>Slump</i>)	Tiempo de secado (<i>Drying time</i>)	Razón V/S (<i>V/S ratio</i>)
Hormigón con SRA (se considera para el análisis el resultado de todos los hormigones) (<i>SRA concrete (results for SRA concretes)</i>)	Evolución de la retracción por secado (<i>Change in drying shrinkage over time</i>)	+	+	-	+
	Magnitud de la retracción a los 1.350 días de secado (<i>Drying shrinkage after 1350 days</i>)	+	+	-	NA
Hormigón con SRA 1 (<i>SRA 1 concrete</i>)	Evolución de la retracción por Secado (<i>Drying shrinkage time function</i>)	+	NA	+	+
	Magnitud de la retracción a los 1.350 días de secado (<i>Drying shrinkage after 1350 days</i>)	-	NA	-	NA
Hormigón con SRA 2 (<i>SRA 2 concrete</i>)	Evolución de la retracción por secado (<i>Change in drying shrinkage over time</i>)	-	NA	+	+
	Magnitud de la retracción a los 1.350 días de secado (<i>Drying shrinkage after 1350 days</i>)	-	NA	-	NA
Hormigón con SRA 3 (<i>SRA 3 concrete</i>)	Evolución de la retracción por secado (<i>Change in drying shrinkage over time</i>)	+	NA	-	+
	Magnitud de la retracción a los 1.350 días de secado (<i>Drying shrinkage after 1350 days</i>)	+	NA	-	NA
Hormigón con SRA 4 (<i>SRA 4 concrete</i>)	Evolución de la retracción por secado (<i>Change in drying shrinkage over time</i>)	-	NA	-	+
	Magnitud de la retracción a los 1.350 días de secado (<i>Drying shrinkage after 1350 days</i>)	-	NA	-	NA
Hormigón con SRA 5 (<i>SRA 5 concrete</i>)	Evolución de la retracción por secado (<i>Change in drying shrinkage over time</i>)	+	NA	+	+
	Magnitud de la retracción a los 1.350 días de secado (<i>Drying shrinkage after 1350 days</i>)	-	NA	-	NA

+: Variable estadísticamente significativa (*Statistically significant variable*);

-: Variable estadísticamente no significativa (*Non-statistically significant variable*)

NA: No se aplica (*Not applicable*)

Además, la Figura 3 muestra que el porcentaje de reducción de retracción disminuye en el tiempo. Para las marcas de aditivos estudiados, los resultados de reducción promedio de retracción fueron de un 64% a edades tempranas (1 día de secado) y de un 26% a los 1.350 días de secado. Lo anterior podría ser consecuencia del efecto de estos aditivos sobre la tensión superficial del agua contenida en los poros capilares de la pasta de cemento, asociado a la retracción temprana. La disminución de la tensión superficial reduce el cambio volumétrico de la pasta

Figure 3 likewise shows that the percentage of shrinkage reduction decreases with drying time. For the types of admixture studied, shrinkage dropped by an average of 64% at early ages (1 day of drying) but by 26% after 1350 days. This behaviour may be due to the effect of these admixtures on the surface tension of the water in the capillary pores producing the early drying shrinkage. The drop in surface tension slows the rate of change in cement paste volume, with a concomitant decline in drying shrinkage. However, since these

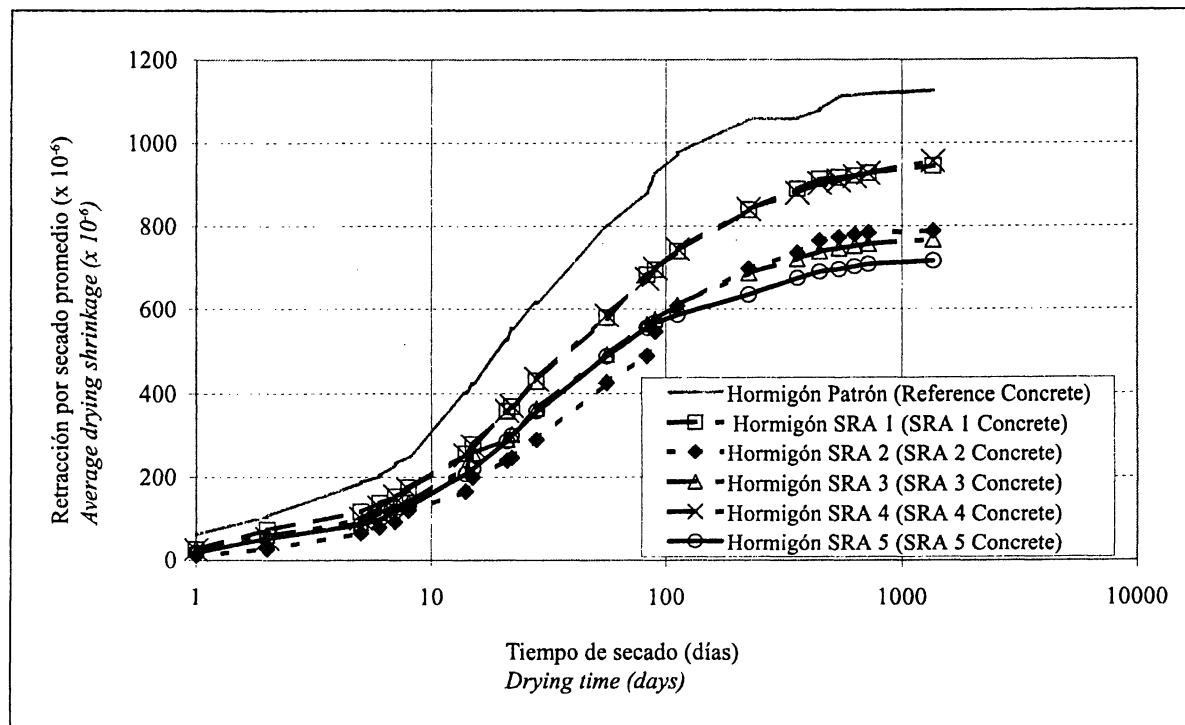


Figura 2.- Relación entre la retracción promedio de hormigones y el tiempo de secado.
Figure 2.- Relationship between average drying shrinkage of concrete and drying time.

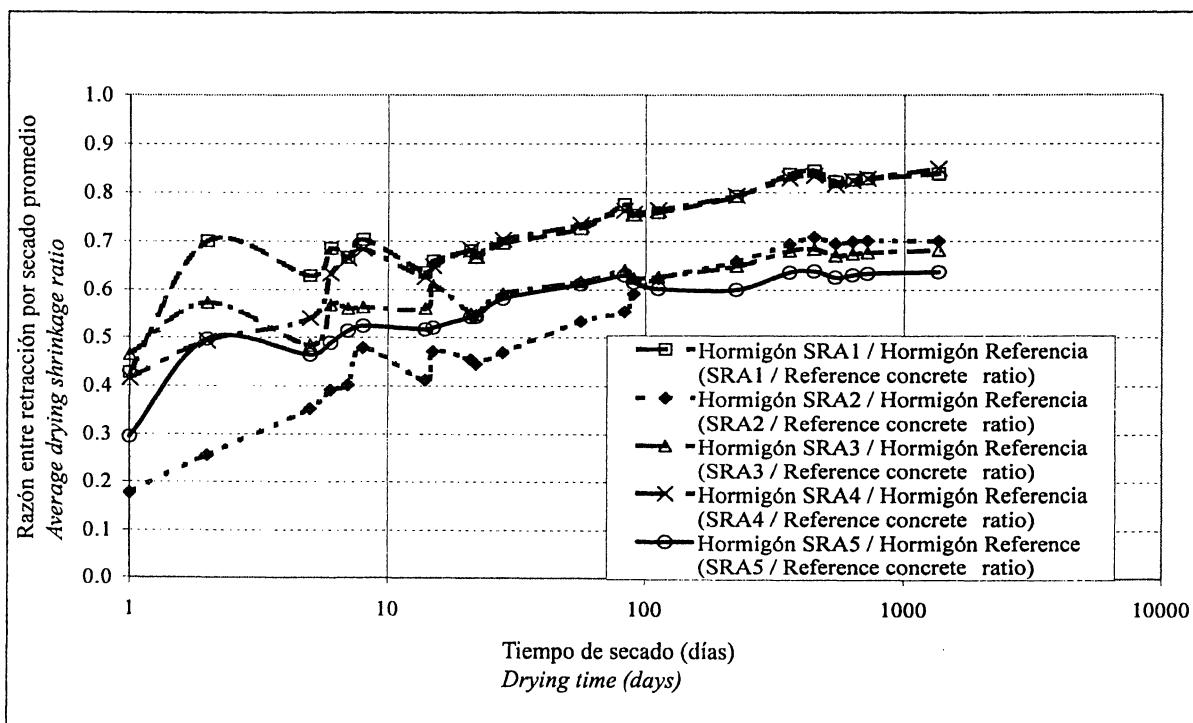


Figura 3.- Efecto del tiempo de secado en el cociente de retracciones de hormigón con y sin aditivo.
Figure 3.- Effect of drying time on average drying shrinkage ratio.

de cemento y por lo tanto, es de esperar una menor retracción por secado. Además, dado que no interfieren en el proceso de retracción asociado a la pérdida del agua adsorbida, retracción tardía, la diferencia entre la retracción de hormigones con aditivos del tipo SRA y sin aditivo se estrecha a largo plazo.

Luego, los resultados pueden ser consecuencia de dos efectos, una menor cantidad de pasta de cemento más la acción de los aditivos en la tensión superficial del agua contenida en los poros capilares de la pasta de cemento. Con el objeto de aislar la reducción en la retracción producida por la tensión capilar de este tipo de aditivo, un método propuesto por Brooks (13) fue utilizado para permitir cambios en los materiales constituyentes del hormigón (ver Figura 4), es decir, la retracción del hormigón sin aditivo fue ajustada para lograr la misma dosificación del hormigón con aditivo en cuanto al contenido total de los áridos y de la relación a/c. El efecto de los aditivos es evaluado entonces considerando la retracción relativa a la deformación ajustada del hormigón patrón considerado.

Analizando los resultados mostrados en la Figura 4 para hormigones con similar contenido de agua y relación a/c (Figura 4b), se observa que la reducción de la tensión superficial del agua explica sólo una fracción del total de reducción de retracción. De los resultados de la aplicación de la metodología propuesta por Brooks (13), es posible inferir que la utilización de los aditivos reductores de retracción implica una reducción de retracción que oscila entre un 0% y un 24%, al considerar los valores experimentados a los 1.350 días de secado para los hormigones fabricados con SRA 4 y SRA 5, respectivamente. Por lo tanto, disminuir la tensión superficial reduce los cambios volumétricos de la pasta de cemento y se debería esperar un menor valor de retracción (1-3). Los resultados también permiten estimar que aproximadamente una reducción del 12% de retracción se debería producir por la menor cantidad de pasta de cemento necesaria al utilizar los SRA.

La Figura 5 presenta el efecto de la dosis de aditivo en la retracción por secado. De esta figura es posible concluir que, con la excepción del aditivo SRA 2, una mayor dosis de aditivo implica una mayor reducción de retracción. Los mismos resultados fueron obtenidos previamente por Shah y otros (2).

Por último, se debe tener en cuenta que un menor valor de retracción no asegura necesariamente que el agrietamiento del hormigón sea evitado, puesto que una serie de factores adicionales afectan al mismo. Estos factores incluyen, entre otros, la velocidad de retracción, propiedades del creep, módulo de elasticidad, resistencia a la tracción, y capacidad de deformación del hormigón. No obstante, un menor valor de retracción disminuye el riesgo potencial de agrietamiento del hormigón.

compounds have no effect on the drying shrinkage process associated with the loss of adsorbed water that takes place at later ages, hence the shrinkage differences between concrete with and without SRA-type admixtures are smaller in the longer term.

Hence, the above findings may be due to two effects, a lesser quantity of cement paste and the impact of admixtures on the surface tension of the water contained in the capillary pores typical of cement pastes.

A method proposed by Brooks (13) was used to identify the shrinkage reduction owing solely to the lessening of capillary tension brought on by this type of admixture. This method accommodates changes in the concrete constituents (see Figure 4): the shrinkage in the reference concrete was adjusted to attain the same total amount of aggregate and the same water/cement ratio as in the SRA concrete. The effect of the admixtures was then assessed in terms of the shrinkage associated with the strain in the respective reference concrete, as adjusted.

It will be noted from the results in Figure 4 for several types of concrete with similar water content and w/c ratios (Figure 4b) that the lessening of the surface tension in the water accounts for only a fraction of the total shrinkage reduction. The findings obtained with the Brooks (13) method infer that the shrinkage-reducing admixture-induced decline after 1350 days ranges from 0% to 24% (SRA 4 and SRA 5 concrete, respectively). Therefore, with lower surface tension of the water, lesser drying shrinkage should be expected because of the declining volumetric change in the cement paste (1, 2). These results also show that approximately 12% of the reduction in drying shrinkage may be due to the smaller volume of cement paste in the concrete.

It may be deduced from the effect of admixture dose on drying shrinkage illustrated in Figure 5 that with the exception of admixture SRA 2, the percentage of shrinkage reduction is directly related to the amount of admixture used. This finding concurs with results reported by Shah et al (2).

Lastly, be it said that reduced drying shrinkage does not necessarily ensure a total lack of concrete cracking, because several other factors affect this process. Such factors include shrinkage rate, creep properties, modulus of elasticity, tensile strength and tensile strain capacity of the concrete, to name a few. Nonetheless, the smaller the drying shrinkage, the lower the potential risk of concrete cracking.

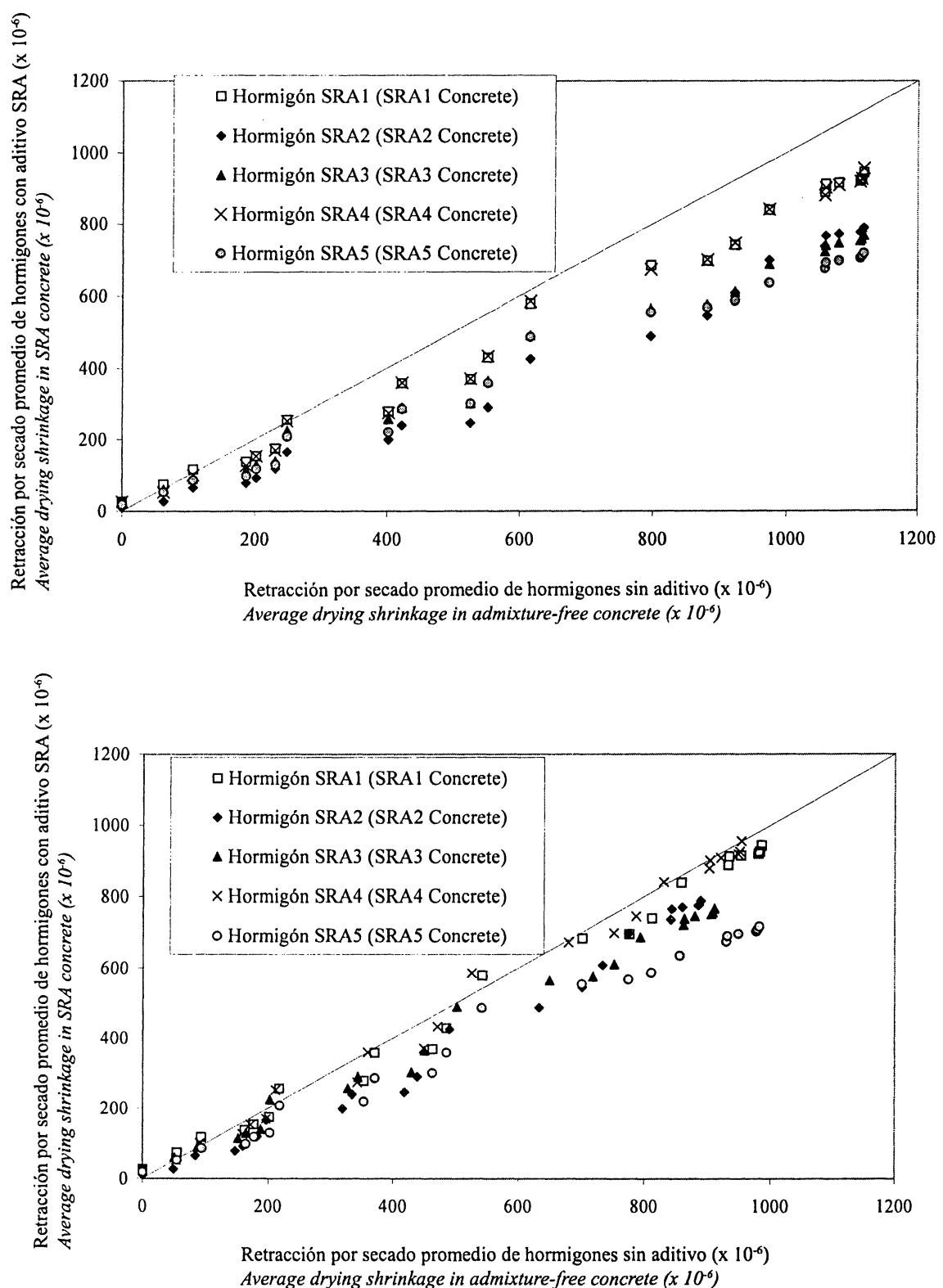


Figura 4.- Comparación de retracción por secado de hormigones con y sin aditivo: a) similar asentamiento de cono y resistencia a/c.

Figure 4.- Comparison of drying shrinkage in concrete with and without admixture: a) same slump and strength, b) same cement content and water cement ratio.

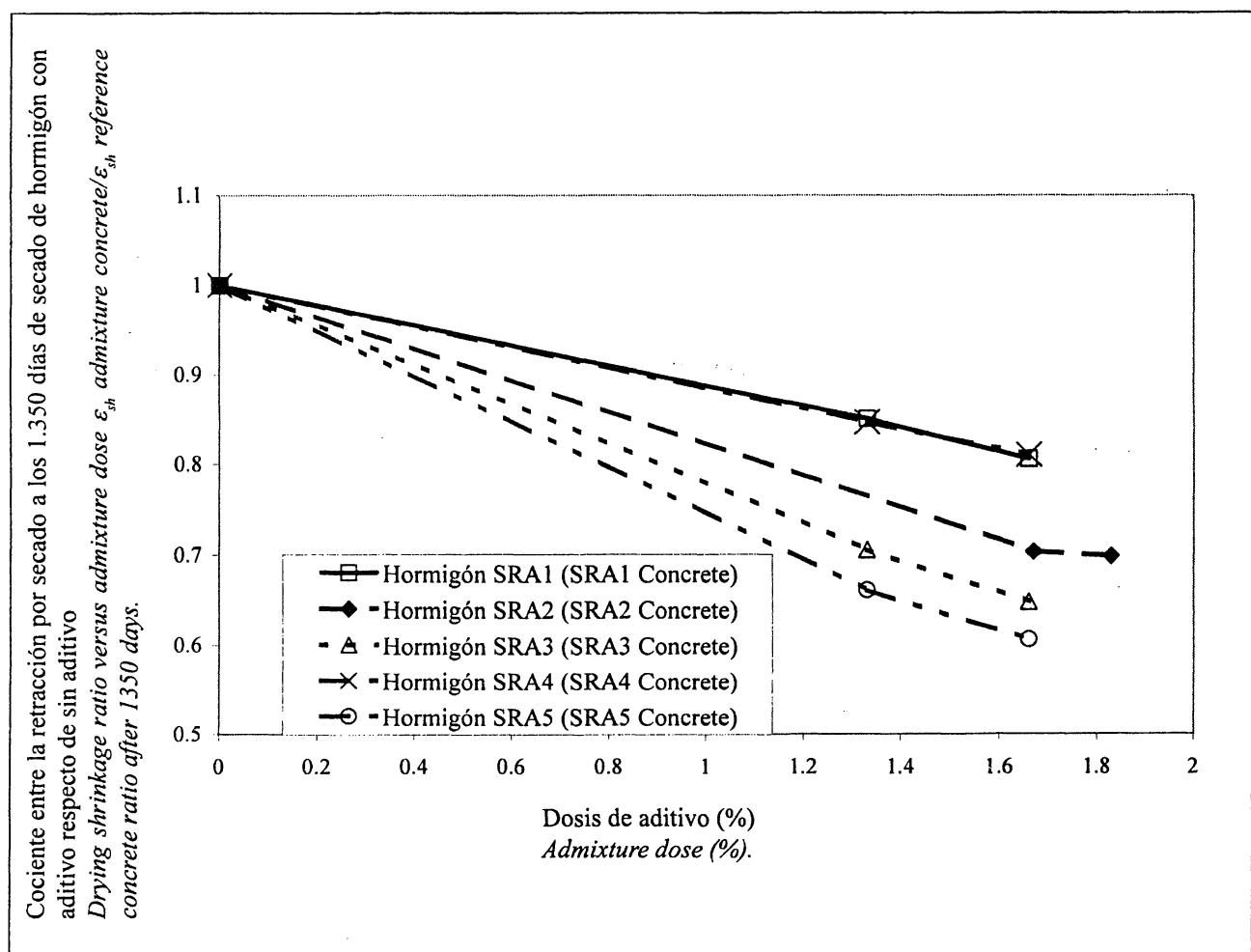


Figura 5.- Relación entre el cociente de retracción de hormigones con y sin aditivo y la dosis de aditivo utilizada.

Figure 5.- Drying shrinkage ratio versus admixture dose.

3.3. Relación entre la retracción por secado y la pérdida de peso del hormigón

La Figura 6 muestra la relación entre los resultados promedio de pérdida de peso y la retracción por secado de hormigones para las diferentes marcas de aditivos utilizadas.

Usualmente, se ha asumido que la magnitud de la retracción por secado es proporcional a la cantidad de agua perdida (4, 6). Sin embargo, la figura muestra que para la misma pérdida de peso, el uso de SRA puede reducir significativamente la retracción por secado comparada con el hormigón patrón. Luego, la relación depende fuertemente de la marca de aditivo utilizada.

Por lo tanto, el efecto de la marca de aditivo en la retracción parece estar relacionado a su capacidad de reducción de la tensión superficial del agua, tal como otros investigadores han concluido previamente (1, 2), más que la pérdida de agua. Se determinó que para los hormigón-

3.3. Relationship between drying shrinkage and concrete weight loss

Figure 6 shows the relationship between the average weight loss and drying shrinkage for the different types of admixture studied.

Drying shrinkage has usually been assumed to be proportional to water loss (4, 6). However, the figure shows that shrinkage in SRA concrete is much smaller than in the respective reference concrete for a given weight loss. This suggests that the relationship depends strongly on the type of admixture used.

Therefore, as other authors have found (1, 2), the effect of the type of admixture on concrete shrinkage would appear to be related to the capacity of such compounds to reduce the surface tension of the mixing water, rather than to water loss. For the types of concrete studied, the

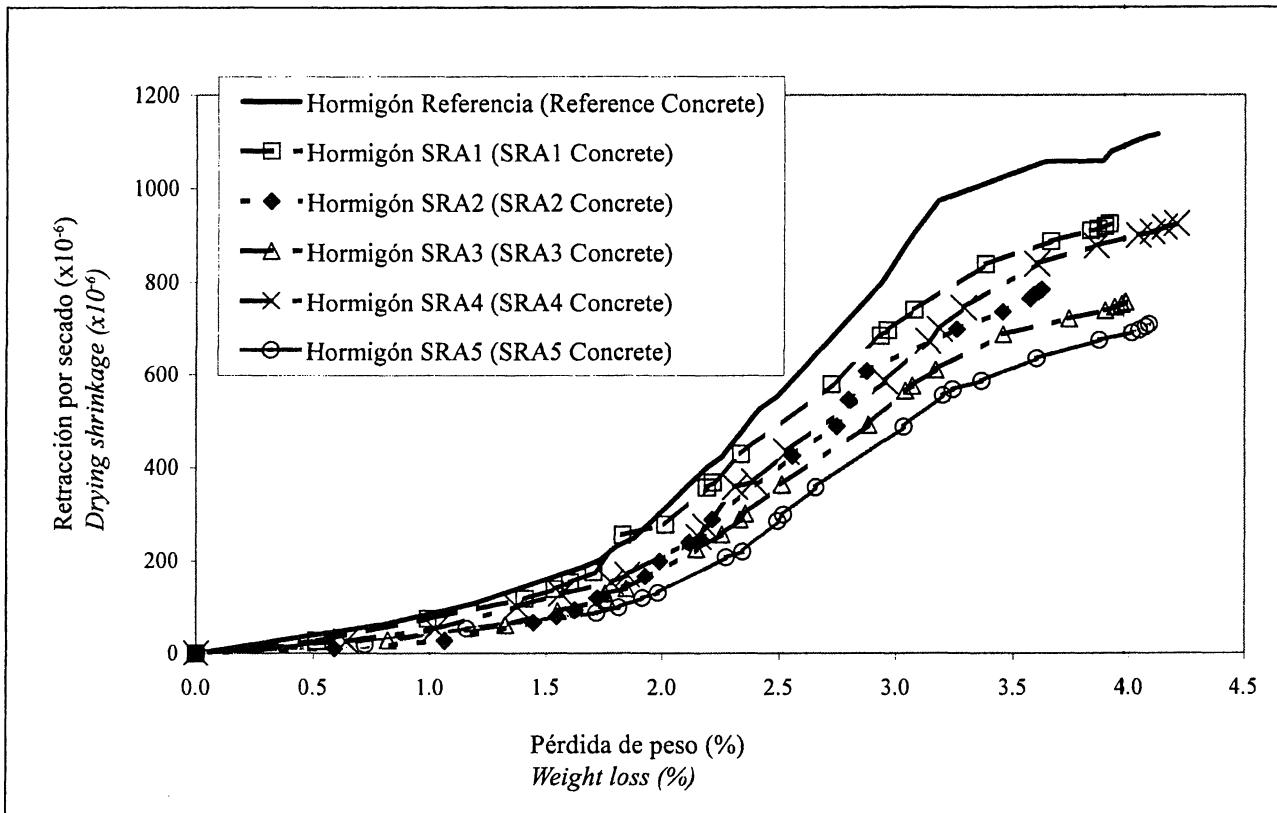


Figura 6.- Relación entre la pérdida de peso y la retracción por secado de hormigones.

Figure 6.- Weight loss vs drying shrinkage of concrete.

nes estudiados, la relación entre la pérdida de peso y la retracción por secado depende de las variables analizadas que resultaron ser estadísticamente significativas y puede ser expresada por la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = a \times \left(\frac{10^{w(t, t_0)}}{b + 10^{w(t, t_0)}} \right)^c \quad [1]$$

Donde $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$ es la retracción por secado medida en el tiempo $(t-t_0)$ de secado, t como la edad del hormigón y t_0 el tiempo cuando comienza el secado; $w(t, t_0)$ es la pérdida de peso al tiempo $(t-t_0)$ medida directamente en el especímen del ensayo de retracción y medida durante los mismos intervalos de tiempo; a , b y c son coeficientes que dependen fuertemente de la marca y dosificación del aditivo y de la dimensión del especímen de ensayo. Para los hormigones estudiados, los valores promedio para a , b y c fueron 914,6; 2003,1 y 0,5, respectivamente.

3.4. Comparación entre deformaciones de retracción medidas y calculadas

Los resultados experimentales de retracción fueron comparados con las predicciones de los modelos del ACI 209 (4), CEB MC 90 (5), B3 (6), GL 2000 (7),

relationship between weight loss and drying shrinkage, observed to depend on the statistically significant independent variables analyzed, may be mathematically expressed as follows:

Where $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$ is drying shrinkage measured at time $(t-t_0)$, t being the concrete age and t_0 time when drying began; $w(t, t_0)$ is the weight loss at time $(t-t_0)$ directly measured in the trial specimens at the same drying time; a , b and c are coefficients relating to type and dose of admixture and specimen size. For the types of concrete studied, the average values of a , b and c were 914.6, 2003.1 and 0.5, respectively.

3.4. Comparison of empirical and model-computed values for drying shrinkage strain

The experimental data for drying shrinkage were compared with the values predicted by the ACI 209 (4), CEB MC 90 (5), B3 (6), GL 2000 (7),

Sakata 1993 (8) y Sakata 2001 (9), los resultados son mostrados en la Figura 7. Los valores calculados fueron obtenidos empleando los valores de la dosificación de los hormigones y sus propiedades medidas en estado fresco y endurecido. Se destaca que dado que el cemento utilizado es Portland puzolánico y considerando que los modelos no fueron desarrollados para este tipo de cemento, el factor de clasificación de cemento utilizado fue de 1 para el modelo B3 y 10 para el modelo Sakata 2001. Para el modelo CEB MC 90, se utilizó un factor de 5 para cementos del tipo normal y de rápido endurecimiento, mientras que para el modelo GL 2000 el factor fue obtenido utilizando la metodología de clasificación propuesta por Gardner (7), basado en el desarrollo de resistencia del hormigón.

De la Figura 7 se concluye que ninguno de los modelos de predicción de retracción estudiado reproduce adecuadamente el comportamiento observado de los hormigones fabricados con cemento Portland puzolánico y aditivos reductores de retracción, puesto que ellos presentan mayores valores del coeficiente de variación a lo aceptado como adecuado ($\omega_0 > 20$) (7). Particularmente, los modelos CEB MC 90, B3, GL 2000 y Sakata 1993, sobreestiman los valores de retracción en el corto plazo mientras que en el largo plazo los subestiman. Además, se aprecia claramente que el modelo ACI 209 subestima los valores de retracción experimentados en la presente investigación. Asimismo, es posible observar que las funciones de tiempo (evolución de retracción) de los modelos CEB MC 90, B3 y GL 2000, no reflejan el comportamiento de los resultados experimentales.

Finalmente, se destaca que el modelo que mejor se desempeñó fue el propuesto por Sakata en el año 2001 (9). Este modelo predice de manera más adecuada la evolución de la retracción y posee los mejores valores del coeficiente de correlación y de variación, 0,92 y 24,8%, respectivamente.

4. CONCLUSIONES

Basado en los resultados experimentales presentados en este artículo, las siguientes conclusiones respecto de la retracción por secado de hormigones se describen a continuación:

- Todos los aditivos estudiados reducen la retracción por secado del hormigón producto de un doble mecanismo: reducción de las fuerzas de tensión superficial capilar y disminución del contenido de pasta de cemento. Para el hormigón fabricado con SRA 5, 24% de la reducción de retracción se asocia con el mecanismo de modificación de tensión superficial y un 12% al cambio de la cantidad de pasta de cemento, al considerar los resultados a los 1.350 días de secado.

Sakata 1993 (8) and Sakata 2001 (9) models; the results are shown in Figure 7. The input data to find the model values were the mix proportions and the mechanical properties measured in the fresh and hardened concrete. It should be mentioned here that since Portland pozzolan cement concrete was used in the trials and inasmuch as the models were not developed for this type of cement, the cement class factor used was assumed to be 1 in the B3 model and 10 in the Sakata 2001 model. A factor of 5 was used for normal and rapid-hardening cement in the CEB model, while the factor assumed for the GL 2000 model was obtained from Gardner's cement classification procedure based on the development of concrete strength (7).

It may be deduced from Figure 7 that none of the prediction models studied accurately describes the shrinkage behaviour observed in SRA Portland pozzolan cement concrete because in all cases the coefficient of variation is larger than the acceptable value ($\omega_0 > 20$) (7). Specifically, the CEB MC 90, B3, GL 2000 and Sakata 1993 models overestimate the short-term and underestimate the long-term shrinkage values. The ACI 209 model, in turn, clearly underestimates the drying shrinkage values found in the present study. In addition, CEB MC 90, B3 and GL 2000 fail to reflect the shrinkage changes actually observed in SRA concrete over time.

Finally, the model proposed by Sakata in 2001 was the one found to fit the experimental data most closely (9). This model predicted changes in shrinkage over time more precisely and had the best correlation and variation coefficients, 0.92 and 24.8%, respectively.

4. CONCLUSIONS

The following conclusions on concrete shrinkage can be drawn from the experimental results presented in this paper:

- All the admixtures studied reduce concrete drying shrinkage through a dual mechanism: reduction of capillary surface tension and reduction of the cement paste content. In SRA 5 concrete the former account for a reduction of 24% and the latter for a reduction of 12% after 1350 days.*

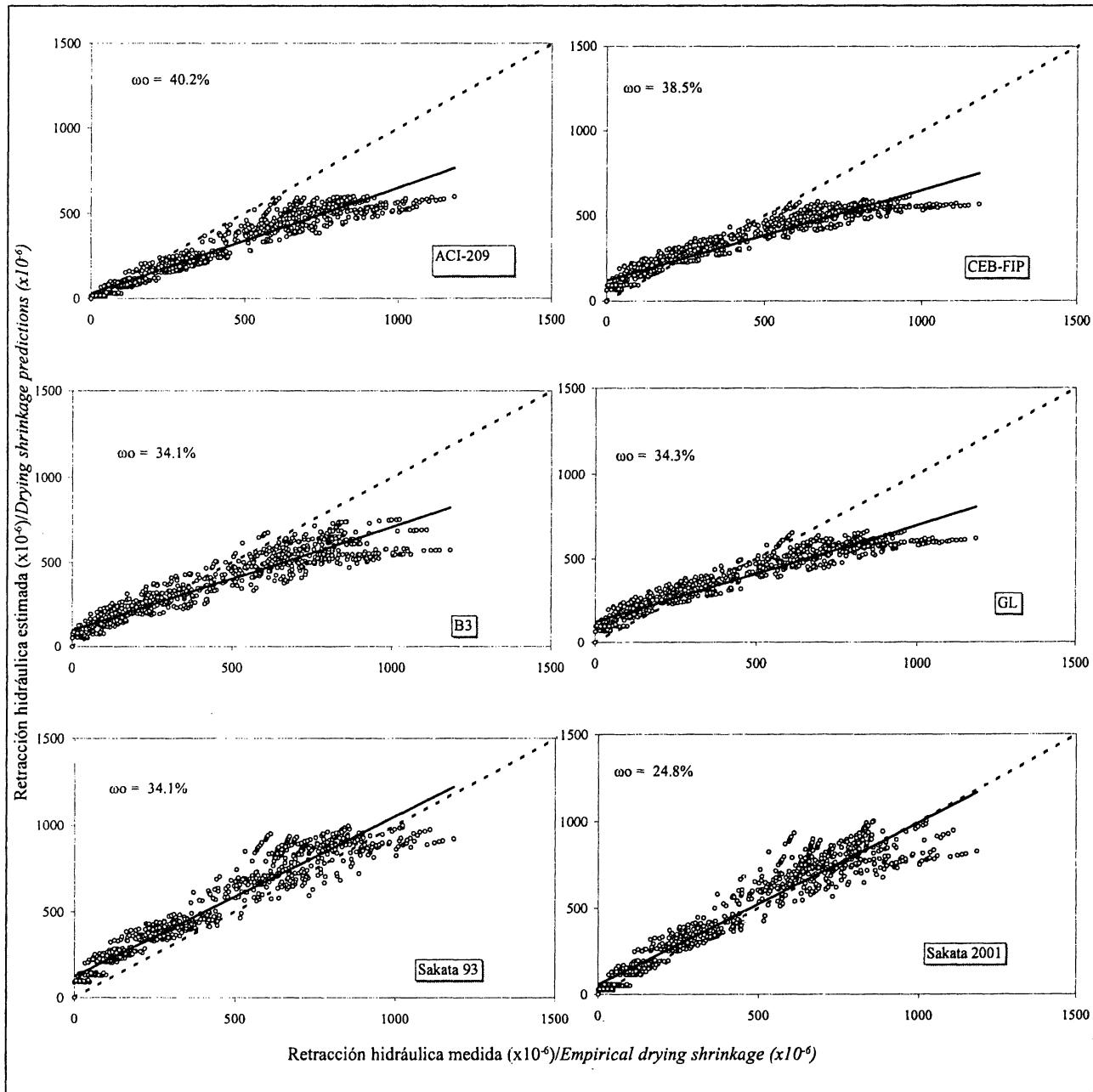


Figura 7.- Comparación entre valores de retracción por secado medidos y calculados por varios modelos de predicción.

Figure 7.- Comparison between empirical drying shrinkage strain and the values predicted with several models.

- Los resultados muestran que el porcentaje de reducción de retracción disminuyen en el tiempo. Para las marcas de aditivos estudiadas, la reducción promedio de retracción a temprana edad fue de un 64% (1 día de secado) a un 26% a los 1.350 días de secado. A edades tempranas se asocia con el mecanismo que gobierna las fuerzas de tensión capilar. A mayor edad del hormigón, el efecto de la reducción de retracción se asocia a la reducción del contenido de la pasta de cemento, puesto que la utilización del aditivo provoca una mejora en el flujo del hormigón.

- The results show that the percentage of shrinkage reduction decreases with drying time. For the types of admixture studied, shrinkage declined on average by 64% at early ages (1 day of drying) but by 26% after 1350 days. The principal effect appears to take place over a period of time when the shrinkage mechanism is governed by capillary surface tension. At later ages the effect of admixtures is due to the reduction of the cement paste content in the mixtures owing to the improved flow characteristics of SRA concrete.

- Si bien el efecto de la dosis de aditivo depende de su marca, en general una mayor dosis implica una mayor reducción de la retracción por secado.

- Los modelos de predicción de retracción ACI 209, CEB MC 90, B3 y GL 2000, no representan adecuadamente el comportamiento observado de los hormigones fabricados con aditivos reductores de retracción y cemento Portland puzolánico y subestiman fuertemente la retracción de largo plazo.

- Se cree que la baja habilidad de predicción de los modelos ACI 209, CEB MC 90, B3 y GL 2000 se debe principalmente a las propiedades del cemento y áridos utilizados, los que se encuentran localmente disponibles. Por lo tanto, las variables que se deben incluir en los modelos de predicción existentes deben ser verificadas y su sensibilidad ajustada por medio de ensayos de los materiales típicos de la región o trabajo específico, para asegurar la calidad de la estimación y prevenir efectos negativos potenciales sobre las estructuras.

- El modelo Sakata 2001 es el que mejor representa el comportamiento de los hormigones fabricados con aditivos reductores de retracción y cemento Portland puzolánico y puede ser utilizado como primera aproximación para estimar la retracción por secado de hormigones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico de Chile por el financiamiento dado a este estudio bajo el proyecto Fondecyt N° 1980943-1998.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) M. Shoya, S. Sugita and T. Sugawara: *Improvement of Drying Shrinkage and Shrinkage Cracking of Concrete by Special Surfactants*. Proc. of the Int. Symposium held by RILEM (1990), pp. 484-495.
- (2) S. P. Shah, M. E. Kraguler and M. Sarigaphuti: *Effects of Shrinkage-Reducing Admixtures on Restrained Shrinkage Cracking of Concrete*. ACI Materials Journal, Vol. 89, n° 3 (1992), pp. 289-295.
- (3) R. Gettu, A. Aguado, M. Martin, J. Roncero: *El uso de Aditivos Reductores de Retracción en el Hormigón y sus Implicaciones*. El Hormigón en las Infraestructuras de Transporte. Cemento-Hormigón, N° 813 (2000), pp. 755-769.
- (4) ACI Committee 209, *Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures*. American Concrete Institute, SP-76 (1992), pp. 193-300.
- (5) CEB-FIP. Model Code for Concrete Structures MC 90. p.575, Thomas Telford, London, U.K, 1991.
- (6) Z. P. Bazant and S. Baweja: *Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures: Model B3*. American Concrete Institute, SP-194, (2000), pp. 1-83
- (7) N. J. Gardner and M.J. Lockman: *Design Provisions for Drying Shrinkage and Creep of Normal-Strength Concrete*. ACI Materials Journal, Vol. 98, n° 2, (2001), pp. 159-167.
- (8) K. Sakata: *Prediction of Concrete Creep and Shrinkage*. Proc. of 5th International RILEM Symposium (1993), pp. 649-654.
- (9) K. Sakata, T. Tsubaki, S. Inoue and T. Ayano: *Prediction Equations of Creep and Drying Shrinkage for Wide-Ranged Strength Concrete*. Proc. of 6th International Conference CONCREEP-6@MIT (2001), pp. 753-758.
- (10) Road Research Laboratory, *Design of Concrete Mixes*, D.S.I.R., *Road Note N°4*, 2nd Edition, H.M.S.O., London, 1950, 16 pp.
- (11) A.S.T.M.. Annual Book of ASTM Standards, V. 4.02. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, 1998.
- (12) A. M. Neville, W.H. Dilger and J.J. Brooks. *Creep of Plain and Structural Concrete*. p. 361, Longman Inc., New York, 1983.
- (13) J. J. Brooks: *Elasticity, Creep and Shrinkage of Concrete contained Admixtures*. American Concrete Institute, SP-194 (2000), pp. 283-360.

- While the effect observed is highly dependent on the type of admixture; in most cases shrinkage declined more when larger amounts of admixture were used.

- The ACI 209, CEB MC 90, B3 and GL 2000 shrinkage prediction models do not adequately describe the observed shrinkage behaviour of shrinkage-reducing admixture Portland pozzolan cement concrete and greatly underestimate long-term drying shrinkage strain.

- The poor prediction capabilities of the ACI 209, CEB MC 90, B3 and GL models is thought to be primarily due to the properties of the cement and aggregate locally available. Consequently, the variables considered in existing prediction models should be verified and their sensitivity adjusted by testing the materials typically used in a given region or specific construction site to ensure the quality of the estimate and prevent potential adverse effects on the structures.

- The Sakata 2001 model best depicts the shrinkage behaviour of SRA concretes made with Portland pozzolan cement and suffices to obtain a rough estimate of shrinkage strains.

ACKNOWLEDGEMENTS

Grateful acknowledgement is made to the Chilean National Council for Scientific and Technological Research for funding this study under Fondecyt Grant N° 1980943-1998.